

エアクラッドフォトニック結晶ファイバーの エンドシーリング加工

植田研究室 山城 知晃

1. 序論

近年フォトニック結晶ファイバーと呼ばれる周期的に空孔を配置したファイバーが研究されている。石英ガラスと空気の大きな屈折率差より通常のファイバーでは実現できなかったコアとクラッドの屈折率差や非線形光学効果の抑制など従来のファイバーとは異なり優れた特性が得られている。しかしファイバーの端面よりごみや液体が空孔内に侵入すると屈折率が変化し特性が失われるという短所がある。またファイバーの端面は研磨が必要不可欠であり、研磨時に水を使用する為フォトニック結晶ファイバーでは研磨が不可能である。この問題を解決する方法としてファイバー端面近くの空孔をふさぐことによって水の浸入を防ぐエンドシール加工がある。本研究ではこのエンドシール加工技術の構築とその評価を目的とした。

2. 原理と作成方法

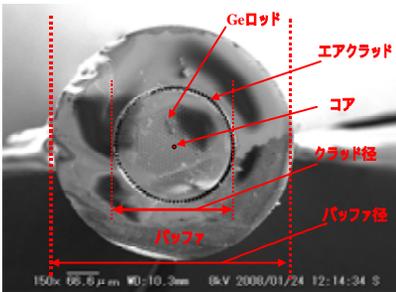


図 2.1 PBGF の端面

本研究では図 2.1 のようなフォトニックバンドギャップ型のフォトニック結晶ファイバー(PBGF)を用いた。中心のコアの周りに六角形のバンドギャップ構造があり、その外側を隣接した空孔からなるエアクラッドが取り囲んでいる。今回はこのエアクラッドをファイバーの側面より加熱し、ガラスの表面張力を利用してつぶす方法を取ったので、空孔における表面張力と気圧のつりあい式を導出した。空孔の直径 $d[m]$ 、気圧 $P[pa]$ 、表面張力 $\gamma[N/m]$ とすると

$$P = \frac{4\gamma}{d}$$

と表される。空孔がつぶれるには右辺の表面張力の方が大きい状態になればよい。今回用いた PBGF の空孔の直径 $10\mu m$ であったので、大気圧下での空孔がつぶれる表面張力の条件を求めると

$$\gamma > 253[dyn/cm]$$

となる。ガラスの表面張力対温度特性が図 2.2 であり、800 付近より上であれば空孔がつぶれるということが分かる。しかしこの温度では図 2.3 の粘度対温度特性をみると分かるように極端に粘性が高く変形しない。変形を始めるのは軟化点の 1600 付近である。よって本研究では 1600 にファイバーを加熱した。

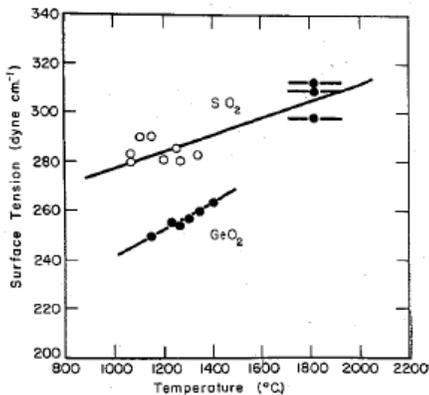


図 2.2 表面張力対温度特性

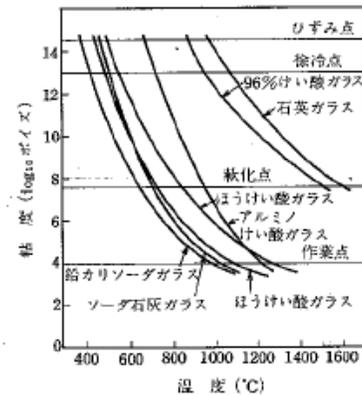
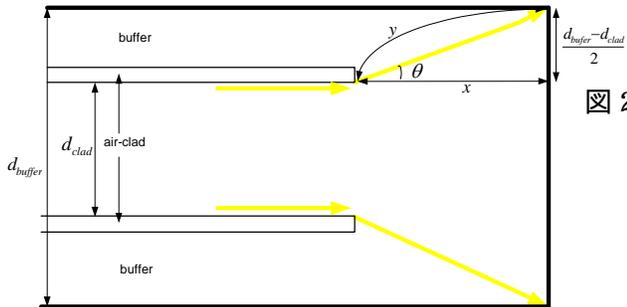


図 2.3 粘度対温度特性

次にエンドシール加工部の端面と空孔の距離であるエンドシール長について示す。空孔がつぶれなくなると図 2.4 のように逆側からきた光は広がる。この距離が長いと光は側面に達してしまい、側面より漏れていく。よってこのエンドシール長を適切にする必要がある。いま図 2.4 のように角度 θ で広がり、端面でのビーム径とバッファ径が一致するときのエンドシール長 x とする。石英ガラスの屈折率 n_{silica} とすると NA



は
図 2.4 の y は

$$NA = n_{silica} \sin \theta$$

$$y = \frac{\frac{d_{buffer} - d_{clad}}{2}}{\frac{NA}{n_{silica}}}$$

図 2.4 エンドシール長

よってエンドシール長 x は

$$x = \sqrt{y^2 - \left(\frac{d_{buffer} - d_{clad}}{2}\right)^2} = \left(\frac{d_{buffer} - d_{clad}}{2}\right) \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{NA}{n_{silica}}\right)^2} - 1}$$

エンドシール長がこの x の値より低いとき、側面から漏れずに端面から光が出て行く。今回の PBGF のバッファ径 $600 \mu\text{m}$ 、クラッド径 $300 \mu\text{m}$ であったので最適エンドシール長は $365 \mu\text{m}$ であった。

3. エンドシール加工の作成

ファイバーの加熱にはファイバーカップラー製造機のセラミックヒーターを用いた。図 3.1 のようにセラミックヒーターで PBGF の中央を 1600°C に加熱し、空孔がつぶれた部分で切断した。切断した端面を研磨剤と水を用いて手で研磨し空孔と端面までの距離であるエンドシール長を制御した。

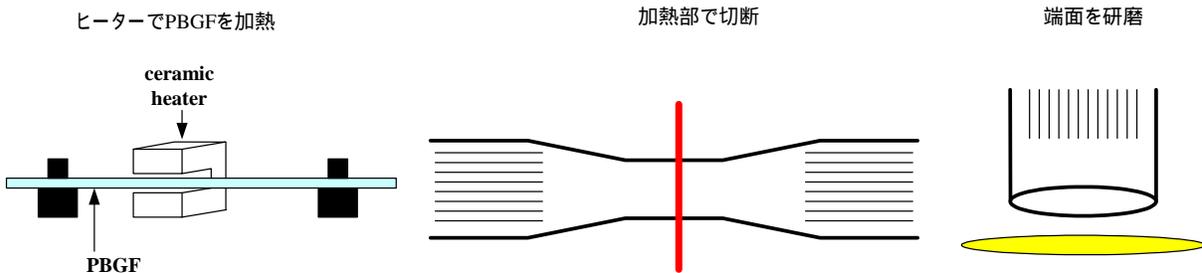


図 3.1 作成手順

エンドシール加工による PBGF の端面の変化を図 3.2 に、側面の変化を図 3.3 に示す。端面では通常の PBGF ではバンドギャップ構造のまわりのエアクラッドがあるが、今回作成したものはエアクラッドがつぶれエンドシール加工できていることが分かる。側面を見ると通常の PBGF は空孔で散乱し白く映っているが、エンドシール加工したものの境界部は右側では空孔がのこっているが左側は空孔が消え黒く映っている。

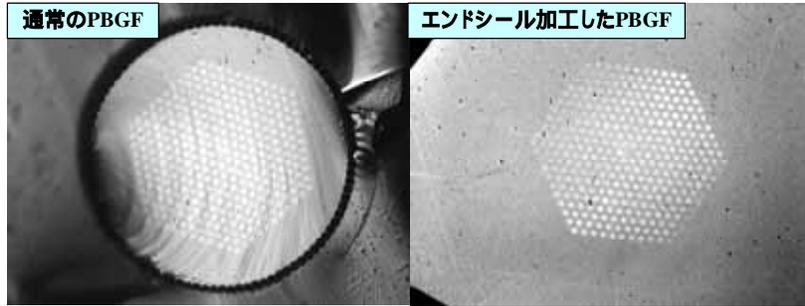


図 3.2 端面の変化

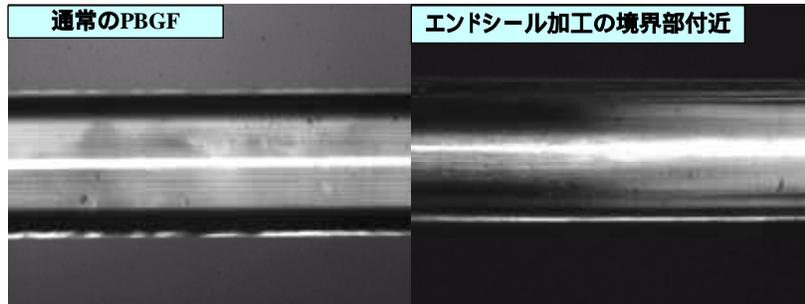


図 3.3 側面の変化

次にエンドシール部の逆側の端面より白色光を入射しエンドシール部の端面の近視野像を CCD で撮影したものを図 3.4 に示す。空孔がつぶれた所からビームは広がる。エンドシール長が長いと側面に達して側面から漏れてしまい左側ようになる。研磨していきエンドシール長が短くなると側面に達する前に端面より全て出射するので右側ようになる。このとき空孔のつぶれの開始位置が各空孔によって違う不均一な場合図 3.5 の左側ようになる。右上付近は空孔が残っているため全反射しビームの輪郭がはっきりしているが左下付近は空孔がつぶれている為外にビームがバッファ部へと漏れ輪郭がはっきりしていない。実際フォーカスを奥に移すと右側のようになり右上付近に空孔が残っているのが分かる。

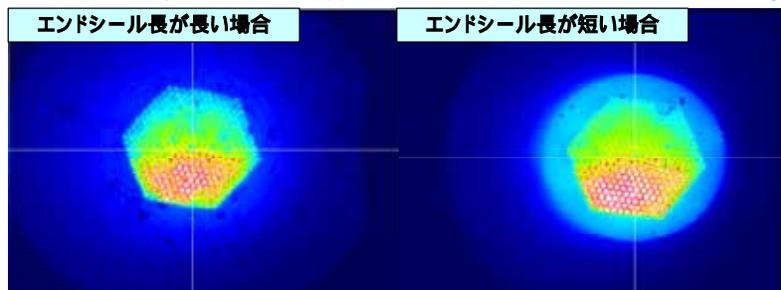


図 3.4 CCD での近視野像

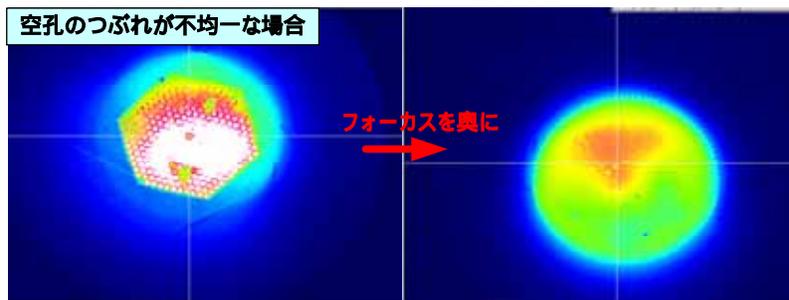


図 3.5 空孔のつぶれが不均一な場合

4. エンドシール加工の評価実験

波長 975nm の光を用いてエンドシール加工の評価実験を行なった。図 4.1 のようにエンドシール加工の端面より入射し透過パワーを測定した。エンドシール加工がない場合のクリーブ時に対しての結合効率を測定した。各エンドシール長での実験結果を図 4.2 に示した。

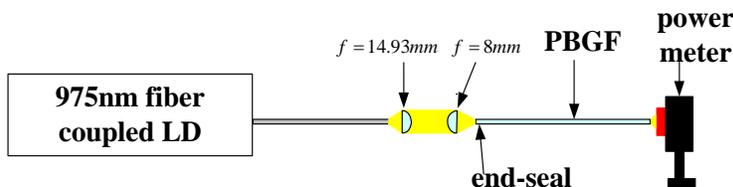


図 4.1 実験系

エンドシール長が長い時は結合効率は低く、研磨し短くなるにつれてクリーブ時に近づいた。最終的にはエンドシール長 $58\mu\text{m}$ のとき最大結合効率 85%であった。 $58\mu\text{m}$ と最適エンドシール長より十分短いにもかかわらずクリーブ時の 15% 低下してしまった。この原因として空孔のなだらかなつぶれが考えられる。空孔が寸断されるようにつぶれていけばすべてエンドシール部より入射するはずだが、今回の作成方法ではヒーターを用いたためヒーター内の温度分布によってなだらかにつぶれてしまっている。そのためエアクラッドの実効屈折率が徐々に小さくなり、NA もそれに従い小さくなっていく。この領域で損失が起きてしまっていると考えられる。損失をなくす為にはこの領域を小さくすればよいことが分かる。

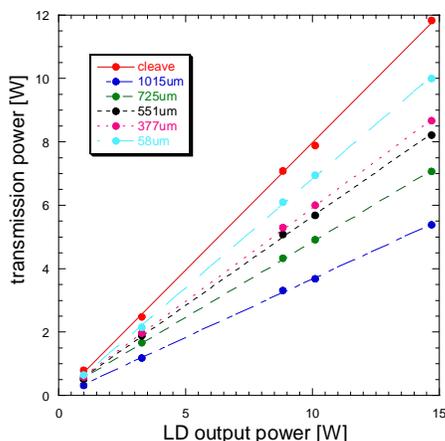


図 4.2 実験結果

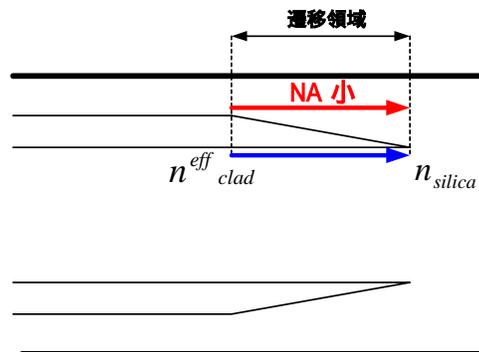


図 4.3 遷移領域

5. 今後の展望

負圧を用いたエンドシール加工による品質向上が挙げられる。ファイバーの片側の端面をエンドシールしておき、もう片方の端面よりシリンジ等で空気を抜く。そうすると気圧の力が表面張力に対して小さくなり、現在 2 分間過熱している加工時間の短縮が期待できる。これにより長時間加熱による粘性低下による曲がりやそれに伴う空孔のつぶれの不均一などを予防できる。

参考文献

1. Jakob juul Larsen, Guillaume Vienne, *Side pumping of double-clad photonic crystal fibers*, OPTICS LETTER, vol.29, No.5, March 1, 2004
2. Jianjun Ma, Wojtek J. Bock, *Modeling of photonic crystal fiber with air holes sealed at the fiber end and its application to fluorescent light collection efficiency enhancement*, OPTICS EXPRESS, Vol.13, No.7, 4, April, 2005
3. W. D. KINGERY *Surface tension of some liquid oxides and their temperature coefficients* Journal of the American Ceramic Society Vol.42, No.1