

# キャピラリコアを有する拡張三角格子フォトニックバンドギャップファイバ

光電子技術研究所

竹永勝宏<sup>1</sup>・官  
姫野邦治<sup>4</sup>

寧<sup>2</sup>・後藤龍一郎<sup>1</sup>・松尾昌一郎<sup>3</sup>

## Photonic Bandgap Fiber with Extended Triangular Lattice and Capillary Core

K. Takenaga, N. Guan, R. Goto, S. Matsuo & K. Himeno

近年、フォトニック結晶ファイバあるいは、ホーリーファイバと呼ばれる、長手方向に空孔を有する光ファイバが従来の光ファイバでは得られない特性が実現できるとして注目を集めている。今回われわれは、この中でフォトニックバンドギャップファイバに注目し、広帯域化、表面モード抑制という2つの課題を達成するために、キャピラリコアと拡張三角格子クラッドを持つ、新しいフォトニックバンドギャップファイバを提案した。計算により、提案するファイバは広い波長範囲にバンドギャップを持ち、表面モードが存在しないことを確認した。また、実際にファイバを試作し、1,520 nm ~ 2,100 nmの広い範囲で透過を確認した。

Recently photonic crystal fibers or holey fibers, which possess holes in longitudinal direction, have attracted much attention because of their unusual characteristics that are not available for conventional fibers. In this article, we propose a novel photonic bandgap fiber, which composed of an extended triangular lattice cladding and a capillary core. A numerical simulation shows that the fiber potentially has wide bandgaps without interface modes. A manufactured fiber exhibits a transmission range from 1,520nm to 2,100nm.

### 1. ま え が き

近年、フォトニック結晶ファイバ (Photonic Crystal Fiber, 以下PCFと記す) あるいは、ホーリーファイバと呼ばれるレンコンのように長手方向に空孔を有する光ファイバが、基礎研究だけでなく、実用の面からも大変注目を集めている。このファイバは、空孔配置の設計により従来構造の光ファイバでは得られない、低曲げ損失、高複屈折、広波長域シングルモード動作、高NAおよびハイパワー伝送など様々な特性が実現できるため、幅広い応用が期待されている。われわれは、これらの特異な特性に注目し、これまで表1に示すようないくつかのPCFを設計、試作してきた<sup>1)~5)</sup>。PCFの構造は、光を閉じ込める原理の違いから、表2に示すように二種類に大別される。一つは、屈折率導波型と呼ばれ、中心部周辺に空孔を配置し、等価的に屈折率を下げることにより、従来の光ファイバと同様に、全反射により光を閉じ込めるファイバである。もう一つは、フォトニックバンドギャップ型と呼ばれ、コアの周

りに周期的に配置された空孔のブラッグ反射によって光を閉じ込めるファイバである。後者のフォトニックバンドギャップファイバ (Photonic Bandgap Fiber, 以下PBGFと記す) は、光をクラッドよりも屈折率の低い、空気コアの中に閉じ込めることができ、広い波長帯域において低非線形性および低伝送損失が期待されている。通常の三角格子型PBGFはすでに波長1,620 nmで1.2 dB/kmの伝送損失を達成している<sup>6)</sup>。しかしながら、その動作波長帯域はコアとクラッドの境界付近にパワーが集中する表面モードの存在によって制限されるという問題が知られている<sup>7)</sup>。通常の三角格子型PBGFにおいて、表面モードを避けるための構造も提案されているが<sup>8)</sup>、コアの形成が難しい構造となっている。一方、石英コア<sup>9)</sup>や変形コア<sup>10)</sup>を用いて動作波長領域の拡大をはかったPBGFも提案されているが、空気コアのメリットが損なわれてしまう。

そこで、われわれは表面モードを抑制し、動作波長域の拡大が可能な構造として、キャピラリコアを持つ拡張三角格子 (Extended Triangular Lattice, 以下ETLと記す) PBGFの検討を行ったので報告する。

### 2. ファイバの構造

ETLの周期構造とユニットセルを図1に示す。ユニット

1 光技術研究部

2 光技術研究部 (工博)

3 光技術研究部グループ長

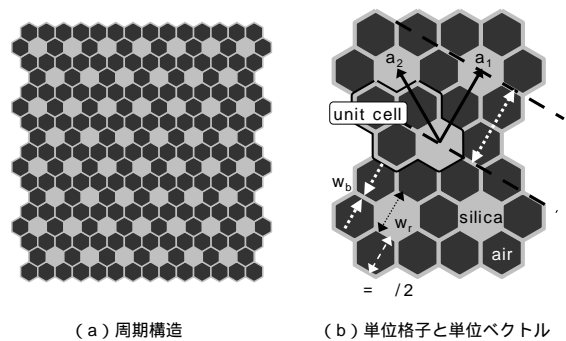
4 光技術研究部長

表1 いろいろなフォトニック結晶ファイバ  
Table 1. Various type of photonic crystal fibers.

導波原理 特徴	屈折率導波型			フォトニックバンドギャップ型		
	低曲げ損失	高複屈折	超広帯域SM動作	高NA	エアコア	キャピラリコア
応用	宅内・構内配線	センサ用偏波保持ファイバ	超広帯域WDM伝送用	ファイバレーザ用ダブルクラッドファイバ	紫外・赤外伝送 ハイパワー伝送	広帯域伝送
断面写真						

表2 フォトニック結晶ファイバの分類  
Table 2. Type of photonic crystal fibers.

分類	屈折率導波型	フォトニックバンドギャップ型
典型的な構造の断面図		
導波原理	全反射	ブラッグ反射
特徴	コア: 透明材料 クラッド: 透明材料と空孔	コア: 透明材料または空気 クラッド: 周期的空孔配列



(a) 周期構造 (b) 単位格子と単位ベクトル

図1 拡張三角格子

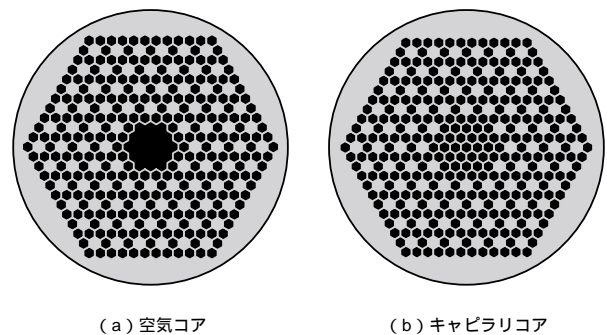
Fig. 1. Extended triangular lattice: (a) periodical structure. (b) unit cell and primitive lattice vectors.

セルは石英ロッド一つとキャピラリ三つからなり、格子ベクトルの長さは  $a = 2r$  である。ただし、 $r$  は隣接空孔ピッチである。また、 $W_r$  と  $W_b$  はそれぞれ石英ロッド径とキャピラリの壁厚を表している。

ETLに格子欠陥を導入するには、通常三角格子と同様に図2 (a) のようにコア中心付近の石英を除く方法（空気コア）と、今回われわれの提案する、(b) のように石英ロッドをキャピラリで置き換える方法（キャピラリコア）を用いることができる。キャピラリコアによる格子欠陥の導入は、クラッドが超格子構造のときのみ可能である。いずれの場合においても、コア領域とクラッド領域の境界は図3 (a) のようにキャピラリの上に存在し、石英ロッド上に局在する超格子のバルクモードと接していないため、表面モードを避けることができると考えられる<sup>11)</sup>。比較のため、図3 (b) に通常三角格子におけるバルクモードとコア領域とクラッド領域の境界を示す。こちらは、バルクモードと境界の重なりが大きく、表面モードが避けられないことがわかる。

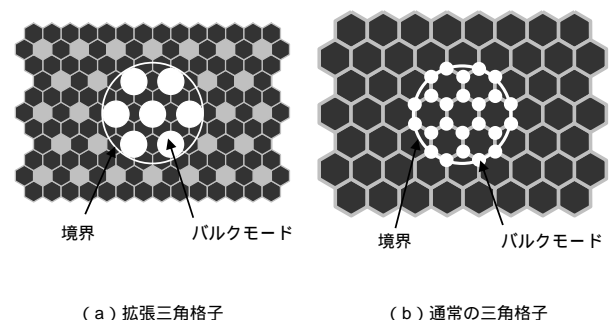
### 3. バンドギャップ構造および欠陥モード

図4は  $W_r / a = 0.7$ 、 $W_b / a = 0.1$  とし、平面波展開法<sup>12)</sup> を用いて計算したETLのバンド構造を表す。図中において、横軸と縦軸はそれぞれ規格化した波数と周波数を表し、斜線領域はバンドギャップを表す。空気コアPBGFの場合、伝搬モードはクラッド構造のバンドギャップと空気分散



(a) 空気コア (b) キャピラリコア

図2 拡張三角格子フォトニックバンドギャップファイバ  
Fig. 2. Configuration of ETL-PBGFs with (a) air core, (b) capillary core.



(a) 拡張三角格子 (b) 通常の三角格子

図3 コアとクラッド境界とバルクモードの位置関係  
Fig. 3. Figure of bulk mode of periodical structure and boundary between core and cladding.

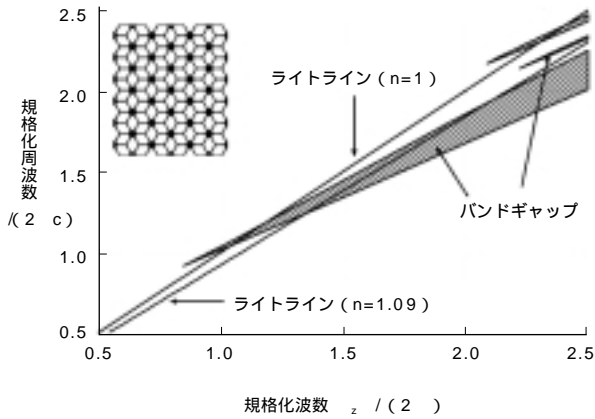


図4 拡張三角格子のバンド構造  
Fig. 4. Band structure of ETL.

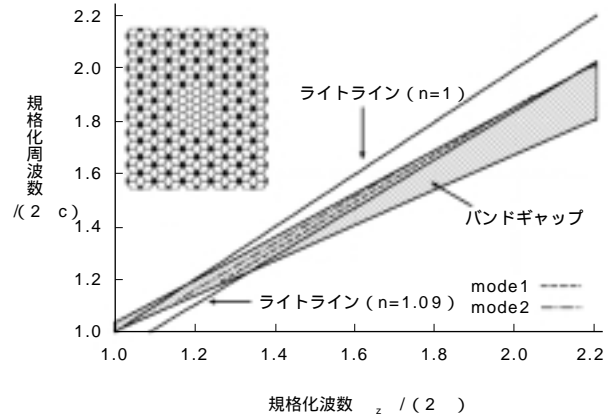


図5 キャピラリコアファイバのバンド構造  
Fig. 5. Band structure of ETL-PBGFs with capillary core.

曲線であるライトライン ( $n=1$ ) により囲まれた領域に存在する。それに対し、キャピラリコアPBGFの場合、伝搬モードはクラッド構造のバンドギャップとキャピラリコアの分散曲線で囲まれた領域に存在する。つまりコア領域に若干の石英が存在するため、ライトラインは誘電体内を伝搬するものに置き換えなければならない。図4の $n=1.09$ のライトラインは、キャピラリコアの平均屈折率に対応するものである。コアをキャピラリで構成することにより、ライトラインの傾斜が小さくなるため、空気コアの場合より透過帯域を拡大可能であることがわかる。

図4と同じ寸法パラメータを有するキャピラリコアPBGFについて伝搬モードを計算した結果を図5に示す。この場合、複数の伝搬モードグループはバンドギャップ内で $n=1.09$ のライトラインの上の領域に存在することがわかる。また、基本モード、高次モードのパワー分布をそれぞれ、図6(a),(b)に示す。この計算において、表面モードは計算されなかった。

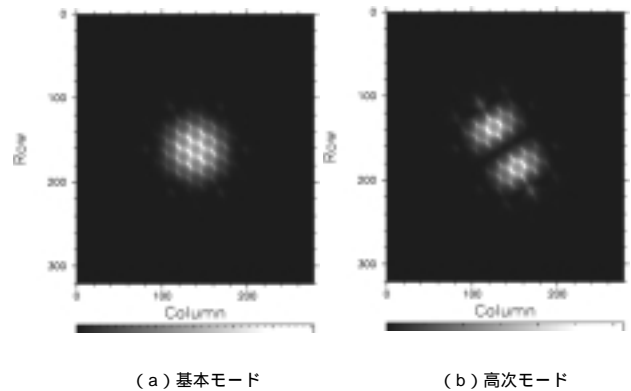


図6 キャピラリコアファイバの伝搬モードのパワー分布  
Fig. 6. Power distribution: (a) fundamental core mode. (b) second order core mode.

#### 4. キャピラリコアPBGFの試作結果

試作したキャピラリコアPBGFの評価結果を以下に示す。図7にはそのSEM写真を示す。ファイバ径は、 $125\mu\text{m}$ で、 $W_b, W_r$ はそれぞれ $1.5\mu\text{m}, 1.05\mu\text{m}$  ( $W_r/W_b = 0.7, W_b/\lambda = 0.1$ )であった。すべての空孔が同じ大きさを有し、コアが自己支持構造になっているため、ファイバは比較的容易に作製でき、空孔構造の周期性が良く保たれている。図8にファイバの透過スペクトルを示す。ここには計算によって得られた透過帯域を灰色のバーで示している。光源の都合上、測定データは $2,100\text{nm}$ までしか得られなかったが、長さ $1\text{m}$ のファイバでは、 $1,520\text{nm}$ から $2,100\text{nm}$ までの透過帯域が確認された。計算結果はさらに、長波長に透過帯域が存在していることを示している。 $1,900\text{nm}$ 付近の落ち込みはファイバ内に残存するOH基の吸収によるものと考えられる<sup>13)</sup>。一方、長さ $11\text{m}$ のファイ

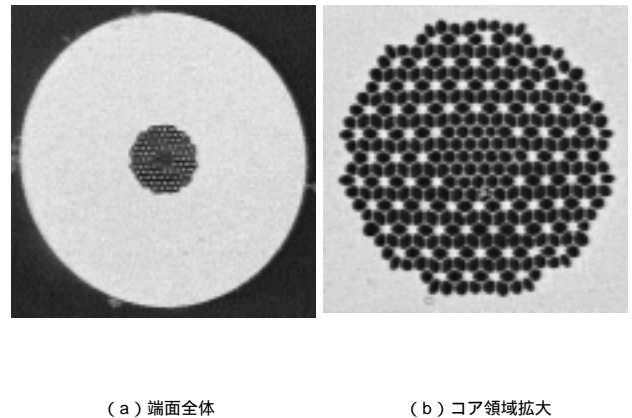


図7 試作ファイバの断面のSEM写真  
Fig. 7. SEM picture of manufactured ETL-PBGF: (a) entire fiber end face. (b) entire microstructure.

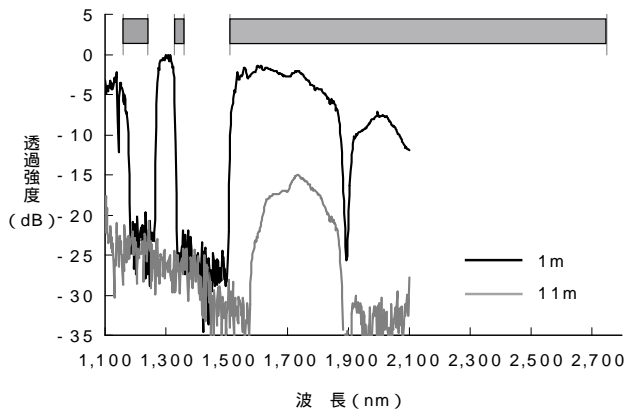


図8 試作ファイバの透過特性

Fig. 8. Transmission spectra for fibers of 1m long and 11m long.

バでは、透過帯域が1mに比べ狭くなっている。この原因の一つとして、長手方向の構造不均一性が考えられる。また、最低損失は1,750 nm付近で1.3 dB/mであった。この損失の原因の一つとして、周期構造の層数不足が考えられる<sup>14)</sup>。さらなる低損失のためには、作製方法の改善、および周期構造の層数の増加が必要であると考えている。

## 5.むすび

キャピラリコアを有する拡張三角格子フォトニックバンドギャップファイバを提案し、表面モードが避けられること、非常に広い伝送帯域を持つことを計算により確認した。また、キャピラリコアを有する拡張三角格子フォトニックバンドギャップファイバを試作し、1,520 nmから2,100 nmまでの波長範囲で導波することを確認した。

## 参考文献

- 1) N. Guan, K. Izoe, K. Takenaga, R. Suzuki and K. Himeno : Hole-Assisted Single-Mode Fibers for Low Bending Loss, ECOC2004, Mo3.3.5, 2005
- 2) N. Guan, K. Takenaga, K. Izoe, R. Suzuki and K. Himeno : Highly Birefringent Photonic Crystal Fiber for a Wide Wavelength Range, ECOC2004, Mo4.3.4, 2005
- 3) N. Guan, K. Takenaga, T. Hamada and K. Himeno : Holey

Fibers with Ultra High NA, OECC2005, 5D1-3, 2005

- 4) K. Takenaga, N. Guan, T. Hamada and K. Himeno : A Trial of Air-Core Photonic Bandgap Fibers, OECC2005, 5D1-5, 2005
- 5) K. Takenaga, N. Guan, R. Goto, S. Matsuo and K. Himeno: A New Photonic Bandgap Fibre with Extended Triangular Lattice and Capillary Core, ECOC2005, Tu1.4.2, 2005
- 6) P. J. Roberts, F. Couny, H. Sabert, B. J. Mangan, D. P. Williams, L. Farr, M. W. Mason and A. Tomlinson : Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres, Opt. Express, Vol.13, No.1, pp.236-244, January 2005
- 7) D. C. Allan, N. F. Borrelli, M. T. Gallagher, D. Muller, C. M. Smith, N. Venkataraman, J. A. West, P. Zhang and K. W. Koch : Surface modes and loss in air-core photonic band-gap fibers, SPIE, Vol.5000, pp.161-174, 2003
- 8) J. A. West, C. M. Smith, N. F. Borrelli, D. C. Allan and K. W. Koch : Surface modes in air-core photonic band-gap fibers, Opt. Express, Vol.12, No.8, pp.1485-1496, April 2004
- 9) F. Luan, A. K. George, T. D. Hedley, G. J. Pearce, D. M. Bird, J. C. Knight and P. St. J. Russell : ALL-solid photonic bandgap fiber, Opt. Lett., Vol.29, No.20, pp.2369-2371, October 2004
- 10) M. Yan, X. Yu, P. Shum, C. Lu and Y. Zhu : Honeycomb Photonic Bandgap Fiber with a Modified Core Design, Photon. Technol. Lett., Vol.16, No.9, pp. 2051-2053, September 2004
- 11) H. K. Kim, J. Shin, S. Fan, M. J. F. Digonnet and G. S. Kino : Designing Air-Core Photonic-Bandgap Fibers Free of Surface Modes, IEEE J. Quant. Electron., Vol.40, No.5, pp.551-556, May 2004
- 12) S. G. Johnson and J. D. Joannopoulos : Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis, Opt. Express, Vol.8, No.3, pp.173-190, January 2001
- 13) P. Kaiser, A.R. Tynes, H. W. Astle, A. D. Pearson, W. G. French, R. E. Jaeger and A. H. Cherin : Spectral losses of unclad vitreous silica and soda-lime-silicate fibers, JOSA, Vol.63, No.9, pp.1141-1148, September 1973
- 14) M. Yan, P. Shum : Leakage Loss of Air-guideing Honeycomb Photonic Bandgap Fiber, Technical Digest of OFC/NFOEC2005, OME1, 2005