

フォトリック結晶ファイバ

NTT アクセスネットワークサービスシステム研究所

田嶋 克介

Photonic crystal fibers

Katsusuke Tajima

NTT Access Network Service Systems Laboratories

1. はじめに

光通信における通信容量は WDM（波長多重）技術の急速な進歩によって、飛躍的に増大した。一方、インターネットの急速な普及により、ここ数年で通信容量が急激に増大した。この 21 世紀には通信容量がさらに飛躍的に増大することが予想される。この通信容量の増大に対応するためには伝送路としても大きな技術革新が必要となっている。

フォトリック結晶構造では、屈折率の異なる媒質が波長程度の大きさで周期的に配置されている¹⁾。フォトリック結晶ファイバ（PCF）は光ファイバ中に波長と同程度の大きさの空孔を周期的に配置した構造である。この空孔とガラスとの屈折率の大きな違いを利用して、光を PCF の中心部分に閉じ込めている。このため PCF では、従来の単一モード光ファイバでは実現できないようなさまざまな伝送特性を実現できる。

PCF は 1996 年に発表された²⁾。その後、数年の間に大きな技術進歩によりその特性は大き

く改善されている。これまでに、分散特性、伝送損失、曲げ特性、モード特性などの基本的な伝送特性については明らかになっている。本解説では、PCF についての基本的な特性、特徴および PCF の応用について紹介する。

2. Photonic crystal fiber の分類

光ファイバ中に多数の空孔を有する光ファイバを一般的に、ホーリーファイバという。Photonic Crystal 構造を光ファイバにおいて実現したことから Photonic Crystal Fiber という名前もよく使われる。

図 1 は空孔を有する光ファイバの分類を示す。空孔を有する光ファイバは導波原理から、全反射によりコア部に光が閉じ込められる場合とフォトリックバンドギャップ効果によってコア部に光が閉じ込められる場合の 2 つに分けられる。全反射型は、さらに 2 つのカテゴリーに分けられる。第 1 の例は、空孔アシスト型の光ファイバであり、少数の空孔がコアの近傍に付与されている。空孔がない場合には通常の光ファイバとなる。第 2 の例は一般的に PCF と呼ばれているものであり、多数の孔が周期的に配置され、中心部には孔が開いていない部分（欠陥）が存在する。空孔の存在しない場合に

〒305-0805 茨城県つくば市花畑 1-7-1
NTT アクセスサービスシステム研究所
TEL 029-868-6436
FAX 029-868-6440
E-mail: tajima@ansl.ntt.co.jp

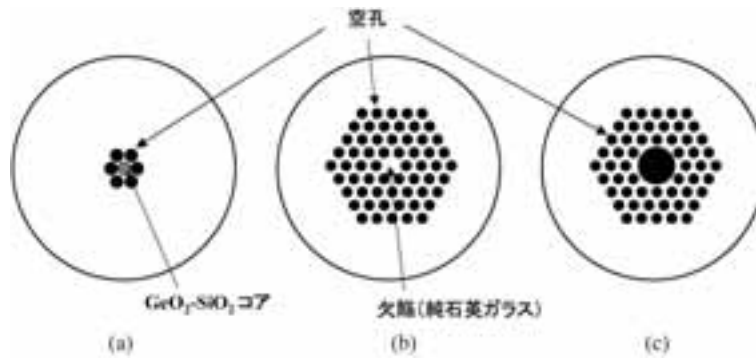


図1 空孔を有する光ファイバの分類。(a) 空孔アシスト型。従来ファイバのコア近傍に複数の空孔を配置した構造。(b) フォトニック結晶型。中心部に欠陥(純石英ガラスまたはドーパントを含んだ石英ガラス)を配置し、その周囲に複数の空孔を配置した構造。(c) フォトニックバンドギャップ型。中心部も空孔を配置。光は中心部の空孔に閉じ込められる。

は単なるガラスロッドになるため、光がファイバ軸方向に伝搬することはない。第3の例は、フォトニックバンドギャップファイバ (Photonic band gap fiber: PBF) と呼ばれるものである。空孔はフォトニックバンドギャップ効果を強調する構造に配置される。光はフォトニックバンドギャップの波長域ではブラッグ反射される。このため、中心部の空孔に光を閉じ込めることができる。

次にこのような空孔を有する光ファイバの製造方法を紹介する。

3. 製造方法

PCF または PBF を作成するためのガラス材料としては、シリカガラス、鉛ガラス、テルライトガラスなどがある。空孔部を有する光ファイバを作成するためには、一般的にはマルチキャピラリー法が用いられる。図2はマルチキャピラリー法による PCF の製造方法を示す。この方法では最初に単位セルとなる六角形のガラスパイプを作成する。一般的には、外径は 20~30 mm 程度、内径は 10~20 mm 程度である。孔の内面、外面は光の散乱を避けるために平坦である必要がある。次に、このパイプを直

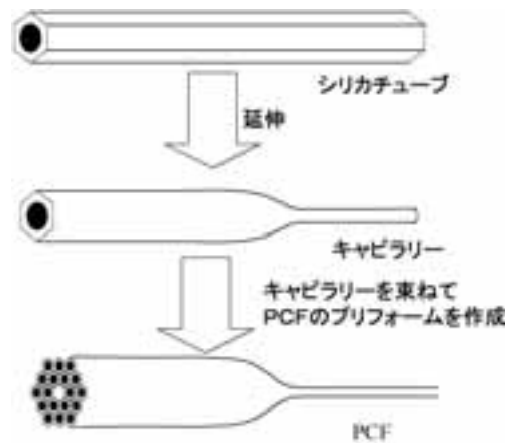


図2 マルチキャピラリー法。初めに、シリカチューブを延伸しキャピラリーを作成する。つぎに、キャピラリーを束ねてプリフォームを作成し、これを線引きして PCF を得る。

径 1 mm 程度に延伸する。その後、このパイプを数十から数百程度束ねて、PCF のもとになるプリフォームを作成する。光ファイバ中心部に欠陥すなわち孔がないロッドが配置された場合が PCF、パイプが配置された場合が PBF である。このように作成されたプリフォームは従来の光ファイバを線引きする場合と同様な方法で、光ファイバに線引きされる。

さて、PCF、PBF などを作成する場合にその

孔径, 孔間隔, 孔数などの構造パラメータを設計する必要がある。これらの構造パラメータは光ファイバの光学特性, 例えば分散, モードフィールド径, 遮断波長などと密接に関係している。次に, PCF の特徴を紹介する。

4. PCF の特徴

PCF には従来の単一モード光ファイバでは得られない興味深い光学特性がある。次にこれらの特性を紹介する。

4.1 広波長域単一モード動作

広波長域での単一モード動作は PCF の特徴の 1 つである。この単一モード動作は PCF のクラッドの等価屈折率の波長依存性によるものと考えることが出来る。PCF のモード数は次式で表される v 値で決まる。

$$v = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (1)$$

ここで, a はコア径であり, PCF の場合は, 孔間隔 A で近似できる。 n_{co} はコア部の屈折率であり, 純石英ガラスで構成されている PCF の場合には純石英ガラスの屈折率となる。 n_{cl} はクラッド部の等価屈折率である。

従来の単一モード光ファイバでは, 光ファイバのコア径, コア, クラッドの屈折率が決めれば(1)式で表される v 値は波長に反比例すると考えてよい。一方, PCF では v 値は, ある条件を満足すれば波長による影響を受けずに単一モードの条件を満足する。即ち, (1)式の n_{co} は純石英ガラスの屈折率であり波長依存性が小さいが, n_{cl} が大きな波長依存性を持つため, v 値の波長依存性が従来ファイバと大きく異なる。

例えば, 波長が短くなると光が空孔部へ進入しにくくなり, 光は孔の影響を受けなくなる。すなわち, クラッド部の屈折率はコア部の屈折率すなわち純石英ガラスの屈折率に近づく。このため, v 値は波長が短くなっても大きく変わることはない。一方, 波長が長くなると光は空孔部へ進入する。しかし, 屈折率の小さい空孔

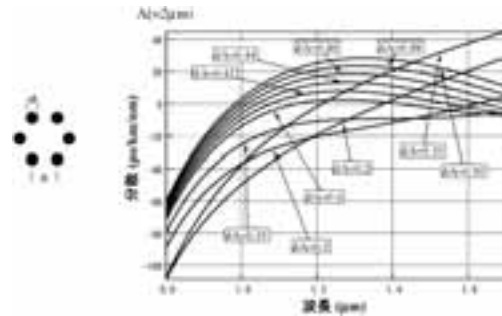


図3 PCF の分散特性。(a) $A (=2 \mu\text{m})$ を一定とし, 空孔と孔ピッチの比を変えた場合の PCF の分散特性。

の影響を受けてクラッド部の平均的な屈折率は小さくなるため, v 値自体は大きくならない。適当な孔径/孔間隔では, 広い波長域で v 値を 2.405 以下にすることが出来るため, 光通信に用いられる全波長域において単一モード動作が可能になる。

4.2 分散特性

PCF では空孔の存在により, 零分散波長を純石英ガラスの零分散波長 1270 nm よりも小さくすることができる。PCF では, 孔径, 孔間隔を適当に選ぶことにより零分散波長を 700 nm 以下の可視域にすることも出来る。

図3は PCF の零分散波長と構造パラメータとの関係を示す。ここで, d は孔径を A は孔間隔を表す。 d/A が大きくなると零分散波長は短くなる。例えば, $d/A=0.5$ の場合の零分散波長は 900 nm となる。このように, PCF では構造パラメータを適当な値に設定することにより, 従来の石英径光ファイバに比べて広い範囲で分散をコントロールできる。設計どおりの零分散波長を得るためには, 孔径, 孔間隔などの構造パラメータの高精度コントロールが必要になる。

4.3 光損失

PCF では光は屈折率が小さい空孔によってコア部に閉じ込められる。この閉じ込め効果が弱いと光はコア部から外に逃げ出すため, 閉じ

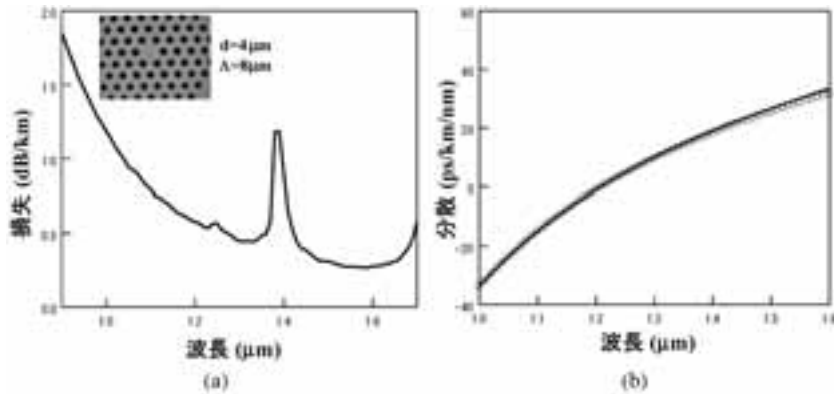


図4 これまで報告された、最も損失が低いPCFの損失および分散特性。(a) 損失波長特性。最低損失は波長1.55 μm で0.28 dB/km。孔径は4 μm 、孔間隔は8 μm 。(b) 分散特性。零分散波長は1.2 μm 。

込め損失³⁾が大きくなる。閉じ込め損失を低減するためには、孔の占める割合 (d/A) を大きくすること、波長に比べて大きな孔を配置することなどが必要である。閉じ込め損失は孔径、孔間隔を適当な値に選べば石英ガラスの固有損失0.14 dB/km (波長1.55 μm) に比べて無視できるほど小さく出来る。

固有損失以外の損失として考えられるのがPCF作成時の、空気中の不純物混入、孔内面の面粗さなどがある。これにより、散乱、および吸収損失が増加する。例えば、孔内面の面粗さが波長に比べて無視できなくなればレーリー散乱、ミー散乱損失を引き起こすことになる。また、孔径、孔間隔などがPCFの長手方向で変化すればいわゆる構造不正損失により損失が増加することになる。

残念ながら、現在のPCFではこのような外的要因による損失がまだ大きい。これらは、今後、更なる技術の改良で低損失化が期待できると考えている。損失が1 dB/km以下のPCFも最近では作成できるようになっている。図4に、低損失PCFの損失、分散特性を示す。懸案であったOH基吸収損失が従来のPCFに比べて数十分の1程度に低減されており、最低損失は0.28 dB/kmまで低減されている⁴⁾。さらなる技術の改良により現在の単一モード光

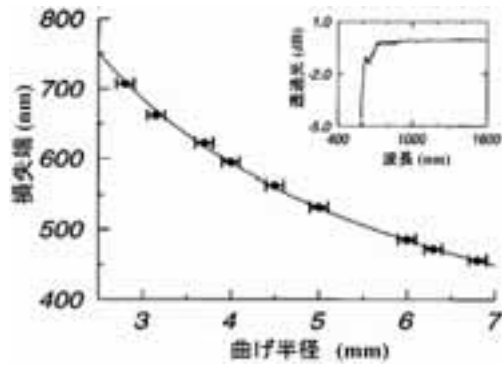


図5 PCFの曲げ損失特性。挿入図中の損失波長特性に示されているように、PCFでは短波長で曲げ損失が急激に大きくなる吸収端が観測される。また、図の吸収端と曲げ径との関係においては、曲げ径が大きくなると吸収端は短波長に、曲げ径が小さくなると吸収端は長波長に移動することを示している。

ファイバと同程度 (0.2 dB/km) のPCFも近い将来実現できると期待される。

4.4 曲げ損失特性

PCFでは、光がコア部に強く閉じ込められているため、曲げ損失が従来光ファイバよりも非常に小さい。曲げ損失は、コア部への光の閉じ込め状態によって決まるため、孔の大きさ、孔間隔、孔の数などによって決まる。

図5に曲げ半径と、損失端 (損失が3 dBと

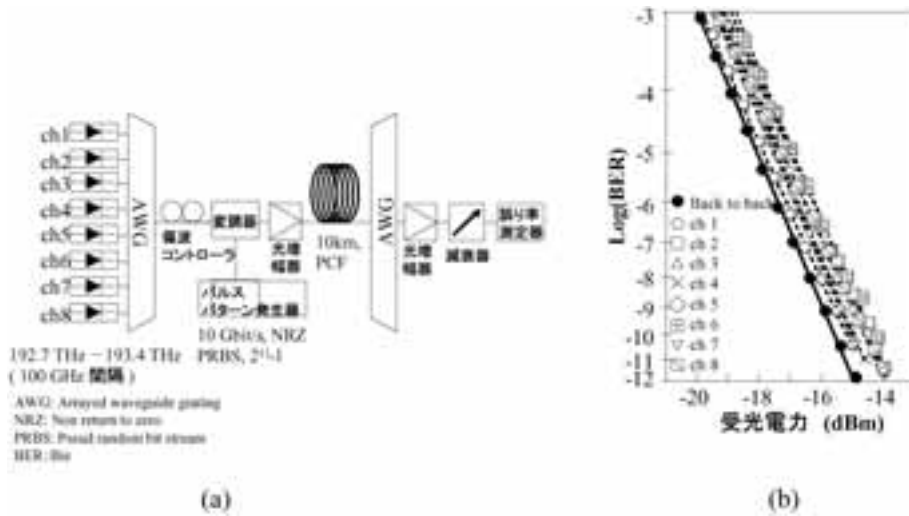


図6 PCFによるDense wavelength division multiplexing (DWDM) 伝送実験。(a) 損失0.38 dB/km (10 km) のPCFを用いたDWDM伝送実験系。波長1.5 μm帯で100 GHz間隔で8波多重させている。(b) PCF 10 km伝送後の符号誤り率の測定結果。全てのチャンネルで、信号が誤りなく伝送されていることが分かる。

なる波長)の関係を示す⁵⁾。同図には、また、曲げたPCFの損失波長特性を示している。損失が急激に増加する損失端が600 nm付近にあることが分かる。このようにして得られた損失端(λ)と曲げ半径(R)とは $\lambda = A/\sqrt{R}$ (Aは定数)の関係で表されることが分かる。

4.5 モードフィールド径

モードフィールド径、実効断面積などは、光通信における光非線形現象(四光子混合、誘導ラマン散乱、自己位相変調、相互位相変調など)と密接に関係する重要なパラメータである。

PCFではまず前節で説明した単一モード条件を満足するようにd/Aを決める必要がある。この条件を満足するようにAを大きくすればモードフィールド径(実効断面積)を大きくすることが出来る。このようにコア径を大きくすることによって、光のパワー密度を下げられるため、光非線形現象を避けることが可能になる。このような観点から、PCFが設計され、コア径15 μm (d=5 μm, A=10 μm)の低損失PCFが実現されている⁶⁾。

5. PCFの応用

PCFは伝送路としての利用が期待される他、さまざまな光ファイバデバイスとして利用されている。

5.1 伝送媒体

PCFは前述のように、広い波長域で単一モード動作が出来る、零分散波長を短波長(1 μm以下)にすることができるなど従来の石英系の光ファイバでは実現できない優れた特徴がある。このためPCFはWDM用光伝送路として適している。問題は、伝送損失が従来ファイバと比べて大きいこと、得られるファイバ長が数キロメートル程度と短いことなどである。しかし、現在では、損失0.28 dB/kmで光ファイバ長10 km程度のものも得られるようになっており、伝送路としての有効性も確認されている⁷⁾。図6に全長10 kmのPCFを用いた伝送実験の例を示す。

同図(a)は伝送実験系を示している。波長1.5 μm帯で100 GHz間隔で8波を多重している。この10 kmのPCF伝送後の符号誤り率を

同図(b)に示しており、PCFでも誤りなく信号を伝送できることが確認されている。現在、さらなる低損失化、長尺化、大容量化へ向けた研究が進められている。

5.2 偏波保持ファイバ

伝送速度が高速になると偏波の影響が無視できなくなり偏波を保持することが必要になる。PCFでは、コア部への光の閉じ込めが強く、孔の異方性、即ち屈折率の異方性が強調され大きなモード複屈折率が得られるため、偏波保持ファイバとしても期待されている。孔の大きさ、間隔をx, y方向で異なった値にすることによってモード複屈折率を大きくすることが出来る。図7に偏波保持PCFの断面構造を示す。中心部に大きな2つの空孔がある。モード複屈折率は 1.4×10^{-3} 、偏波クロストークは波長 $1.55 \mu\text{m}$ 、長さ1.5 kmで、 -22 dB という値が報告されている⁸⁾。

5.3 非線形現象への適用

PCFでは、空孔による光の閉じ込め効果が大きいため、空孔間隔を小さくすることにより、コア径を小さくし、光を狭い領域に閉じ込めることができる。そのため、光密度が大きくなり、四光子混合、誘導ラマン散乱、自己位相

変調などの非線形効果が効率的に観測することができる。また、大きな非線形係数を持った材料を用いることにより、非線形性を高めることが出来る。図8にこれまでに得られたもっとも非線形効果の大きいPCFの断面構造を示す。高屈折率、高非線形効果が期待できる鉛ガラスを用いており、非線形係数は波長 $1.55 \mu\text{m}$ で $640 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ の値が得られている⁹⁾。

PCFの非線形性効果の適用例として、スーパーコンティニューム光の発生がある。図9

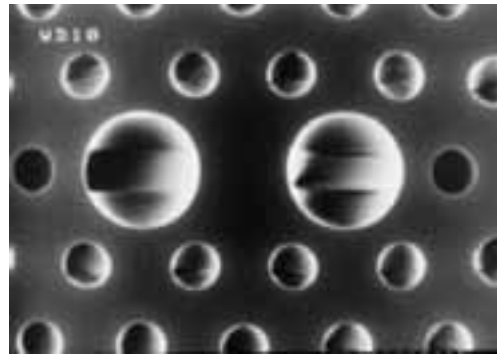


図7 偏波保持PCFの一例。中心部に大きな2つの空孔がある。モード複屈折率は 1.4×10^{-3} 、偏波クロストークは波長 $1.55 \mu\text{m}$ 、長さ1.5 kmで、 -22 dB 。

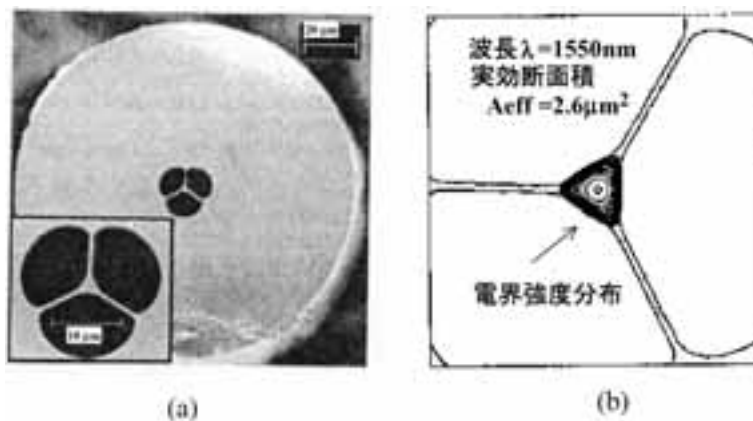


図8 高非線形PCF。(a) 高非線形PCFの断面図。鉛ガラスを用いて、押し出し法で作成されている。(b) コア近傍の電界強度。中心のコア部に光が強く閉じ込められている。この光ファイバの非線形係数は波長 $1.55 \mu\text{m}$ で $640 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 。

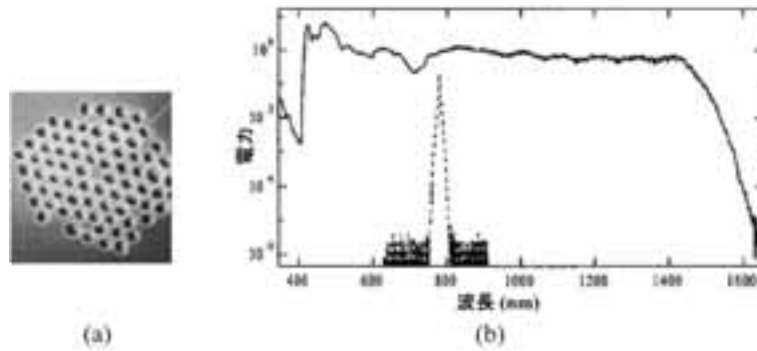
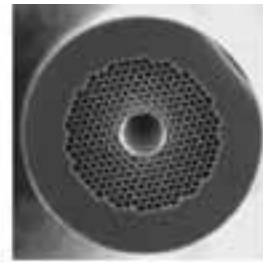
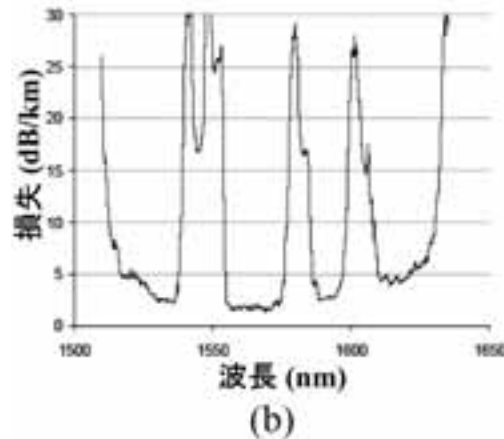


図9 PCFによるスーパーコンティニューム光の発生。(a) スーパーコンティニューム発生用のPCF。コア径は $1.7\ \mu\text{m}$ 、孔径は $1.3\ \mu\text{m}$ 、零分散波長 $767\ \text{nm}$ 。(b) 75 cmのPCFにより発生した光のスペクトル。点線はスーパーコンティニューム光発生に用いた100 fsのパルス。

(a)にスーパーコンティニューム発生用のPCFの形状を示している。コア径は $1.7\ \mu\text{m}$ 、孔径は $1.3\ \mu\text{m}$ 、零分散波長 $767\ \text{nm}$ である。同図(b)には75 cmのPCFにより発生した光のスペクトルを、点線はスーパーコンティニューム光発生に用いた100 fsのパルスを示している。光源は、Ti：サファイアレーザを用いている¹⁰⁾。



(a)



(b)

図10 これまでで最も低損失のPBF。(a) PBF断面図。中心部に大きな空孔が設けられている。孔径は(b) 損失波長特性。最低損失は波長 $1565\ \text{nm}$ で、 $1.72\ \text{dB/km}$ 、全長は800 m。

6. フォトニックバンドギャップファイバ

フォトニックバンドギャップファイバは、2次元の周期構造を有しており、構造により決定される波長域ではいわゆるブラッグ反射によって光をコア部に閉じ込めることができる。コアが空孔であっても、その空孔部に光を閉じ込めることができるため、これまでの石英ガラスを用いた光ファイバよりも、低損失、低非線形効果などが期待される。

図10はこれまでに得られた最も損失の低いPBFの構造、および損失特性である¹¹⁾。この光ファイバでは、コア部の空孔断面積を大きくすることにより、構造不完全性損失を低減させて、低損失を実現させている。光ファイバ長は800 mであり、以前のPBF(100 m)に比べて大幅に長尺化されている。最低損失は波長

1565 nm で、1.72 dB/km とこれまでの PBF に比べて約 10 分の 1 程度に低減されている。しかし、得られる光ファイバ長は 1 km 程度と短いこと、損失がまだ大きいことなど問題点はまだ多く残されている。

7. 最後 に

光ファイバ中に空孔を用いた光ファイバはこれまでの光ファイバでは実現できない数々の優れた特徴を持っている。伝送媒体としては、PCF は広帯域性が期待できることから超大容量光ファイバとして、PBF は、超低損失光ファイバとして非常に魅力的である。また、非線形効果を用いた光源、増幅器など光ファイバ部品としても今後の発展が期待される。

参考文献

- 1) E. Yablonovitch: *Phys. Rev. Lett.*, **58**, 2059, (1987).
- 2) J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell and D. M. Atkin: *Opt. Lett.* **21**, 1547, (1996).
- 3) T. P. White, R. C. McPhedran and C. M. de Sterke: *Optic. Lett.* **26**, 1660, (2001).
- 4) K. Tajima, J. Zhou, K. Kurokawa and K. Nakajima: *Eur. Conf. Optical Communication* 2003, Rimini, Post dead line paper, PD1.6, (2003).
- 5) T. A. Birks, J. C. Knight and P. St. J. Russell: *Optics Lett.* **22**, 961, (1997).
- 6) M. D. Nielsen, A. Petersson, C. Jacobsen, H. R. Simonsen, G. Vienne, A. Bjarklev: *Proc. Eur. Conf. Optical Communication* 2002, Copenhagen, 3.4.2, (2002).
- 7) K. Tajima, J. Zhou, K. Nakajima and K. Sato: *Optical Fiber Communication Conference (OFC)* 2003, Atlanta, Post dead line paper, PD01, (2003).
- 8) K. Suzuki, H. Kubota, S. Kawanishi, M. Tanaka and M. Fujita: *Electron. Lett.* **37**, 712, (2001).
- 9) T. M. Monro, K. M. Kiang, J. H. Lee, K. Frampton, Z. Yusoff, R. Moore, J. Tucknott, D. W. Hewak, H. N. Rutt, D. J. Richardson: *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC)* 2002, Anaheim, Post Dead line paper, PDF A1, 2002.
- 10) J. K. Ranka, R. S. Windeler and A. J. Stentz: *Optics Lett.* **25**, 25, (2000).
- 11) B. J. Mangan, L. Farr, A. Langford, P. J. Roberts, D. P. Williams, F. Couny, M. Lawman, M. Mason, S. Coupland, R. Flea and H. Sabert, T. A. Birks, J. C. Knight, P. St. J. Russell: *Optical Fiber Communication Conference (OFC)* 2004, Los Angeles, Post dead line paper, PD24, (2004).