

レンコン状の穴が新機能を生み出す

レンコンのように穴のあいた光ファイバーをご存じでしょうか？これはフォトニック結晶ファイバー(PCF: photonic crystal fiber)とよばれる光ファイバーであり、最近注目されています。穴の大きさ、穴の間隔が変わることによって今までにない面白い機能が生まれるのが特徴です。PCFの特徴、各種応用、作製法について紹介します。

#### フォトニック結晶ファイバー(PCF)の特徴

図1に通常の光ファイバーとフォトニック結晶ファイバーの構造を模式的に示します。通常の光ファイバーは屈折率の高いコア部とそれよりも屈折率の低いクラッド部からなっており、コアに光を閉じ込めて導波する構造になっています。フォトニック結晶ファイバーには2種類あり、1つはファイバーのコア部にガラスを用いてクラッド部に周期的に空孔を設ける構造であり、屈折率導波型フォトニック結晶ファイバー(index-guiding PCF)とよばれるものです。もう1つは、二次元方向の周期構造によって空気コア部に光を閉じ込めて導波させるフォトニックバンドギャップファイバー(PBF: photonic bandgap fiber)です。ここでは、前者のPCFを紹介します。

PCFはクラッドの等価屈折率を、空孔(屈折率 $n=1$ )とガラス(屈折率 $n=1.45$ )との構成具合により変化させて、ガラスコアの屈折率より下げてコアに光を閉じ込めて導波させています。従来の光フ

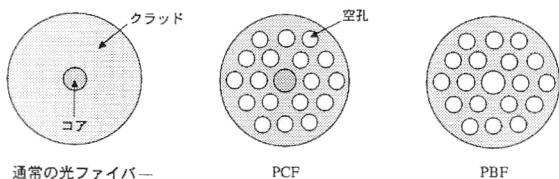


図1 フォトニック結晶ファイバーの構造の違い。

アイバーの構造でコアの屈折率とクラッドの屈折率の差 $\Delta$ が小さい( $\Delta \sim 0.2\%$ )弱い導波構造(weakly guiding structure)に対して、PCFは $\Delta \sim 10$ 数%と強い導波構造(strongly guiding structure)になっています。このため構造分散が非常に大きくなり、光ファイバーのゼロ分散が幅広く変化する特徴があります。

図2に空孔に関する充填比率 $d/\Lambda$ ( $d$ は空孔の直径、 $\Lambda$ は空孔間の距離)が0.7の場合のPCFの大きな異常分散である構造分散(structural dispersion)と短波長で大きな正常分散である材料分散(material dispersion)とその和の全分散を定性的に示します<sup>1)</sup>。ゼロ分散波長が大きな構造分散により近赤外までシフトし、非常に広い波長範囲で光速度が一定の状態が実現できる様子がわかると思います。

#### PCFによるスーパー・コンティニュウム光の発生

PCFの応用の代表的なものとしてスーパー・コンティニュウム光発生の報告がなされています<sup>2,3)</sup>。Rankaらは、図3のようなコア-クラッド構造をもつPCFにより、可視光域で異常分散が実現できることを用いてスーパー・コンティニュウム光発生の最

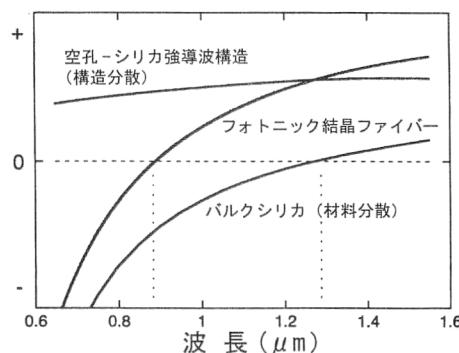


図2 フォトニック結晶ファイバーの群速度分散。

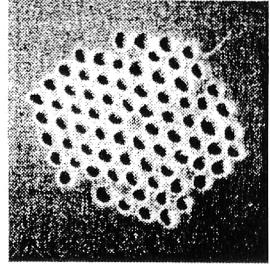


図3 フォトニック結晶ファイバーのコア-クラッド構造。

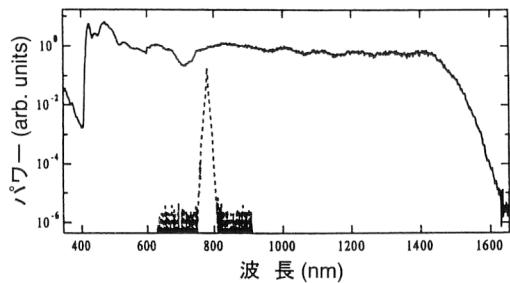


図4 フォトニック結晶ファイバーによるスーパー・コンティニュウム光発生。

初の報告をしています<sup>2)</sup>。彼らは、ゼロ分散域を760 nmにシフトさせ、 $2 \mu\text{m}$ とコアサイズを小さくし、非線形光学効果を起こしやすくしました。75 cmのPCFに中心波長790 nm、光パワー800 pJの100 fsパルスを入射することで、図4のように390~1600 nmという非常に広帯域なスーパー・コンティニュウム光発生を確認しています。自己位相変調とラマン散乱の効果を組み合わせることにより、広帯域でフラットなスペクトルが得られています。

### PCFの光通信への応用

$d/\Lambda$ の3つの分類、小(0.1~0.3)、中(0.3~0.5)、大(0.5~0.8)に対するPCFの群速度分散(GVD: group velocity dispersion)の変化の様子および各種光通信との関係は図5のようになっています。小の  $d/\Lambda$ をもつPCFは広帯域分散フラット特性によ

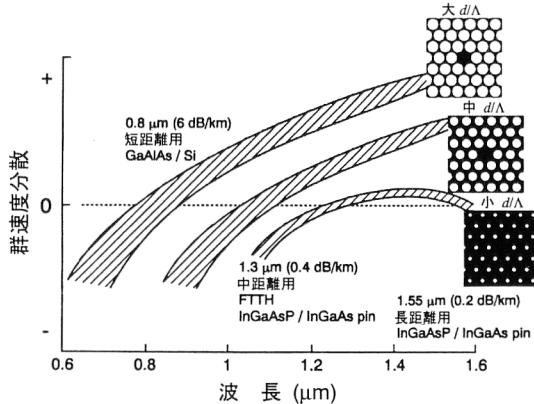


図5 フォトニック結晶ファイバーの群速度分散の変化の様子および各種光通信技術との関係。

り波長域1.3~1.5  $\mu\text{m}$ 帯の広帯域光通信に、中の  $d/\Lambda$ は波長1  $\mu\text{m}$ 帯の高速光通信、さらに大の  $d/\Lambda$ は0.8  $\mu\text{m}$ 帯の高速光通信への応用が期待できます。従来の光ファイバーでは1.28  $\mu\text{m}$ より短波長でのゼロ分散は実現できませんでしたが、PCFは短波長帯での高速光通信、特にGaAlAs/Si領域での安価で高速な光通信が期待できます。

### PCFの作製

PCFの作製法として現在主流となっているキャピラリー法を紹介します。まず、図6のようにキャピラリーとなる無水石英管(silica tube)を~500  $\mu\text{m}$ 程度に線引きします。それを20~30 mmの内径を有するジャケット管内に束ねます。ここで、ぎっしりとなるべく隙間のないように束ねると六方最密構造状になります。束ねた後でコアとなる中心の部分のキャピラリー管を1本抜き出し、その代わりに無水の石英ロッド(silica rod)を挿入して、PCFプリフォームとして完成させます。そしてそのプリフォームの線引きを行って、PCFが出来上がります。プリフォームの大きさにもよりますが、

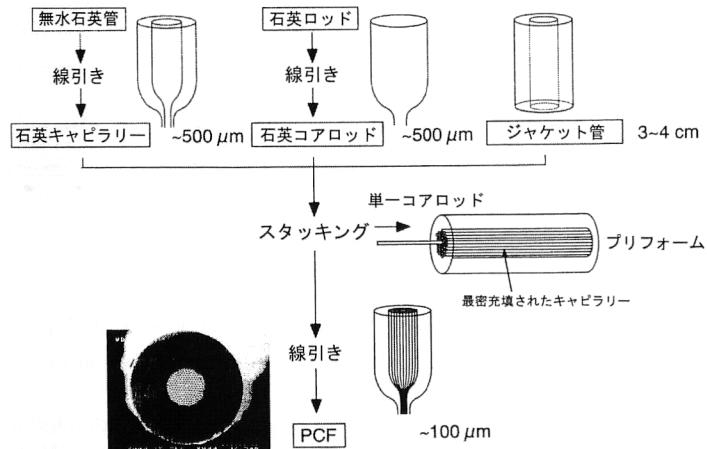


図6 キャビラリー法によるフォトニック結晶ファイバーの作製方法。

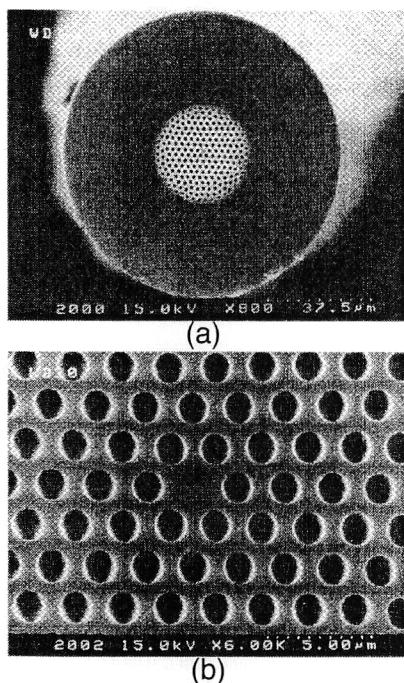


図7 キャビラリー法により作製したフォトニック結晶ファイバーの断面のSEM写真。

1回の線引きで数kmのPCFが容易に作製できます。

キャビラリー法により作製したPCFの断面のSEM写真を図7に示します。図7(a)は全体を図7(b)はコア部を拡大して示しています。キャビラリー間の空隙が消失して、大変きれいなPCFが作製できていることがわかると思います。

この記事に関するお問い合わせはkato@optsun.riken.go.jpもしくはtanida@ist.osaka-u.ac.jpまでお寄せください。

(NTT未来ねっと研究所・乾 哲郎)

#### 文 献

- 1) 川上彰二郎監修：フォトニック結晶技術とその応用（シーエムシー出版，2001）pp. 91-117.
- 2) J. K. Ranka, R. S. Windeler and A. J. Stentz: "Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm," Opt. Lett., **25** (2000) 25-27.
- 3) S. Coen, A. H. L. Chau, R. Leonhardt, J. D. Harvey, J. C. Knight, W. J. Wadsworth and P. S. J. Russell: "White-light supercontinuum generation with 60-ps pump pulses in a photonic crystal fiber," Opt. Lett., **26** (2001) 1356-1358.