

フォトニッククリスタルファイバーを用いた高強度白色光源の開発

電子工学科 米田研究室 高橋 浩志

1. 概要

本研究は、1990年代後半に考案され近年になって市場に登場してきたフォトニッククリスタルファイバー(PCF)を取り扱ったものである。通常の光ファイバーの構造と異なり、実効面積の小さなコアとコアの周囲に周期的に配置されたエアホール群により、光を閉じ込めて伝搬させている。従来光ファイバーと比べて非常に大きな非線形効果が得られるため、その用途は幅広く、通信用デバイス・白色光発生源・波長変換デバイス・分散補償ファイバー・偏光保持ファイバー等の利用方法が考案されている。

しかし、用途の幅広さなど便利な面ばかりでなく、PCFは致命的な弱点も併せ持つ。それは、PCFはコアとエアホールを幾何学的に配置させた複雑な構造をしており、コア径は数 μm と非常に微細な形状をしているため、高強度の入力光に対して壊れ易いことである。例えば白色光源として使用する場合、出力光のスペクトル幅を十分に得るためには高強度の入力光が必要不可欠であり、入力光強度を上げていくと、あるとき突然光が出なくなるという現象が報告されている(およそ100mWを超えた辺りで)。入射端面のコアの形状は破壊され、次に入射してくる光はその部分で散乱してしまい光が内部を伝搬しなくなる。従来のシングルモードファイバーと比較すると、コアが損傷するエネルギー閾値は桁違いに小さく、実用上耐え難いものである。マイクロストラクチャゆえに脆いとはいえ、高強度の白色光源を待ち望んでいるユーザーのことを考えると、放任することのできない深刻な問題である。

そこで本研究では、この問題を解決すべく、入射端面に保護用レンズを作成することを考えた。複雑で微細な構造を持つ入射端面よりも、シンプルな形状をした入射端面の方が壊れにくいという発想である。

2. PCFの特徴

PCFの構造は、クラッド部に周期的なエアホール(空孔)を有するもので、大きく分けて二種類のタイプがある。まず、コア部が純粋なシリカガラスでできており、その周囲を光の波長程度のサイズの空孔が周期的に配置されているタイプである(Index Guiding PCF)。もうひとつは、コア部が空洞(他の気体・液体の場合もある)でできており、同じく周期的なエアホールが配置されているタイプのものである(Hollow Core PCF)。前者が、内部全反射により光を閉じ込めているのに対し、後者は、フォトニックバンドギャップ効果により光を閉じ込めて伝搬させている。従って、その特性、使用方法には相違点がある。

スーパーコンティニウム光(SC)とは、高強度の超短パルスが光ファイバーなどの非線形媒質に入射すると、そのスペクトルが広帯域にわたり広がり、白色化する光のことである。その物理的現象は、自己位相変調(SFM)、誘導ラマン散乱(SRS)、高次ソリトン分裂過程(SFP)等を伴うものであり複雑である。参考までに、

PCFを用いて白色化させた光を、プリズムで分散させたときの写真をFig.1に掲載した。

3. PCFの問題点

SC光の発生を実現できるファイバーとして、現在までPCFが話題の中心に挙がっており、それに関する論文も多数投稿されている。しかしその一方で、高強度のパルスをPCFに入射させると入射端面に位置するコアが破壊され、SC光が出力されないばかりか、入射端面のコア部で光が散乱してしまいコア内部に光が伝搬しないという現象も観測されている。その原因のひとつとして、光をコア内に入射させるために集光させると、集光部分でのエネルギー密度は高くなり、非線形過程による吸収により、その部分が光破壊されるという報告がある[1]。また、通常の光ファイバーと異なり、PCFのコア径は数 μm と小さいため、入射端面における光電場の集中なども起因している。

この問題を回避するためには、入射させる光の光量を少なくする、レーザー装置の繰り返し周波数を下げる等の対処方法が考えられるが、「ファイバーのコア破壊」に関するテーマを扱った論文は、今まであまり投稿されていないのが実情である。参考までに、PCFのコア破壊の様子をFig.2に記載した。

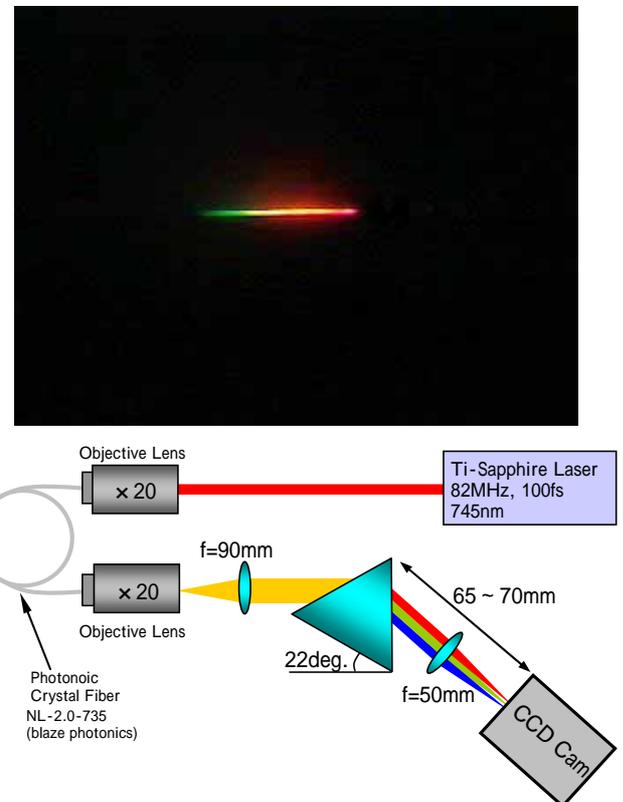


Fig.1 PCFから発生する白色光をプリズムで分散させたときの写真及びその光学配置図。入力光(745nm)がPCFにより緑色の領域にまでスペクトル拡大している。CCDカメラの撮像素子には赤外カットフィルターが組み込まれているため、赤外領域は写っていないが、赤外領域側にもスペクトルは拡大している。

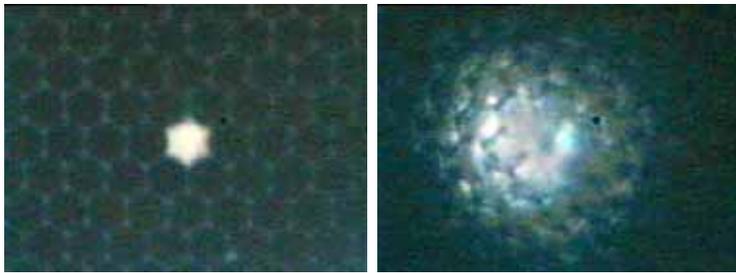


Fig.2 コアとその周辺の様子。正常な状態(左側)と、光破壊により形状が変化してしまった状態(右側)。Index Guiding PCF。光破壊は、出射強度を上げるために入射強度を上げていくと突然起きる。このとき出射端面、ファイバークラ内は破壊されず、常に入射端面が破壊される。

4. 本研究の重要性

そこで登場するのが、本研究で提案する、ファイバーの端面に屈折率球体(ガラス半球)を作成する方法である。屈折率球体を作成することで、光がファイバー表面を通過する部分の面積を広げ、ファイバー表面におけるエネルギー密度を下げるができる。屈折率球体の材質としてガラスを選んだ理由として、PCFはシリカガラスでできているため、両者の材料のマッチングを合わせるためである。また、PCFのコア及び周辺のエアホールの構造は複雑であり、微細構造ゆえに壊れやすいという観点から、できる限り入射端面をシンプルな形状にするという狙いもある。概念図をFig.3に示した。

尚、本研究で紹介するガラス半球の作成のプロセスは、後述するようにジメチルポリシロキサン構造をもつシリコンオイルを利用し、紫外線を照射させることでSiO₂素子を生成するというものである。このアイデアの多くは、東海大学教授の村原正隆氏の研究成果を引用したものである。

5. シリコンオイルからSiO₂素子の生成

本研究で提案する屈折率球体(ガラス半球)の作成手順は、紫外線を用いた表面改質の技法を用いて、シリコンオイルからSiO₂素子を生成する方法である。具体的には、Fig.4で表される化学構造の中で、Si-C結合を光分解させ、CH₃基の代わりにOを置換させる。

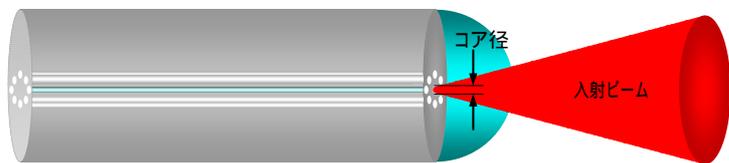


Fig.3 PCFの端面に屈折率球体を作成。真空-ファイバー境界との断面積を大きくし、さらにレンズ効果によりカップリング向上を行うことで、高入力による高強度白色光源を実現。

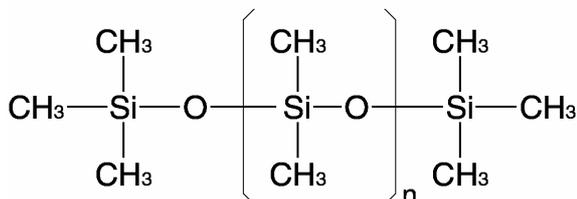


Fig.4 シリコンオイルの化学構造。ガラスと同じ無機質のシロキサン結合(Si-O-Si)と有機質のメチル基(CH₃)からなる。

6. 紫外線を用いた表面改質

紫外線を用いて、物質表面の改質を実現する研究がなされている[2]。具体的には、材料の表面を親水性にしたければOH基やNH₂基を、新油性ならCH₃基やC₂H₅基を置換して、化学結合のみによる新しい表面を形成する手法であり、いわば光化学的“表面改質法”である。紫外線領域の波長の光子エネルギー(=hν)は、Fig.5に示すように2~10eVであり、分子間の結合エネルギーに匹敵する。このとき物質の分子と照射した紫外線の光子が衝突し、その分子の結合エネルギーが光子のエネルギーよりも小さく、かつその波長域に吸収帯を有するとき、その分子は光解離される。このときに、末端原子と所望の官能基とを置換させることにより、表面改質を達成することができる。言い換えると、もし切断したい分子間の結合エネルギーと吸収波長が分かっていたら、用いるべきレーザーの種類が決定できる[3]

7. シリコンオイルの吸収波長

使用するシリコンオイルの吸収波長を求めるために、分光光度計(Hitachi spectro photo meter)を用いて透過率の測定を行った。結果をFig.6に示した。Fig.6から、10cs、100csでは190nm付近に、1csでは200nm付近に最も強い吸収を示していることが分かる。このことから、190~200nm付近に波長帯域をもつ紫外光が、このシリコンオイルに適している(1cs、10cs、100csは動粘度の異なるオイル。値が高いほど動粘度は高い)。

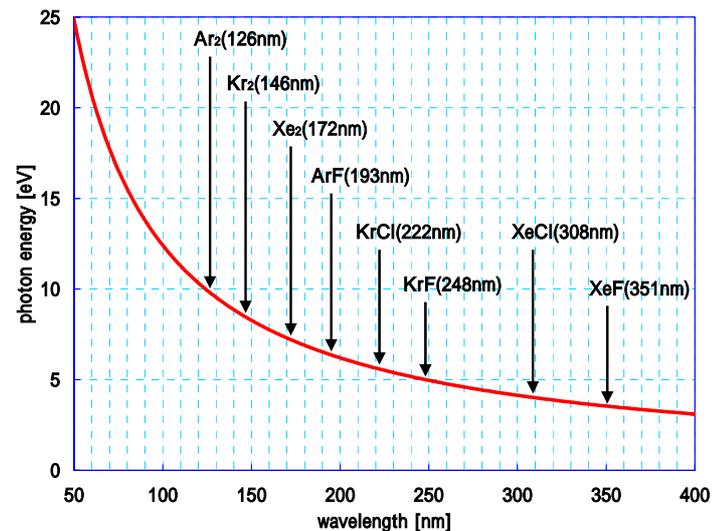


Fig.5 波長[nm]と光子エネルギー[eV]との関係

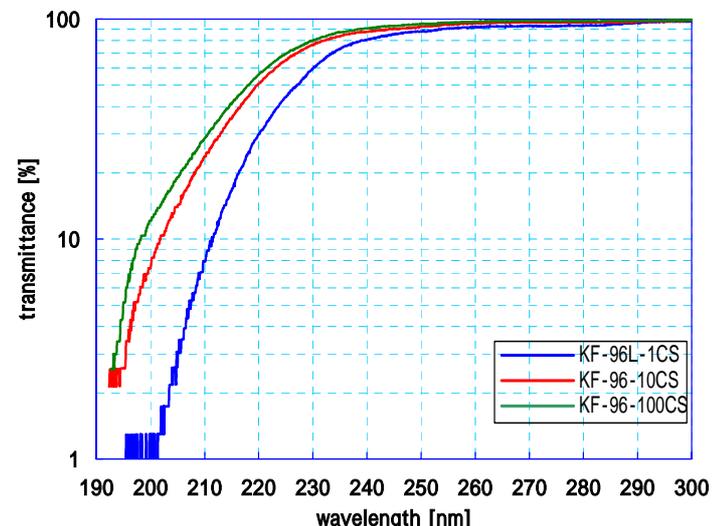


Fig.6 シリコンオイルの透過率 vs 波長特性

8. 屈折率球体のシミュレーション

屈折率球体の最適な高さを求めるためには、球体を通る光の表面積を求めなければならない。そこで、ビーム光線の伝搬理論を引用してシミュレーションを行うことにする[4]。ビームスポットサイズ (ω) はビーム光線の断面の半径を表しており次式で表される。

$$\omega^2(z) = \omega_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2 n} \right)^2 \right] \quad (1)$$

ファイバー内を伝搬しているビーム光線がコア外へ進行する場面を考えると、出射端面における位置 ($z=0$ とおく) ではビームスポットは最小になっている。例えばこれをシミュレーションしてみると Fig.7 のようになる。(1)式をビームの広がり角を表す式で近似させると、ビームの広がり角 θ_{beam} は次式で表される。

$$\theta_{beam} = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda}{\pi \omega_0 n} \right) \quad \left(z \gg \frac{\pi \omega_0^2 n}{\lambda} \right) \quad (2)$$

(2)式を用いて、屈折率球体の表面を通過する面積を求めると次式のようになる(立体角の概念を利用した。半頂角が θ_{beam} に相当、 L は球体の高さ(曲率半径))。

$$S = 2\pi L^2 \left(1 - \cos \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{\lambda}{\pi \omega_0 n} \right) \right\} \right) \quad (3)$$

上式を用いて、コア半径 $1.0 \mu\text{m}$ ($= \omega_0$) の場合の表面積は、Fig.8 のようになった。例えば $6.2 \mu\text{m}$ の厚みの屈折率球体を作成した場合、表面積は $3.2 \mu\text{m}^2$ になる。これはコア面積 $3.14 \mu\text{m}^2$ (コアを直径 $2 \mu\text{m}$ の円とみなした場合)と比較すると同程度の面積である。従って、 $6.2 \mu\text{m}$ 以上の厚みの屈折率球体を作成するのが適当である。

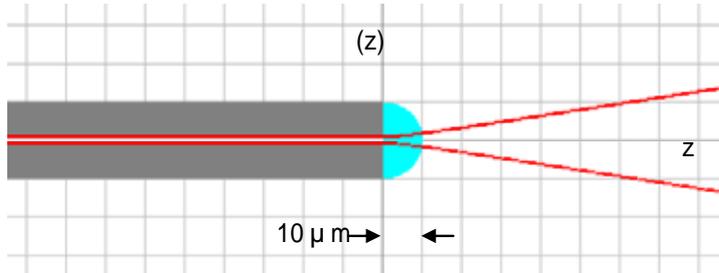


Fig.7 ビームスポットサイズのシミュレーション ($\omega_0=1.0 \mu\text{m}$, $\lambda=745\text{nm}$, $n(\text{core})=1.45$, コア半径= ω_0)

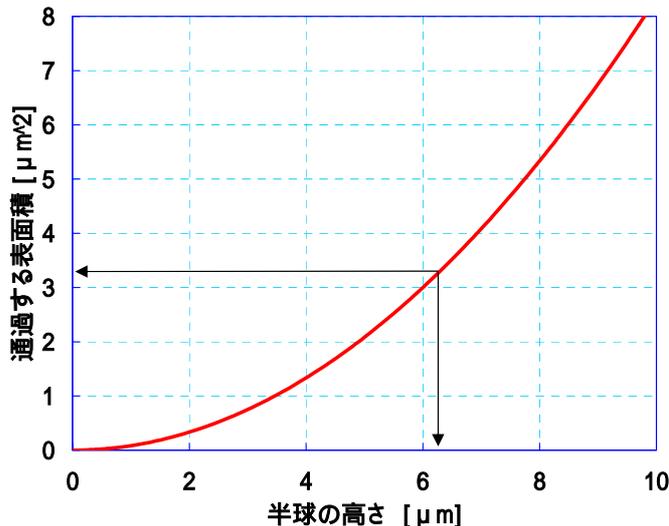


Fig.8 屈折率球体の高さ [μm] vs 表面積 [μm^2]

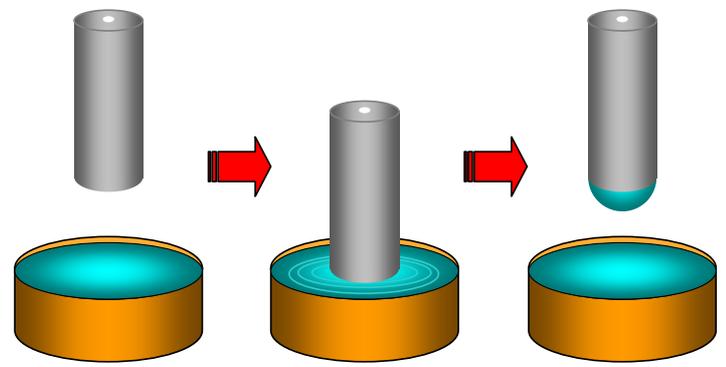


Fig.9 ドロプレットレンズ原理図

9. ドロプレットレンズ作成装置

屈折率球体(ガラス半球)の作成方法として、本研究で提案する「ドロプレットレンズ」がある。これは、シリコンオイルの持つ表面張力を利用したもので、ファイバー端面を下向きにしてシリコンオイルに浸し、それを引き上げたときに、液体の表面張力によりレンズを作成する方法である。原理図を Fig.9 に示す。

「ドロプレットレンズ」の特徴は、屈折率球体の高さをシリコンオイルの動粘度を変える(または組み合わせる)ことでコントロールできることである(シリコンオイルの表面張力は動粘度に依存するため、動粘度が高いほど表面張力は強い)。このとき紫外線を照射させることで、シリコンオイルで形成された半球の球殻を固め、形状を保持することが可能となる。

10. ドロプレットレンズの作成と評価

【ドロプレットレンズ作成の手順】

光ファイバー(コア径 $100 \mu\text{m}$ 、クラッド径 $110 \mu\text{m}$)の先端にシリコンオイル(10cs、100cs)を付着させる
ドロプレットレンズの作成(結果を Fig.10 に)
紫外線光源で1時間照射させる。ドロプレットレンズの球殻を固める(結果を Fig.11 に)

なお、紫外線光源として D2 ランプ(スペクトル分布 $115 \sim 400\text{nm}$ 浜松ホトニクス社製)を使用した。

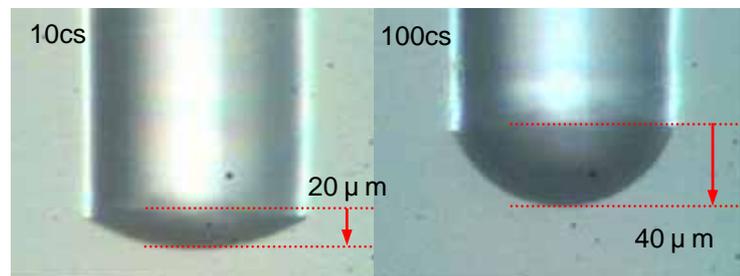


Fig.10 紫外線照射前

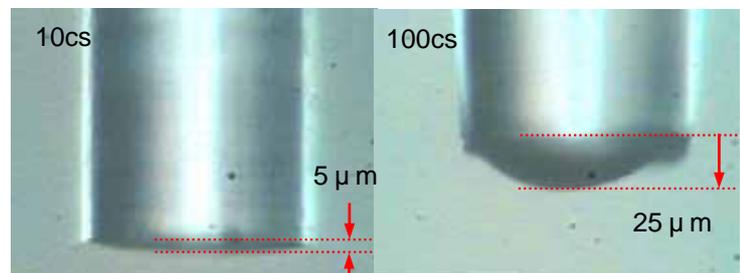


Fig.11 紫外線照射後

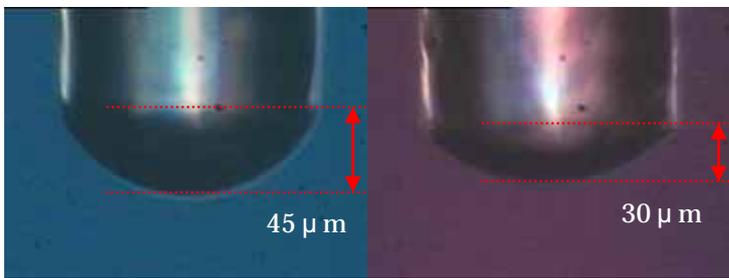


Fig.12 紫外線照射前（左側）と、紫外線照射後（右側）

1.1. 単一モードファイバーによる実験

単一モードファイバー（モードフィールド径 $4\mu\text{m}$ 、外径 $125\mu\text{m}$ 、ファイバー長 10m ）の端面にドロップレットレンズを作成し、光が通るか実験してみた。手順を次に示す。

単一モードファイバーの端面にシリコンオイル（100cs）を付着させる（結果を Fig.12 に）、D2 ランプで 1 時間照射させる（結果を Fig.12 に）、Ti-Sapphire レーザー（ 745nm 、 82MHz ）を入射させる。フォトダイオードを用いて光パワーを計測

フォトダイオードで光電流を計測したところ入力側は 2.4mA 、出力側は 0.5mA だった。使用したフォトダイオードの受光感度より、入力側 6mW 、出力側 1.2mW となった。このことから光は問題なくレンズを通ることが分かった。

1.2. ドロップレットレンズの作成と評価（PCF 端面）

フォトニッククリスタルファイバーの端面にドロップレットレンズを作成してみた（結果を Fig.13 に）。Fig.13 から分かるように、コア及びエアホール上にシリコンオイルが貼り付いていない様子が分かる。幾つかの方法で確認してみたところ、オイルがエアホールに流れ込んでいるのではなく、PCF 端面の構造上の問題により貼り付いていないということが判明した。詳細な理由については明らかでないが、HF 溶液（濃度 5%）に浸して PCF 端面をエッチングさせてやると、シリコンオイルを端面に貼り付けるのに成功した。その様子を Fig.14 に示した。

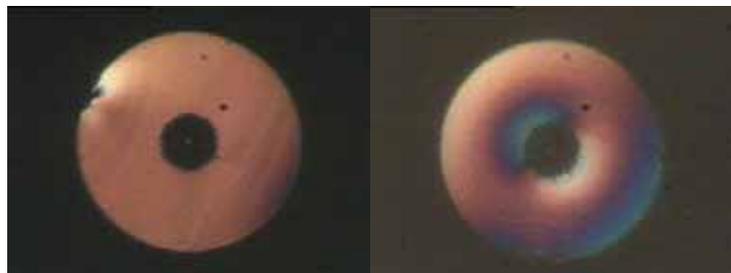


Fig.13 PCF にオイルを付着させる前（左側）及び付着後（右側）

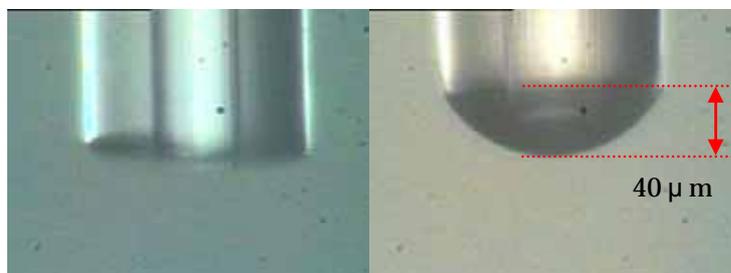


Fig.14 エッチング後（左側）とそれにオイルを付着後（右側）

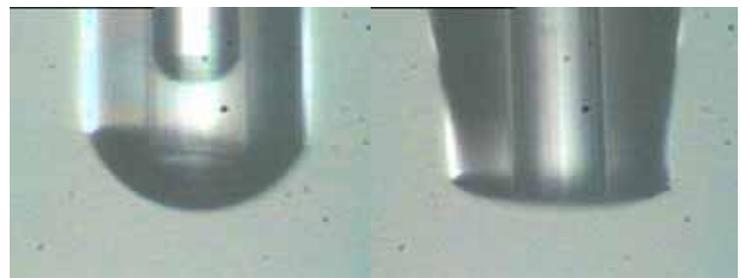


Fig.15 シリコンオイルがコア及びエアホールが溶けて空洞になった部分に侵入する様子（左側）及び時間が経過した後の様子（右側）

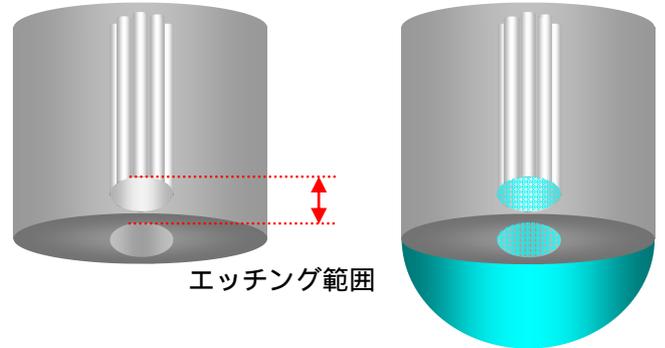


Fig.16 エッチング後の PCF 端面（左側）及びドロップレットレンズ付着後（右側）

しかし、時間が経過するとまた別の問題が発生した。エッチングすると、コア及びその周辺のエアホールが侵され、その部分は溶ける。時間が経過すると、その部分にシリコンオイルが入り込んでしまい、その結果端面には何もなくなってしまいます。その様子を Fig.15 に示した。

この現象を解決する方法として、エッチングする時間を短くしてエッチングする領域を少なくし、侵入する体積を最初に貼り付いたレンズの体積より少なくさせてやれば良い。このアイデアを Fig.16 に図案化させた。

1.3. 残された問題点

Fig.16 のような解決策が見つかったものの机上のアイデアで、未だ実践していない段階である。

シリコンオイルに紫外線を照射させると、体積が縮小する現象が残された問題点である（Fig.11, Fig.12）。実験では、紫外線が酸素分子により吸収されるのを防ぐために、 0.1Torr の真空状態で行ったが、その状態では酸素分子が不足しており CH_3 基との置換反応を行うことができない。もし、 $190\sim 200\text{nm}$ の付近で紫外線が酸素に吸収されないならば、真空を引くメリットはどこにもない。今後、その詳細を明らかにした上で、再度実験する必要がある。

1.4. 今後の展開

Fig.16 で提案したアイデアを実践して、フォトニッククリスタルファイバーの端面にドロップレットレンズを作成する予定である。それが完成した暁には、出力光のパワーが 1 桁（あるいはそれ以上）上がるまで挑戦してみたい。

参考文献

- [1]Chris B. Schaffer, Andre Broudeur, Jose F. Garcia, and Eric Mazur, Opt. Lett. 26,93-96 (2001)
- [2]村原正隆, "エキシマレーザーを用いたプラスチックの表面改質", 20, 407-413 (表面科学)
- [3]村原正隆, "エキシマレーザー表面処理", C-2-1 C-2-12 (Laser Expo 2004 講演予稿集)
- [4]Amnon Yariv, "Chap.6 (p.99-p.129)" Quantum Electronics