

フォトニック結晶ファイバーの研究開発

辻川 恭三・中島 和秀

Research and Development of Photonic Crystal Fibers

Kyozo TSUJIKAWA and Kazuhide NAKAJIMA

New types of optical fiber with a silica-air microstructure, such as photonic crystal fiber (PCF) and hole-assisted fiber (HAF), have received increasing attention because of their novel guiding properties such as wide single-mode bandwidth, dispersion tailoring, and low bending loss, etc. We mainly focus on recent progress in loss reduction in PCF. We also show that PCF and HAF have a possibility to become attractive transmission media for a large-capacity WDM transmission in terms of high power tolerance, especially as regards the fiber fuse effect.

Key words: photonic crystal fiber, hole-assisted fiber, loss reduction, fiber fuse effect

最近、断面内に周期的な空孔構造をもつフォトニック結晶ファイバー (PCF: photonic crystal fiber) や空孔アシストファイバー (HAF: hole-assisted fiber) といった、空孔型光ファイバーの研究開発が急速に進展している。これらの光ファイバーでは、従来の単一モード光ファイバーでは実現困難であった特性が実現できるため、次世代の光伝送媒体として期待が寄せられている。本稿では、フォトニック結晶ファイバー (PCF) を中心に、光伝送損失の低減技術の動向、高速信号の伝送実験の結果、高パワー入力時のファイバーヒューズに対する耐性評価の結果などについて述べ、これらの空孔型光ファイバーの光伝送媒体としての可能性について概説する。

1. 空孔型光ファイバーの特徴と低損失化の進展

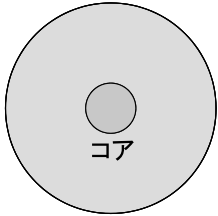
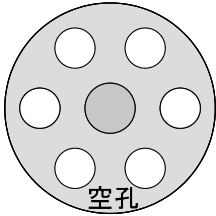
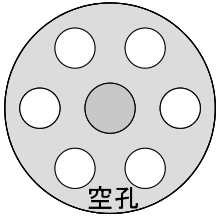
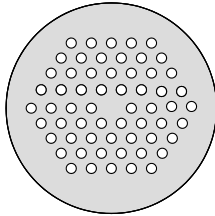
空孔型光ファイバーは、その導波メカニズムによって分類できる。本稿では、全反射を導波原理とするものの中で、比較的少数の空孔を付与したクラッド部とドーパント材料を添加したコア部との両方をもつタイプを空孔アシストファイバー (HAF)、多数の空孔によってクラッド部の屈折率を下げ、通常はコア部にドーパント材料を用いないタイプをフォトニック結晶ファイバー (PCF) とよぶ (表 1)。われわれは、PCF では純石英ガラスを、HAF に関して

は従来の 1.3 μm 帯ゼロ分散光ファイバー (SMF) と同様にコア部分に酸化ゲルマニウム (GeO_2) をドーブした石英ガラスをファイバーの母材として用いている。

空孔型光ファイバー全般に適用される作製方法としては、おもに 2 つがある¹⁾。1 つはキャピラリー法または stack and draw 法とよばれる。多数の石英ガラス細管 (キャピラリー) を最密構造に積み重ね、ジャケット用の太い径の石英ガラス管の中に設置して母材を作製し、中心部分にコアとなる石英ガラスロッドを挿入した後に線引きを行う。この方法は、空孔数の多い場合にも比較的容易に適用でき大型の母材が作製可能であるが、空孔の配置については限定される。もう 1 つは穴あけ法とよばれ、太い径の石英ガラスロッドに穴をあけ、これを母材として線引きを行う。この方法では、空孔の配置は幅広く選択できるが、多数の穴をあける場合には高度な母材加工技術が求められる。

HAF は、空孔による光閉じ込めの効果によって曲げ損失を極限まで低減できるため²⁻⁴⁾、「曲げフリー光ファイバーコード」として⁵⁾、ユーザー宅内の配線用光コードへの適用および導入が進められてきた。材料添加によるコアをもつ HAF では、空孔への光の浸み出しが小さいため低損失化が比較的容易であり、すでに汎用の SMF とほぼ同等の損失値 (波長 1.55 μm で 0.2 dB/km 程度) に到達して

表1 空孔型光ファイバーの分類.

	従来型光ファイバー		空孔型光ファイバー	
	SMF	HAF	HAF	PCF
断面構造				
導波原理		全反射		

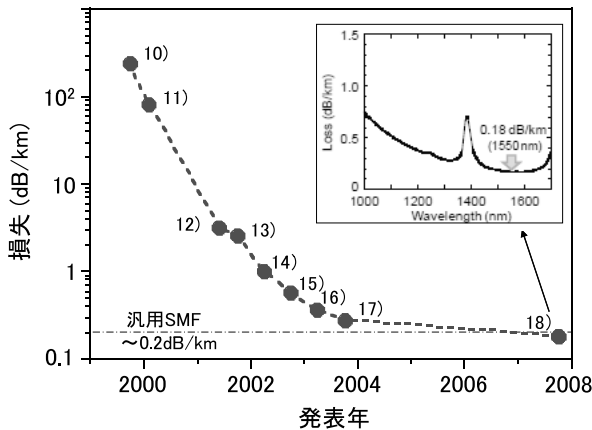


図1 PCFの損失値の推移.

いる^{6,7)}. また, 単一モード条件下で, 小さい曲げ損失および汎用 SMF と同等のモードフィールド径を実現するための構造設計指針が確立されたため⁷⁾, 今後, 通信局内の配線用光コード⁸⁾ やアクセス系のネットワークへの適用領域の拡大が期待できる.

一方, PCF では空孔 (屈折率 $n=1$) の大きさと配置によって, クラッド部の実効的な屈折率を調整してコアとの比屈折率差を得るため, コアの屈折率の調整にドーパントを必要としない. PCF で特徴的なのは, 高速伝送に必要な単一モード化を任意の波長域で実現できる点である⁹⁾. 波長分散, 光非線形効果, 複屈折率などについても, 従来の光ファイバーでは困難な特性が実現可能なため, われわれは, 非常に低い理論損失限界をもつ純石英ガラス製の PCF を次世代の超広帯域伝送媒体の有力な候補と考え, 長尺化と低損失化を目指して検討を進めてきた. 図1に, PCF の損失値の推移を示す¹⁰⁻¹⁸⁾. このように, 1999年当初の 240 dB/km¹⁰⁾ から飛躍的に低損失化が進展し, 長尺化については 2006年に最長 100 km の PCF が実現された¹⁹⁾. この PCF は損失が 0.3 dB/km であり, 外径 40 mm,

長さ 1200 mm の純石英ガラス母材から作製したものである. 2007年には 0.18 dB/km (波長 1.55 μm)¹⁸⁾ と, 汎用 SMF と同等以下の損失値が実現され, 純石英コア SMF の世界最低損失値 0.1484 dB/km²⁰⁾ も視野に入ってきている. 図1中の挿入図は, 最低損失 0.18 dB/km の PCF の損失波長特性である.

2. フォトニック結晶ファイバーの低損失化技術

本章では, 図1に示した損失 0.18 dB/km の PCF を例として, PCF の損失特性と低損失化に用いた手法について述べる. 適切な構造設計によって閉じ込め損失¹⁾を十分に小さく抑えた PCF の損失は, 波長 λ と係数 A, B を用いて, 式(1)によってよく近似される²¹⁾. ここで, 第1項はレイリー散乱損失 (A はレイリー散乱係数), 第2項の定数 B は構造不整散乱損失, 第3項の α_{OH} は OH 基不純物による吸収損失, 第4項の α_{IR} は石英ガラスの主フォノンによる赤外吸収損失である. ただし, 式(1)では波長の -4 乗に比例する損失成分すべてを便宜的にレイリー散乱損失と表現している. つまり, 第1項には純石英コアのレイリー散乱だけではなく, 空孔表面の微細な凹凸による散乱が含まれる. 同様に, 第2項の係数 B で表される構造不整損失も, 空孔表面の凹凸や空孔構造の長手方向の変動に起因する散乱損失と考えられる. また, 従来の PCF では, 第3項の OH 基吸収は波長 1.38 μm で約 10 dB/km (波長 1.55 μm で約 0.1 dB/km に相当) と, 汎用の SMF よりも明らかに大きな値であった²²⁾.

$$\alpha(\lambda) = A/\lambda^4 + B + \alpha_{\text{OH}} + \alpha_{\text{IR}} \quad (1)$$

図2に PCF の損失の波長の -4 乗プロットを示す. 図中に, 最低損失の PCF1 の特性と, 下記のプロセスを適用しなかった PCF2 の特性とを比較に示している. PCF1 では, OH 基吸収損失 α_{OH} を抑制するために, VAD 法で作製された高純度な純石英ガラスを用い, 脱水環境下で母材の

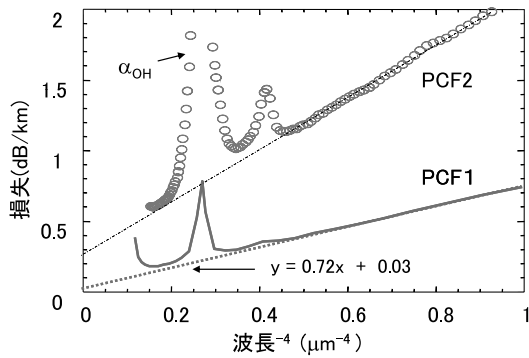


図2 作製したPCFの損失の波長依存性(波長の -4 乗プロット).

表2 最低損失PCFの損失要因分析結果.

	PCF1	SMF
A (dB/km/ μm^4)	0.72	1.0
α (dB/km at $1.55 \mu\text{m}$)	0.18	0.19
A/λ^4	0.13	0.17
α_{IR}	0.01	0.01
α_{OH}	<0.01	<0.01
B	0.03	<0.01

作製と組み立てを行った。さらに、乾燥した不活性ガス雰囲気下で線引きすることで、 α_{OH} のピーク値を0.5 dB/km程度に抑制できた。一方、母材の作製時に空孔内面の洗浄、研磨、エッチングを行い、空孔表面の微細な凹凸の低減を試みた。また線引き時には、空孔径とファイバー構造の長手方向の均一性を保つために、温度や張力などの条件を制御し、ファイバーの外径の変動量を $0.5 \mu\text{m}$ 以下に抑制した。これらのプロセスによって、PCF1の空孔表面の微細な凹凸は低減された^{18, 21)}。図2の直線領域の傾きは式(1)の A を、切片は B を表すが、上記のプロセスを適用

したPCF1では、PCF2に比べて A, B ともに明らかに減少しており、作製プロセスの改良による空孔由来の余剰散乱損失の低減効果が明確に示された。PCF1の損失要因の分析結果を汎用のSMFと比較して表2に示す。特に、レイリー散乱係数(係数 A)の値は $0.72 \text{ dB/km}/\mu\text{m}^4$ と、世界最低損失の純石英コアSMFの値 $0.745^{20)}$ よりも小さい。一方、構造不整散乱損失(係数 B)が 0.03 dB/km 残っていることと、レイリー散乱と赤外吸収の和($A/\lambda^4 + \alpha_{\text{IR}}$)がほぼ 0.14 dB/km であることを考慮すると、今後、作製プロセスを理想的なレベルにまで改良できれば、世界最低損失値 0.1484 dB/km を超えるPCFの実現も期待できる。さらなる低損失化へのアプローチとしては、コアガラス自体のレイリー散乱を低減する方法が考えられる²³⁻²⁵⁾。そのためには、純石英ガラス以下のレイリー散乱を実現する各種ドーパントの添加や、線引き時のファイバーの熱処理(徐冷処理)条件の最適化などの手法の進展が期待される。

3. フォトニック結晶ファイバーの光伝送媒体としての可能性

3.1 広帯域・高速伝送特性の評価

図3にPCFを用いた高速伝送実験の報告例を示す。われわれも $1.55 \mu\text{m}$ 帯での 10 Gb/s で 100 km の波長分散マネージドソリトン伝送¹⁹⁾や、 $0.65 \mu\text{m}$ 帯の可視光域から $1.55 \mu\text{m}$ 帯までの 263 THz (SMFの単一モード周波数域の5倍相当)に及ぶ超広帯域WDM伝送²⁶⁾、PCFによるDSF($1.55 \mu\text{m}$ 帯分散シフト光ファイバー)伝送路の波長分散補償²⁷⁾、PCFの実験では最大容量の 640 Gb/s 伝送²⁸⁾などの検討を進めた。さらに、波長あたりの伝送速度が 100 Gb/s を超えた際の検討として 160 Gb/s OTDM (optical

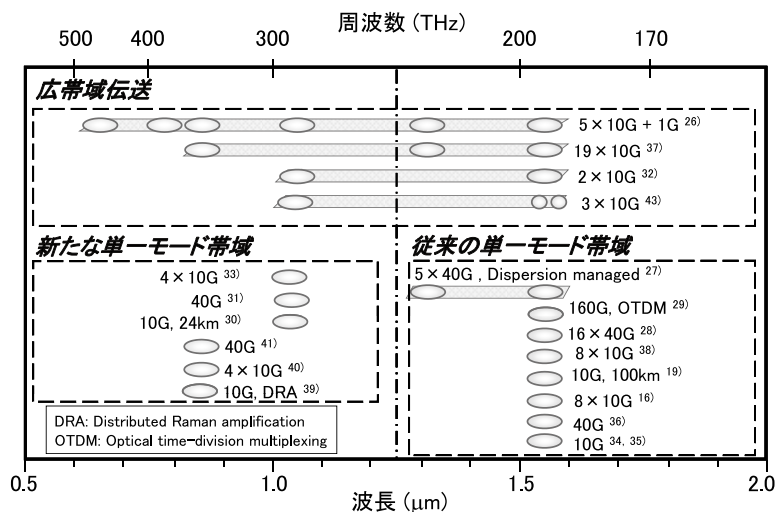


図3 PCFを用いた高速伝送実験の報告例。(例: $5 \times 10 \text{ G}$ の5は波長チャンネル数を示す)

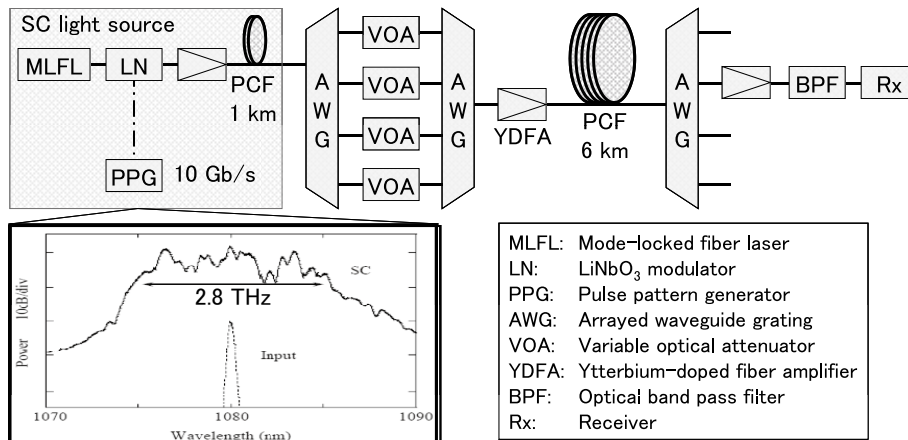


図4 1.0 μm 帯 WDM (10 Gb/s×4 ch) 伝送の実験系と SC 光スペクトル.

time-division multiplexing) 伝送²⁹⁾を行い, PCFが将来のペタビット級の光伝送に対応できる高いポテンシャルをもつことを実証してきた²¹⁾.

PCFの単一モード化が可能な1.0 μm帯において, 純石英ガラスでは理論損失限界値(レイリー散乱と赤外吸収の和)が約0.5 dB/km程度と比較的低く²³⁾, 材料分散の絶対値も1.55 μm帯と同程度である³⁰⁾. また, 各種の希土類ドープ光増幅器のうち, 広帯域で高出力特性をもつ ytterbium 光ファイバー増幅器(YDFA)も利用可能なため, 1.0 μm帯は新たな通信波長帯として有望である. そこで, PCFの検討初期から10 Gb/sで24 km³⁰⁾および40 Gb/sで6 km伝送³¹⁾, 1.55 μm帯との2波長20 Gb/sのWDM伝送³²⁾などの検討を進めてきた. 図4に1.0 μm帯WDM(10 Gb/s×4 ch)伝送の実験系と測定結果の一例を示す³³⁾. この実験ではパルス光源として, 波長1.08 μm, パルス幅10.5 psのモード同期レーザーを使用して, YDFAでの光増幅後に長さ1 kmの低分散PCFに入射し, 図中に示したようなSC(スーパーコンティニウム)光を発生させている. このPCFでは構造パラメータを調整することで, 従来の光ファイバーでは困難だった1.0 μm帯(1.09 μm)でのゼロ分散波長を実現し, 効率よく自己位相変調を発生させている. このSC光をAWG(アレイ導波路回折格子)に入射させて, 0.8 nm間隔の4波長WDM信号を作り, 波長1.08 μmで1.3 dB/km, 長さ6 kmの伝送用のPCFに入射させ, 伝送後の4 chの信号すべてについてエラーフリー動作を確認した.

3.2 低非線形・高入力光ファイバーとしての可能性

高速・大容量なWDMシステムにおいては, 非線形光学効果が伝送特性を制限すると考えられる. 非線形効果を低減するには, 光ファイバーの実効断面積(A_{eff})の拡大が有効であり, さまざまな光ファイバーの構造が提案されて

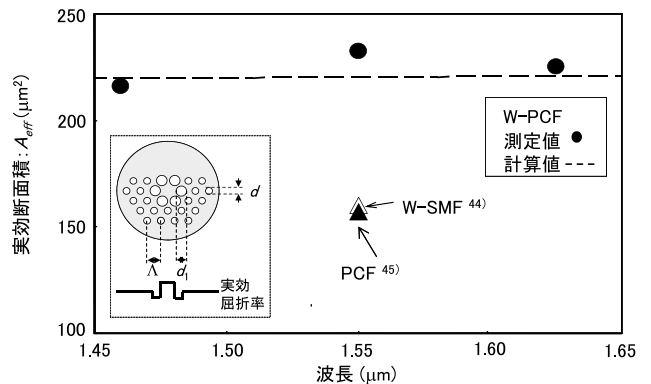


図5 W-PCFの A_{eff} と波長との関係.

いる⁴³⁾(通常のSMFの A_{eff} の値は $80 \mu\text{m}^2$ 程度). 一般に, A_{eff} の拡大は単一モード動作と曲げ損失の抑制に対してトレードオフの関係にあるが, PCFではこの問題が緩和されるため, 均一構造のPCFでの A_{eff} の拡大もすでに検討されている^{44,45)}. われわれは, さらに拡大を目指して, 図5に示すような断面内構造をもち, 実効的にW型の屈折率分布を実現するPCF(W-PCF)を提案した⁴⁶⁾. 汎用のSMFにおいてW型の屈折率分布(W-SMF)は A_{eff} の拡大と曲げ損失の抑制に有効であることが知られており⁴³⁾, これを参考に, W-PCFではコアに近接する第1層の空孔径を拡大することでW型の分布を実現した. 数値計算によって最適化した構造のW-PCFを作製し, 波長1460~1625 nmでの単一モード動作と汎用のSMF以下の十分に小さな曲げ損失を確認できた. 図5は作製したW-PCFの A_{eff} と波長との関係である. 黒丸は測定結果, 破線は計算結果を表す. 構造を最適化したW-SMFと, 従来の均一構造PCFの A_{eff} の値も比較のために示した^{44,45)}. W-PCFにおいては, 測定結果と計算結果はよく一致し, W-SMFや従来のPCFの1.5倍に相当する $220 \mu\text{m}^2$ の A_{eff} が得られた. さらに, W-PCFの A_{eff} の波長依存性は非常に小さいた

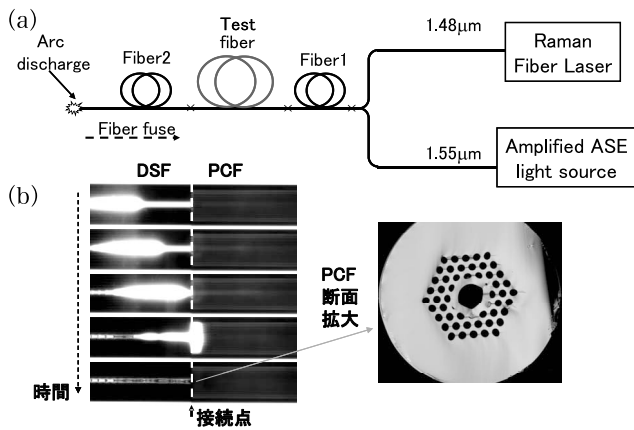


図6 (a) ファイバーヒューズの実験系, (b) 接続点付近でのファイバーヒューズの挙動とPCFの断面写真.

め、広い波長帯での低非線形伝送が実現できる⁴⁷⁾. このW-PCFでは、2章で述べた低損失化のプロセスを完全には適用していなかったため、空孔表面の凹凸での散乱損失が生じ、波長1.55 μmでの損失は1.2 dB/kmであった。したがって今後、低損失化のプロセスを適用することによって低損失性(図1, 2)と低非線形性(図5)の両方を備えたW-PCFの実現が期待できる。

一方、WDMの波長チャネル数の拡張に伴い、光ファイバーへの入力光パワーの拡大が予想される。その制限要因としては、非線形光学効果に並んで、ファイバーヒューズ現象が挙げられる⁴⁸⁾。ファイバーヒューズは高パワー光の入力時に、光ファイバーの局所的な温度上昇をきっかけとしてプラズマが発生し、光源方向へ向かってコア部分を伝搬する現象である。ファイバーヒューズは、伝搬閾値(プラズマが伝搬し得る最低の光パワー)以下へ入力パワーを低下させることで停止するが、汎用のSMFの伝搬閾値は1.2~1.5 W程度なので^{49, 50)}、波長チャネル数の拡張とともに分布ラマン増幅技術の適用などが進展すれば、近い将来にファイバーヒューズによる入力光パワーの制限が問題となる可能性がある。

空孔型光ファイバーのHAFでは、理論検討や空孔の位置と伝搬閾値との関係について検討が進み^{51, 52)}、適切な空孔配置を有するHAFにおいて15.6 W以上の伝搬閾値が確認された⁵³⁾。HAFでは、光ファイバー被覆の温度上昇も抑制できるため⁵⁴⁾、大パワー伝送用の光ファイバーコードといった新たなアプリケーションへの展開も期待できる。一方、PCFでは、波長1.06 μmにおいて9 W以上という伝搬閾値が報告されている⁵⁵⁾。われわれは既存の通信波長帯での検討を進めた⁵³⁾。図6(a)に示すように、実験では波長1.48 μmと1.55 μmのCW光を用いた。波長1.48 μmはラマンファイバレーザを、波長1.55 μmはASE光

源とバンドパスフィルターとEDFAを使用した。2つの光を合波し、Fiber 1 (DSF) を経てTest fiber (PCF) へ入力した。ファイバーヒューズはFiber 2 (DSF) の終端を放電加熱することで発生させ、伝搬してきたファイバーヒューズがPCFを伝搬するかを観測した。実験に用いたPCFは、空孔数が60個で波長1.48 μmでのモードフィールド径(MFD)が6.5 μmであった。図6(b)に、トータルの入力光パワー12 Wの条件で、ファイバーヒューズをFiber 2 (DSF) で発生・伝搬させ、その際にPCFとの接続点を撮影した連続写真と、接続点付近でのPCFの断面写真を示す。撮影は30 μs間隔で行い、約2.0 m/sでDSFを伝搬してきたファイバーヒューズが接続点から約38 μmの地点で停止する様子がとらえられた。PCFの断面写真での中心部の大きな穴は高温のプラズマの侵入によって生じたもので、第1層目の空孔構造を溶融・破壊しているが、第2層目の一部とそれ以降の空孔は残存した。このことから、PCFでのファイバーヒューズの停止は空孔構造によってプラズマ密度の減少が引き起こされたためであり、図6(a)でみられる高い輝度領域の断面方向への拡大については、プラズマが放つ光が空孔で散乱されたものと考えられる。さらに、光源の出力限界である14.3 Wでの実験も行ったが、プラズマはPCFを伝搬することなく、Fiber 2を用いずにPCFの端面を直接に放電加熱しても、ファイバーヒューズは発生しなかった。この結果は、実験に用いたPCFの伝搬閾値が14.3 W以上(パワー密度に換算すると43 MW/cm²以上)であることを示している。この値は既存のSMFの伝搬閾値の10倍に匹敵する。さらに、W-PCFなどの手法によって A_{eff} を拡大すれば、パワー密度が低減されるためファイバーヒューズの抑圧にも有効と考えられる。したがって、最適な空孔構造を有するPCFは非線形効果とファイバーヒューズの両方を抑制し、入力光パワーの増大を可能とするため、伝送距離の長延化とWDM伝送システムにおける波長チャネル数の増加に大きく寄与することが期待される。

本稿では、空孔型光ファイバーの低損失化技術の動向と光伝送媒体としての可能性について概説した。HAFに関しては、極限の低曲げ損失特性という利点を生かして、ユーザー宅内の配線用光コードへの導入が進められてきた。近年、単一モード設計指針の確立、ファイバーヒューズへの耐性などに進展がみられ、新たなアプリケーションや適用領域の拡大が期待される。PCFに関しては、研究レベルではあるが、汎用のSMFと全く遜色ない低損失化が実現され、1.0 μm帯などの新たな波長帯の活用が可能

など、光伝送媒体としての高いポテンシャルが伝送実験によって示されてきた。加えて、WDMに伴う光パワーの高入力化の問題に対しても、非線形現象を抑制するための A_{eff} の拡大、ファイバーヒューズへの耐性の両面で、既存のSMFを大きく上回る特性が確認されており、長距離・大容量通信を支える次世代の光ファイバーの有力な候補として期待される。今後の実用化展開に向けたおもな技術課題としては、大型母材の作製技術、空孔の内面加工処理、線引き時に空孔構造の均一性を保つ技術などが挙げられ、当然ながら経済性との両立が求められる。また、接続技術や長期的な信頼性などについても、改良の余地が残されていると思われるが、今後もこれらの技術課題の解決に取り組み、未来に繋がる知見を積み重ねていきたいと考えている。

文 献

- 1) 藤田盛行, 田中正俊, 山取真也, 鈴木聡人, 小柳繁樹, 山本哲也: “フォトリック結晶ファイバ (1)”, 三菱電線工業時報, **99** (2002) 1-9.
- 2) 周 健, 中島和秀, 田嶋克介, 保莉和男, 佐藤公紀, 三川泉: “フォトリック結晶ファイバの構内, 宅内配線の適用に関する検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, OFT2002-81 (2003).
- 3) K. Ieda, K. Nakajima, T. Matsui, I. Sankawa, T. Shitaba, S. Ikeda, K. Tajima, K. Shiraki, S. Tomita and T. Haibara: “Characteristics of bending loss optimized hole assisted fiber,” *Opt. Fiber Technol.*, **14** (2008) 1-9.
- 4) T. Kurashima, K. Hiramatsu, H. Aoyama, K. Nakajima and S. Tomita: “Potential of hole-assisted fibres in optical access and in-house networks,” *ECOC 2007* (2007) 6.1.1.
- 5) 鎌 光男, 青山 浩, 田中 浩, 小田泰男: “D. I. Y 感覚で光配線を容易にできる曲げフリー光ファイバコードを開発”, NTT 技術ジャーナル, **18** (2006) 65-67.
- 6) 姚 兵, 大藪和正, 黒沢芳宣, 立蔵正男, 熊谷智宣: “低損失ホーリーファイバの開発”, 電子情報通信学会技術研究報告, OFT2003-27 (2003).
- 7) K. Nakajima, T. Shimizu, T. Matsui, C. Fukai and T. Kurashima: “Single-mode hole-assisted fiber as a bending-loss insensitive fiber,” *Opt. Fiber Technol.*, **16** (2010) 392-398.
- 8) S. Aozasa, Y. Enomoto, H. Oohashi and Y. Azuma: “Highly reliable optical fiber distribution facilities in central office employing single-mode hole-assisted fiber cord,” *59th IWCS*, 5-4 (2010).
- 9) T. A. Birks, J. C. Knight and P. St. J. Russell: “Endlessly single-mode photonic crystal fiber,” *Opt. Lett.*, **22** (1997) 961-963.
- 10) P. J. Bennett, T. M. Monro and D. J. Richardson: “Toward practical holey fiber technology: Fabrication, splicing, modeling, and characterization,” *Opt. Lett.*, **24** (1999) 1203-1205.
- 11) W. J. Wadsworth, J. C. Knight, A. O. Blanch, J. Arriaga, E. Silvestre and P. S. J. Russell: “Soliton effects in photonic crystal fiber at 850 nm,” *Electron. Lett.*, **36** (2000) 53-55.
- 12) H. Kubota, K. Suzuki, S. Kawanish, M. Nakazawa, M. Tanaka and M. Fujita: “Low-loss, 2 km-long photonic crystal fiber with zero GVD in the near IR suitable for picosecond pulse propagation at the 800 nm band,” *CLEO 2001*, CPD3-1 (2001).
- 13) J. A. West, N. Venkataramam, C. M. Smith and M. T. Gallagher: “Photonic crystal fibers,” *ECOC 2001*, Th.A.2.2 (2001).
- 14) K. Tajima, K. Nakajima, K. Kurokawa, N. Yoshizawa and M. Ohashi: “Low-loss photonic crystal fibers,” *OFC 2002*, ThS3 (2002).
- 15) L. Farr, J. C. Knight, B. J. Mangan and P. J. Roberts: “Low loss photonic crystal fibre,” *ECOC 2002*, PD1.3 (2002).
- 16) K. Tajima, J. Zhou, K. Nakajima and K. Sato: “Ultra low loss and long length photonic crystal fiber,” *OFC 2003*, PD1 (2003).
- 17) K. Tajima, J. Zhou, K. Kurokawa and K. Nakajima: “Low water peak photonic crystal fibers,” *ECOC 2003*, Th.4.1.6 (2003).
- 18) K. Tajima: “Low loss PCF by reduction of hole surface imperfection,” *ECOC 2007*, PD2.1 (2007).
- 19) K. Kurokawa, K. Tajima, K. Tsujikawa, K. Nakajima, T. Matsui, I. Sankawa and T. Haibara: “Penalty-free dispersion-managed soliton transmission over a 100-km low-loss PCF,” *J. Lightwave Technol.*, **24** (2006) 32-37.
- 20) K. Nagayama, K. Kakui, M. Matsui, T. Saitoh and Y. Chigusa: “Ultra-low-loss (0.1484 dB/km) pure silica core fibre and extension of transmission distance,” *Electron. Lett.*, **38** (2002) 1168-1169.
- 21) K. Kurokawa, K. Nakajima, K. Tsujikawa, T. Yamamoto and K. Tajima: “Ultra-wideband transmission over low loss PCF,” *J. Lightwave Technol.*, **27** (2009) 1653-1662.
- 22) R. T. Bise, D. J. Trevor, E. Monberg and F. Dimarcello: “Impact of preform fabrication and fiber draw on the optical properties of microstructured fiber,” *51st IWCS* (2002) pp. 339-343.
- 23) K. Tsujikawa, K. Tajima and J. Zhou: “Intrinsic loss of optical fibers,” *Opt. Fiber Technol.*, **11** (2005) 319-331.
- 24) 辻川恭三, 田嶋克介, 大橋正治: “低レイリー散乱光ファイバ”, 電子情報通信学会論文誌 B-I, **J86-B** (2003) 1-12.
- 25) K. Saito, E. H. Sekiya, A. J. Ikushima, K. Ohsono and Y. Kurosawa: “Control of glass forming process during fiber drawing to reduce the Rayleigh scattering loss,” *J. Am. Ceram. Soc.*, **89** (2005) 65-69.
- 26) K. Ieda, K. Kurokawa, T. Shimizu, K. Tajima, K. Nakajima, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Shiraki and I. Sankawa: “Visible to infrared WDM transmission over PCF,” *ECOC 2006*, Tu3.3.4 (2006).
- 27) K. Nakajima, T. Matsui, K. Kurokawa, K. Tajima and I. Sankawa: “High-speed and wideband transmission using dispersion-compensating/managing photonic crystal fiber and dispersion-shifted fiber,” *J. Lightwave Technol.*, **25** (2007) 2719-2726.
- 28) K. Nakajima, K. Kurokawa and K. Tajima: “640 Gbit/s DWDM transmission over PCF using orthogonal polarization channel allocation,” *ECOC 2007* (2007) P086.
- 29) T. Yamamoto, K. Kurokawa, K. Tajima and T. Kurashima: “160 Gbit/s OTDM transmission over 26 km PCF with demultiplexing technique employing phase modulation-based pump pulse generation,” *ECOC 2008* (2008) P.4.3.
- 30) K. Tsujikawa, K. Kurokawa, K. Tajima, K. Nakajima, T. Matsui, I. Sankawa and K. Shiraki: “Application of a prechirp technique to 10-Gb/s transmission at 1064 nm through 24 km of photonic crystal fiber,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **18** (2006) 2026-2028.
- 31) K. Kurokawa, K. Nakajima, K. Tsujikawa, K. Tajima, T. Matsui and I. Sankawa: “Penalty-free 40 Gb/s transmission in 1000 nm band over low loss PCF,” *OFC 2006*, OThH2 (2006).
- 32) K. Kurokawa, K. Tsujikawa, K. Tajima, K. Nakajima and I. Sankawa: “10 Gb/s WDM transmission at 1064 and 1550 nm over 24 km photonic crystal fiber with negative power penalties,” *IEICE Trans. Commun.*, **E90-B** (2007) 2803-2808.
- 33) K. Kurokawa, T. Yamamoto, K. Tajima, A. Aratake, K. Suzuki and T. Kurashima: “High capacity WDM transmission in 1.0 μm band over low loss PCF using supercontinuum source,” *OFC*

- 2008, OMH5 (2008).
- 34) K. Suzuki, H. Kubota, S. Kawanishi, M. Tanaka and M. Fujita: "High-speed bi-directional polarization division multiplexed optical transmission in ultra low-loss (1.3 dB/km) polarization maintaining photonic crystal fibre," *Electron. Lett.*, **37** (2001) 1399-1400.
 - 35) B. Zsigri, C. Peucheret, M. D. Nielsen and P. Jeppesen: "Transmission over 5.6 km large effective area and low-loss (1.7 dB/km) photonic crystal fibre," *Electron. Lett.*, **39** (2003) 796-798.
 - 36) C. Peucheret, B. Zsigri, P. A. Andersen, K. S. Berg, A. Tersigni, P. Jeppesen, K. P. Hansen and M. D. Nielsen: "40 Gbit/s transmission over photonic crystal fibre using mid-span spectral inversion in highly nonlinear photonic crystal fibre," *Electron. Lett.*, **39** (2003) 919-921.
 - 37) K. Nakajima, J. Zhou, K. Tajima, K. Kurokawa, C. Fukai and I. Sankawa: "Ultrawideband single-mode transmission performance in a low loss photonic crystal fiber," *J. Lightwave Technol.*, **23** (2005) 7-12.
 - 38) C. Fukai, K. Nakajima, J. Zhou, K. Tajima, K. Kurokawa and I. Sankawa: "Distributed Raman amplification based DWDM transmission in a low loss photonic crystal fibre," *ECOC 2004*, We1.3.6 (2004).
 - 39) K. Nakajima, C. Fukai, K. Kurokawa, K. Tajima, T. Matsui and I. Sankawa: "Raman amplification characteristics at 850 nm in a silica-based photonic crystal fiber," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **18** (2006) 451-453.
 - 40) Y. Oikawa, H. Hasegawa, K. Suzuki, Y. Inoue, T. Hirooka and M. Nakazawa: "4×10 Gb/s WDM transmission over a 5-km-long photonic crystal fiber in the 800-nm region," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **19** (2007) 613-615.
 - 41) H. Hasegawa, Y. Oikawa, T. Hirooka and M. Nakazawa: "40 Gbit/s-2 km photonic crystal fibre transmission with 850 nm singlemode VCSEL," *Electron. Lett.*, **43** (2007) 642-644.
 - 42) N. Yamamoto, Y. Omigawa, K. Akahane, T. Kawanishi and H. Sotobayashi: "Simultaneous 3×10 Gbps optical data transmission in 1-μm, C-, and L-wavebands over a single holey fiber using an ultra-broadband photonic transport system," *Opt. Express.*, **18** (2010) 4695-4700.
 - 43) T. Kato, M. Hirano, M. Onishi and M. Nishimura: "Ultra-low nonlinearity low-loss pure silica core fibre for long-haul WDM transmission," *Electron. Lett.*, **35** (1999) 1615-1617.
 - 44) K. Mukasa, K. Imamura, R. Sugizaki and T. Yagi: "Comparisons of merits on wide-band transmission systems between using extremely improved solid SMFs with A_{eff} of 160 μm² and loss of 0.175 dB/km and using large- A_{eff} holey fibers enabling transmission over 600 nm bandwidth," *OFC 2008*, OThR1 (2008).
 - 45) T. Matsui, K. Nakajima and C. Fukai: "Applicability of photonic crystal fiber with uniform air-hole structure to high-speed and wide-band transmission over conventional telecommunication bands," *J. Lightwave Technol.*, **27** (2009) 5410-5416.
 - 46) T. Matsui, T. Sakamoto, K. Tsujikawa and S. Tomita: "Single-mode photonic crystal fiber with low bending loss and $A_{\text{eff}} > 200 \mu\text{m}^2$ for ultra high-speed WDM transmission," *OFC 2010*, PDPA2 (2010).
 - 47) T. Matsui, T. Sakamoto, K. Tsujikawa, S. Tomita and M. Tsubokawa: "Single-mode photonic crystal fiber design with ultra large effective area and low bending loss for ultra-high-speed WDM transmission," *J. Lightwave Technol.*, (2011) to be published.
 - 48) R. Kashyap and K. Blow: "Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibers," *Electron. Lett.*, **24** (1988) 47-49.
 - 49) 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*, **112** (2003) 15-20.
 - 50) IEC Technical Report: "Optical amplifiers part 4: Maximum permissible optical power for the damage-free and safe use of optical amplifiers, including Raman amplifiers," IEC 61292-4 (2004).
 - 51) K. Takenaga, S. Tanigawa, S. Matsuo, M. Fujimaki and H. Tsuchiya: "Fiber fuse phenomenon in hole-assisted fibers," *ECOC 2008*, P.1.14 (2008).
 - 52) 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," *ECOC 2009*, P.1.12 (2009).
 - 53) 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.*, **28** (2010) 2115-2120.
 - 54) 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.*, **25** (2007) 1231-1237.
 - 55) 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 Photon. Technol. Lett.*, **16** (2004) 180-181.

(2011年1月11日受理)