

超短パルスレーザー用液体光学素子の研究

電子工学専攻 米田研究室 高橋 浩志

要約

本修士論文では、新たな機能を持った超短パルスレーザー用の液体光学系を提案し、その素子を開発していくことを行った。特に、ここでは、近年さかんに使用されるようになった、非線形効果の強いフォトニック・クリスタル・ファイバ (PCF) への応用を目指したものを中心に研究を行ったものをまとめている。このPCファイバとフェムト秒レーザーを組み合わせることで、容易に超短パルス広帯域白色光の発生が行えるようになってきている。これは、横モードが制限されたファイバー伝送可能な紫外～可視～赤外領域にまたがる超広帯域光であり、光コムをはじめ、レーザー顕微鏡測定、光CTなど幅広い分野で用いられているが、入射光強度の増強により、ファイバ端面の光学損傷が起きるという問題があった。そこで、本研究では、このPCファイバ端面に、自己修復可能な液体光学系を付加し、高強度超短パルス光による広帯域白色光発生源の開発を行った。

1. はじめに

近年、従来の光ファイバと異なり、波長分散特性を制御できるファイバとして、フォトニック・クリスタル・ファイバ (PCファイバ) が注目を集めている。従来の光ファイバと比較して非常に大きな非線形効果が得られるものがあるため、幅広い用途での利用が考えられている。例えば、非線形デバイス、通信用デバイス、スーパーコンティニウム光の発生源[1]、波長変換デバイス、分散補償ファイバ、そして偏光保持ファイバ等への応用が挙げられる。またPCファイバを扱う分野も急速に普及し、光応用計測、生体応用光学、光化学、分光学等の分野で利用されている。

このように、非線形効果を期待するファイバは、エネルギーを注入すればするほど興味深い。しかし、このときに制限となるのが入射端面での光破壊である。端面が破壊されると、その部分で入射光が散乱し、それ以上ファイバ内部に光が伝搬しなくなる。こうなると、十分な非線形効果が得られないため、スペクトル幅も減少してしまう。特に、ポンプ光が超短パルスの場合には、ピーク強度がパルス幅の逆数で効いてくるので、この光破壊の影響が顕著に現れてしまう[2]。超短パルス (パルス幅 100fs、入射パワー200mW) を注入したときに、入射端面のコアが光破壊される様子を表したのが、Fig.1である。

2. 本研究の意義

一般に、ファイバの入射端面は、コアが損傷して表面絶縁破壊が起きる損傷閾値が最も低いため、ファイバへの入射光量やファイバ内の光強度を決めるポイントとなる。この端面の表面での損傷は、(1) 真空 (大気) と誘電体との境界での電界ひずみ、(2) 表面粗さや表面欠陥に吸収された熱によるひずみ、(3) ダストの付着や表面の汚染などが入力光により加熱されて生じる熱によるひずみ、などが考えられる。PCファイバの場合、入射端面における損傷閾値は、通常の光ファイバと比較して桁違いに小さい。その理由として、PCファイバがコアとエアホールとを幾何学的に配置させた複雑な構造を有しているため、コア部分に光電場が集中しやすく、表面絶縁破壊が起きてしまうからである。従って、これを防ぐためには、必然的に入射端面の保護が必要になってくる。

本研究で着目している部分は、入射端面を保護し、高強度のポンプ光を入射させても破壊されない入射端面素子を作製することである。入射端面の光破壊が抑制できれば入射光強度を引き上げることができ、ファイバ内部での非線形効果を増大させ、非線形光学の面白さを追求することが可能になる。

3. 学内外における研究状況

PCファイバ入射端面の光破壊を抑制する策として、ダブルパルス法がある[2]。これは、2つに分けたポンプ光をPCファイバに入射させ、片側のパルスのタイミングを調整させて、ファイバ内部の非線形効果を最大限に引き出す方法である。予め2つに分けることで、入射端面における集光強度を下げることができる。

その他、入射端面そのものを加工する方法も提案されている。ファイバ融着接続器を用いて端面付近でアーク放電させ、端面をレンズ状に加工する方法である[3]。同じくファイバ融着接続器を用いた手法で、従来のシングルモードファイバとPCファイバとを融着接続させる方法も提案されている[4]。いずれの手法も、端面で剥き出し状態だったエアホールの部分を加工し、ガラスでカバーされた状態を実現させることができる。問題点を挙げるとすれば、加工する部分に位置するエアホール全体の幾何学的構造や配置を変えることになるので、クラッド部分の屈折率が変化し、コア・クラッド間の屈折率条件が変化してしまうことである。即ち、その位置で、コアを伝搬する光が漏れる可能性が生じてしまう。事実、カップリング損失が加工しない場合と比較して増大するという報告がなされている。

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、ファイバ端面にPCファイバ構成材料と同程度の誘電率を持つ液滴レンズを取り付ける方法である。この液滴レンズによって、本来剥き出し状態だったエアホールの部分をカバーすることができる。

液体を選んだ理由は、液体の持つ特性を利用するためである。例えば、液体の表面張力を利用すれば、コアに対する精度の高いアライメントを必要とせず、半球に近いレンズが自動的に形成される。さらに、液体の粘性率、PCファイバのクラッド断面の真円度、コア・クラッドの同軸性を使って、自動求心、自動平滑曲面形状に作る事が可能になる。

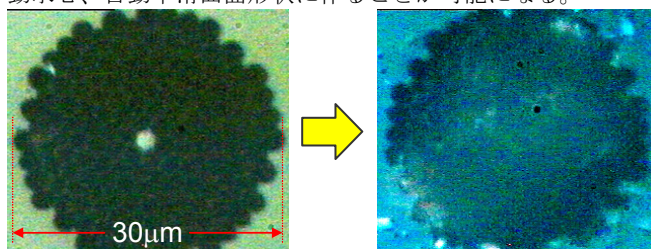


Fig.1 左側が正常な入射端面、右側が光破壊された端面。

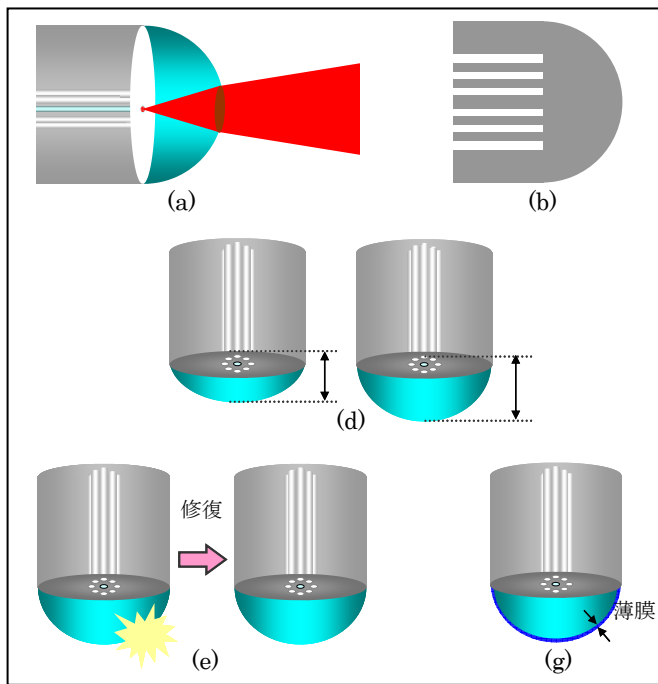


Fig.2 液滴レンズ装着 PC ファイバの特徴。

液滴レンズ装着 PC ファイバの特徴を列挙すると以下のようになる。

- (a) 入射断面積の増加により端面集光強度の低下が可能。
- (b) 複雑な入射端面構造をシームレスかつシンプルな構造に変えることが可能。
- (c) 液体の表面張力を利用してファイバ中心・一様球面を自動的に形成可能。
- (d) 液体の粘性度を利用して表面形状の制御が可能。
- (e) 液体の表面張力を利用して自己修復機能を持たせることが可能。
- (f) ファイバ開口数の増加が期待できる。
- (g) D₂ランプ等の VUV 光により薄膜形成が可能。

上記(a),(b),(d),(e),(g)を端的に表現した概念図を Fig.2 に示す。図中の(a)~(g)の記号は、上記文章の記号と一致させてある。

5. 液滴レンズの作製及び評価

5.1 液体光学素子としての液滴レンズ

屈折率液体としては、ファイバ構成材料と光学的に類似の特性を持たせるために、ガラスと同等の屈折率を持つシリコンオイル（信越化学工業製）を用いている。シリコンオイルの屈折率は 1.4 なので、PCファイバと液滴レンズとの境界面での反射を低減させることができる。可視光領域において透過率は 100%であるので、液体光学レンズとして使用しても問題はない。但し真空紫外領域（波長 200nm以下）において強い吸収が起きる。この特性を利用して、紫外線ランプを照射させてシリコンオイルをガラス化させる研究もある[5]（東海大学、村原正隆教授）。本研究においてもこの方法を利用して、液滴レンズ表面をガラス化させ風船状のレンズ作製実験も行っている。これにより、形状を一層強化することが可能になる。

液滴レンズの作製手順は、Fig.3 に示すようにファイバ端面を下向きにしてシリコンオイルに浸し、それを引き上げる方法である。このとき液体の表面張力により自動的に半球レンズが形成される。さらに、粘性度の異なるシリコンオイルを

混ぜ合わせることで、自在に粘性度をコントロールすることもできる。シリコンオイルの粘性度は液滴レンズ形状に影響を与え、粘性度を変えることで液滴レンズの曲率半径等を変えることができる。Fig.4 は、粘度を変化させた場合の同一ファイバ先端にできる液滴レンズの様子であるが、液体の粘性率と表面張力により、高い再現性を持って同一半径の液滴レンズが形成できることが観測された。Fig.5 にシリコンオイルの動粘度 vs 曲率半径、接触角の関係を示した。

次に、液滴レンズの表面精度を測定するために、干渉計で干渉像を観測した結果、Fig.6 のような美しい同心円状のニュートンリングが得られた。干渉縞の暗線の間隔を求めて、液滴レンズ表面形状をプロットさせてやると Fig.7 のようになった。実線は真円をプロット点にフィッティングさせて描いたものである。Fig.8 はプロット点と真円との値の差を求めたものである。ファイバの端（中心から 45 μ m~55 μ m の位置）で、液滴レンズが真円からずれる原因として、端の位置によるクリッピングが考えられる。しかし、通常使用する場合には、クリッピングされた端の位置を使用するということは考えにくい。何故なら、例えば NA=0.4 の角度でコアに入射する光が通過する範囲は、中心から 15 μ m 程度だからである。Fig.16 の結果から、光の波長精度で見ても表面形状は高い精度で球面であるということが分かった。

5.2 液滴レンズ損傷閾値の測定

従来のシングルモードファイバを用いて、剥き出しの場合と液滴レンズを装着させた場合の損傷閾値を調べた。測定方法は、ファイバ入射端面を側面から CCD カメラで観測し、散乱光を測定するやり方である。高強度の入射光をファイバに入れ、端面が正常な場合にはそこで光が散乱せず通過し、もし端面が光破壊された場合には、コア及びコア周辺が破壊によって変形するので、そこで光は散乱するはずである。

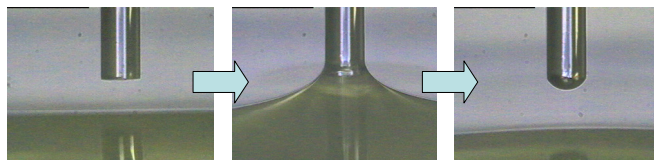


Fig.3 液滴レンズ作製の様子を顕微鏡で観察

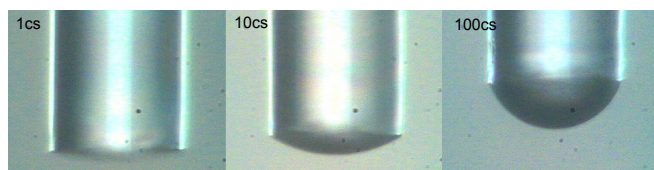


Fig.4 液滴レンズの側面写真（“cs”はオイルの動粘度）

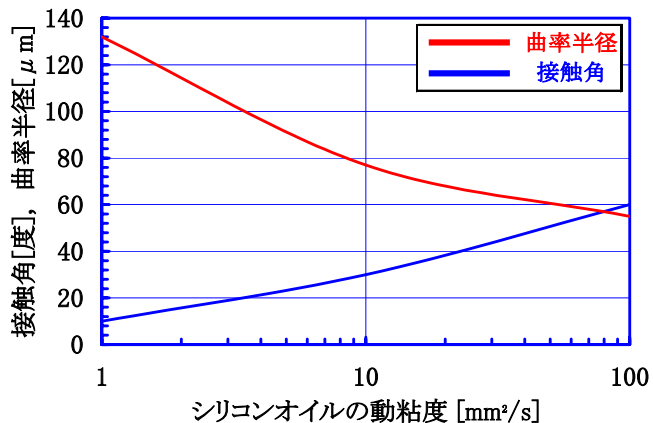


Fig.5 シリコンオイルの動粘度 vs 曲率半径、接触角

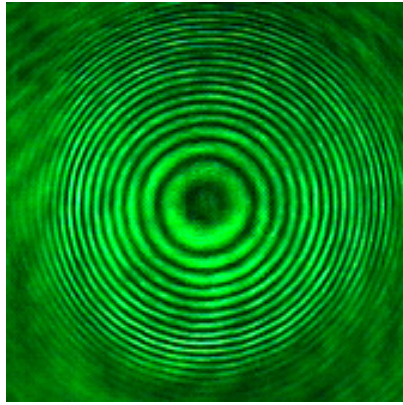


Fig.6 液滴レンズの干渉縞の像 (検査波長 532nm)

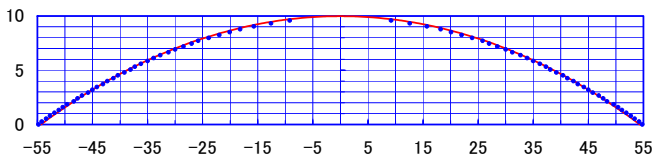


Fig.7 干渉計による測定結果(液滴レンズの形状をプロット)

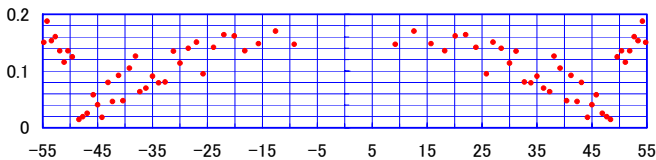


Fig.8 液滴レンズ形状と真円との差

ポンプ光には Ti:Sapphire レーザ (波長 745nm、パルス幅 100fs) を Nd:YAG レーザ増幅器で増幅させた光を使用した。散乱光を測定するための CW レーザ光をファイバの出力側から入れ、散乱の様子を CCD カメラで観測した。Fig.9 はファイバ端面のコアが破壊される瞬間を撮影したものである。上段にある写真が剥き出しのファイバの場合で、下段にある写真が液滴レンズファイバの場合である。最初にポンプ光の強度を落とした状態で、ファイバのコアにポンプ光が入るようにアライメント調整を行い、次にポンプ光の強度を一気に $0.35\text{J}/\text{cm}^2$ まで上げて照射させた。Fig.9 の写真を見ると、剥き出しファイバの場合には入り口部分で強い散乱が起きている様子が分かる。しかし液滴レンズファイバの場合には、入り口部分で強い散乱はなく、散乱がファイバ内部まで及んでいる様子が観測できる。このことは、液滴レンズを装着させたことにより、入り口部分の破壊強度が強化されたと考えられることもできる。なぜなら、同じポンプ光強度を入射させた場合でも、剥き出しファイバの場合には入り口部分がすぐに破壊され、光がそれ以上内部に伝搬していないからである。

次に、ポンプ光強度を変化させたときの散乱光を測定した結果、Fig.10 のようなグラフが得られた。縦軸の散乱光強度は、CCD カメラで観測した側面画像全体を積分して見積りを行った。端面が剥き出しの場合には、ポンプ光強度が $0.1\text{J}/\text{cm}^2$ を超えた辺りから散乱が起きている。それに対し、液滴レンズを装着させた場合には、 $0.25\text{J}/\text{cm}^2$ を超えた辺りから散乱、即ち破壊が起きている。従って、端面が剥き出しの場合よりも液滴レンズを装着させた場合の方が、破壊強度が数倍増加していることが分かる。

Fig.9、Fig.10 の実験結果から、液滴レンズでファイバ端面をカバーすることにより損傷強度が増加することが分かった。

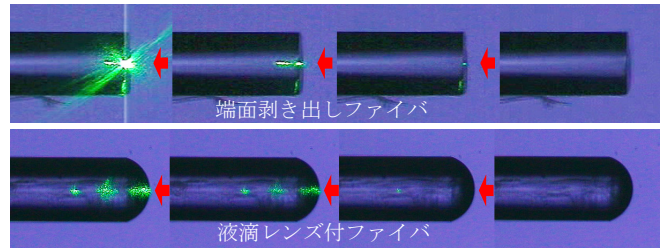


Fig.9 高強度超短パルス光による光破壊の瞬間

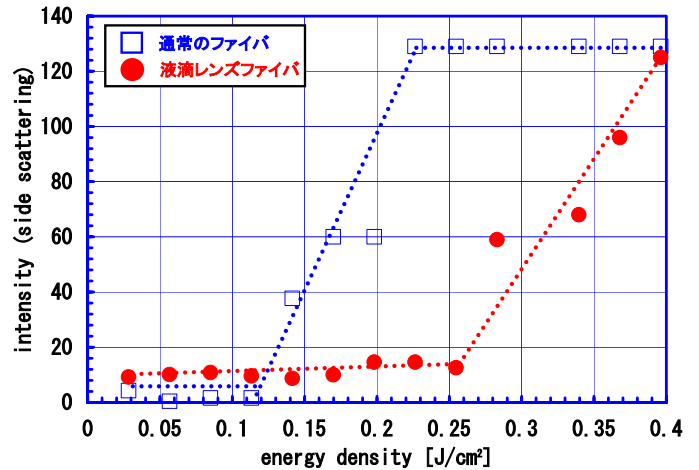


Fig.10 ファイバ端面の光損傷の測定(パルス幅は 100fs)

5.3 液滴レンズ自己修復機能の観測

固体レンズの場合、レンズが欠けたり割れたりすればもう使い物にならないが、液体のレンズの場合にはそうではない。そこで、高強度超短パルス光を液体レンズの一部が気化するまで照射させて、その後復元するかどうか観測する。

ポンプ光の強度を $0.2\text{J}/\text{cm}^2$ まで上げて液滴レンズに照射し続けた結果、Fig.11 のような様子が観測された。液体内で光損傷が起きて気泡が発生するもの(図中 b,c,d,e)、その後、気泡が消え元の形状(a)に戻っていることが分かる。端面が剥き出しの場合には、端面が破壊されてしまえば、その部分でポンプ光は散乱し、それ以上ファイバ内部に光は伝搬しない。しかし液滴レンズの場合には、吸収が起こり液体の一部が気化しても、その後再び元の形状に戻ることができるので、レンズとしての機能を維持したまま、ファイバ内部に光を伝搬させることができる。このことから、液滴レンズが自己修復機能を持つということが分かった。

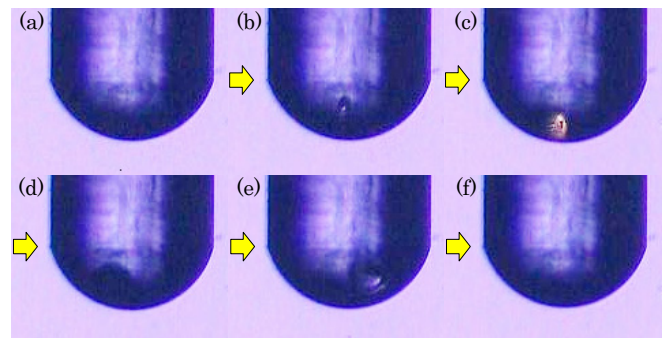


Fig.11 液滴レンズの自己修復効果の観測。高強度超短パルス ($0.2\text{J}/\text{cm}^2$ 、パルス幅 100fs) を照射。(a) → (f)の順に時間が経過している。

6. 液滴レンズの PC ファイバ上作製

6. 1 エアホールによる毛細管現象

Fig.3 で示した液滴レンズ作成手順を、今度は PC ファイバ端面で再現すると Fig.12 のようになる。最後の写真から明らかのように、シリコンオイルがエアホールに吸い込まれてしまうため、液滴レンズが作製されていない。これは、エアホールによる毛細管現象が原因である。毛細管現象とは、液体中に立てた細い管内を液体が壁を濡らすか（あるいは濡らさないか）に応じて上昇（あるいは下降）する現象である。液体が毛細管内に吸い込まれる高さは、液体の表面張力と、液体と壁との濡れ易さで決まってくる。Fig.12 の場合だと、表面張力とエアホール内にシリコンオイルが吸い込まれたときの全質量が釣り合うまで、シリコンオイルは吸引される。



Fig.12 PC ファイバ端面にシリコンオイルを塗布

6. 2 毛細管現象抑制のための3つのアイデア

毛細管現象を抑制する方法として、次に挙げる3つの方法を考えた。

- (A)出力側をガラス基盤で密閉させる方法
- (B)入射端面に薄いガラス膜を作成する方法
- (C)エアホールの内壁を撥油処理する方法

(A)の方法は、液滴レンズを作製する前に出力側を密閉させて、エアホール内部の圧力を利用して毛細管現象を抑制するやり方である。ガラス基盤を用いる理由は、出力光を透過させるためである。もし内部の圧力が表面張力よりも大きければ、毛細管現象による吸引を止めることが可能である。(B)の方法は、紫外線ランプによる薄膜形成を用いて、入射端面を覆う薄い膜を作成するやり方である。エアホールを覆う薄いシールを作れば、液体の侵入を防ぐことが可能である。(C)の方法は、エアホールの内壁を撥油処理させるやり方である[6]。もし、液体と内壁とが全く濡れないならば、液体は吸引されない。従って、毛細管現象を止めることが可能である。(A),(B),(C)の方法を端的に表現した図を Fig.13 に示す。

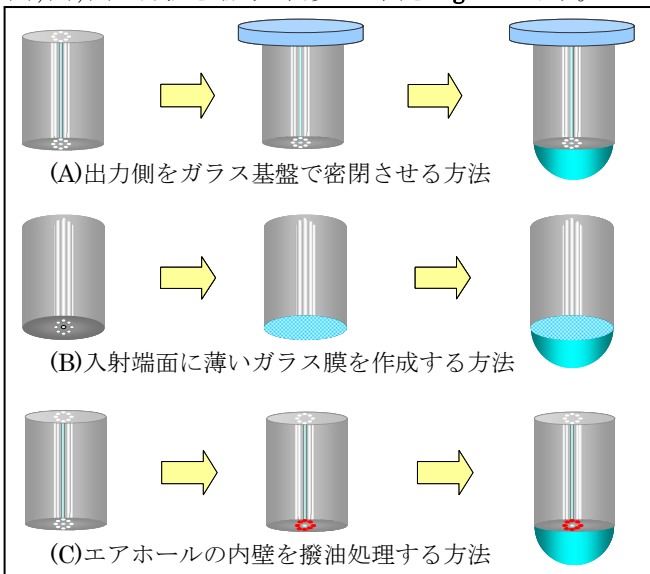


Fig.13 毛細管現象抑制のための3つのアイデア

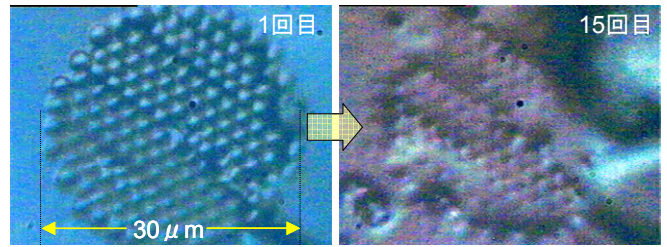


Fig.14 D₂ ランプ照射により薄いガラス層を作製 (方法(B))

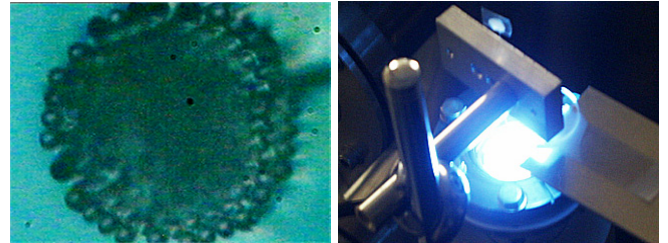


Fig.15 薄いガラス膜が破壊 ※紫外線ランプ照射の様子



Fig.16 PC ファイバ上に液滴レンズを作製することに成功

6. 3 アイデアの実行及び結果

(A)の方法を実行してみたが、シリコンオイルの侵入を防ぐことはできなかった。エアホール内部の圧力だけでは、毛細管現象を抑制することはできなかった。次に(B)の方法を試してみると、Fig.14 のように全てのエアホール部分を塞ぐ膜のようなものが得られた。これは、表面張力が小さいタイプのシリコンオイル(KF-96L-1cs)を使用して、PC ファイバに塗布→D₂ ランプで照射、という工程を15回繰り返したものである。1回目と比較して15回目では薄いガラス層が積層されている様子が観測できる。事前に出力側を密閉していた端面を開放してやると、Fig.15 のように薄いガラス層が破壊されてしまった。従って、この方法では完全なガラス層を形成することはできなかった。

次に(C)の方法を試してみた。撥油処理剤(パラックコート、東京製品開発研究所)をPCファイバ入射端面に塗布させ、その後オープンで90分間(設定100°C)加熱させた後、シリコンオイルを塗布させてみた。すると Fig.16 に掲載したように毛細管現象は抑制されて、端面に液滴レンズが作製された。

6. 4 撥油処理剤の検討

エアホールの内壁を撥油処理するための撥油処理剤について、幾つかの製品を試してみた。最初に平面ガラス板の表面を撥油処理剤でコーティングし、その上からシリコンオイルを垂らす。次にコーティングされた基盤とシリコンオイルとの接触角を調べて、撥油効果の比較を行った。合計5種類の撥油処理剤について調べた結果を Fig.17 に並べてみた。濡れにくいものほど接触角が大きいので、シリコンオイルに対してはパラックコート(接触角78°)の撥油効果が一番大きいことが分かった。他に分かったことは、シリコン系撥油処理剤はシリコンオイルには向いていないということである。Fig.17 の下段に示した2種類の撥油処理剤は、いずれもシリコン系である。逆に上段のパラックコート以外の撥油処理剤はフッ素系である(但し、パラックコートはシリコン系撥油処理剤なので例外である)。

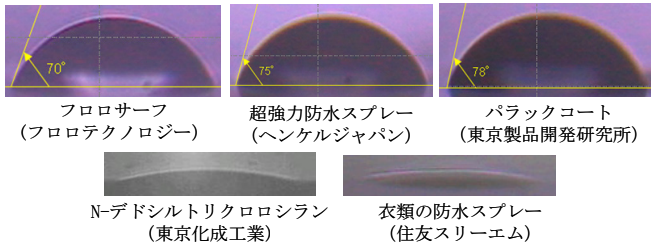
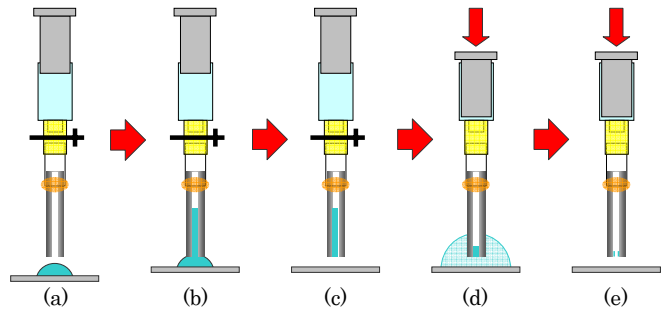


Fig.17 撥油処理剤の製品比較

6. 5 エアホール内壁の撥油処理工程

Fig.18に撥油処理工程の手順を図示した。エアホール内部の圧力を制御できるように、PCファイバの端面にはシリンダを接続させており、PCファイバとの接続は、キャピラリ管を介している。内径1.25mmのキャピラリ管の筒の中に、直径110 μ mのPCファイバを挿入させ、隙間をエポキシ樹脂で埋めて、さらにキャピラリ管の反対側にゴムチューブを取り付けシリンダに接続させた。Fig.19に掲載した写真は、実際にFig.18の撥油処理工程に従ってPCファイバの撥油処理を行ったときの様子である。写真(b)では撥油処理剤をPCファイバ端面に塗布した為、撥油処理剤がエアホール内部に侵入している。このときゴムチューブに栓をししないと、撥油処理剤がさらに内部まで侵入してしまい、後になってシリンダで撥油処理剤を吐き出そうとしても吐き出すことができない。栓をしない場合には大量の撥油処理剤が毛細管現象により一気に吸い込まれるため、エアホール内部で固まってしまうのが原因だと考えられる。写真(c)は、オープンで20分ほど加熱させると、吸い込まれた撥油処理剤が自然と降りてくる様子捉えたものである。シリンダで圧力を加えなくても中から撥油処理剤が出てくる理由として、エアホール内部の圧力が温度差によって高められて押し出されていることが考えられる。しかし、注意深く撥油処理剤の動きを観察してみた結果、撥油処理剤が圧力差で押し出されているというよりは、むしろエアホールの内壁を滑り落ちているという動きをしていた。従って、エアホールの内壁が撥油コーティングされて、残りの余分な撥油処理剤が、重力の影響で下方に落ちていると考えられる。写真(d)は、ゴムチューブの栓を開放させた後に、シリンダでエアホールの内圧を高めたときの様子である。エアホール内部にあった残留撥油処理剤がすべて外部に押し出されて、撥油処理剤の泡が生じている様子が観測される。この状態から、PCファイバが固定されているXYZマイクロステージを用いて、PCファイバを上方にスライドさせてこの撥油処理剤の泡から抜き取り、次にガラス基盤上の撥油処理剤が付着していない部分を使って、PCファイバ端面と擦り合わせるように接触させ、端面表面に付着している余分な撥油処理剤を除去する。この作業を行うことで、写真(e)のような状態が得られる。尚、写真(b)と(c),(d)とを比較すると、エアホール部分のイメージの大きさが少し変化している((c),(d)の方が(b)よりも大きい)。これは、オープンの加熱によりPCファイバ、ガラス基盤等を固定するフォルダが温められ、フォルダの高さを調整するねじ部分が若干緩んだことが原因である。ねじが緩むことによりPCファイバの位置が僅かに移動し、対物レンズのフォーカスが外れてしまう。Fig.20が、PCファイバを撥油処理した後(Fig.19(e)の写真)のファイバ断面の写真である。コアがはっきりと見えており、端面を余分に覆っていた残留撥油処理剤もきれいに無くなっている。

6. 6 エアホール内壁撥油処理の理論的側面



- (a)撥油剤をガラス基盤の上に塗布させる。ゴムチューブに栓をする。
- (b)撥油剤とPCファイバ端面を接触させる。
- (c)オープンで加熱させる(設定100度、20~30分程度)。
- (d)ゴムチューブの栓を外し、シリンダの内圧を高めながらエアホール内部の残留撥油剤を全て除去する。
- (e)端面にわずかに撥油剤が残るようにシリンダで調整する。残した撥油剤を乾燥させるために、さらにオープンで加熱させる。

Fig.18 エアホール内壁の撥油処理工程

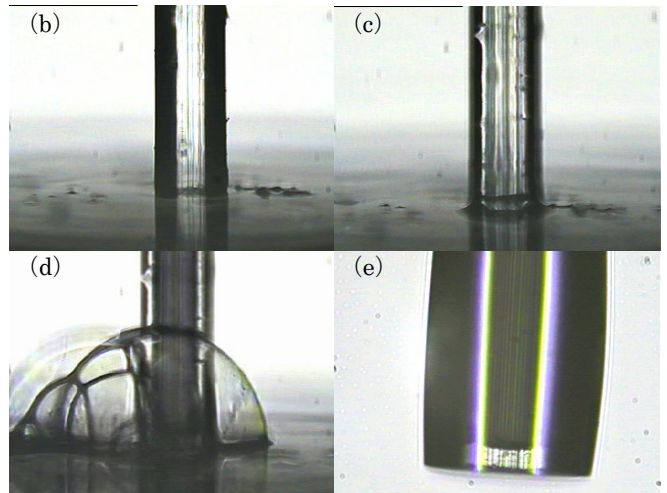


Fig.19 撥油処理中のPCファイバの側面写真。
(b)~(e)はFig.18の処理工程に対応。

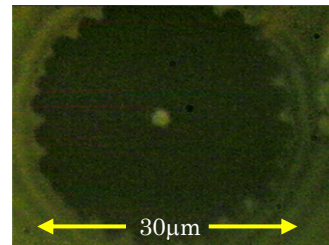


Fig.20 撥油処理後の端面の様子

エアホールの内壁を撥油処理剤でコーティングすることにより、毛細管現象を止めることができたメカニズムについて、考えてみることにする。先程も述べたが、毛細管現象は液体と毛細管の内壁との濡れ易さで決まり、表面張力と毛細管内に液体が吸い込まれたときの全質量が釣り合うまで、液体は毛細管内に入り続ける。この関係を図示したのがFig.21である。図より、表面張力 γ と液体の全質量との釣り合いの式を作ると、次式のようになる(表面張力=重力)。

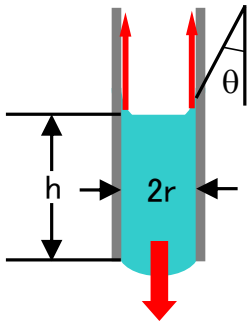


Fig.21 表面張力と重力の釣合

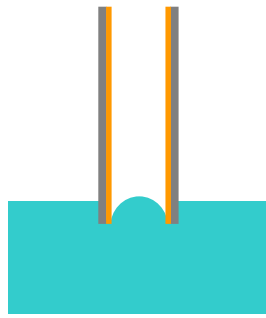


Fig.22 内壁を撥油処理

$$2\pi r \gamma \cos \theta = \pi \rho h r^2 g$$

但し、接触角 θ 、液体の密度 ρ 、重力加速度 g とする。シリコンオイル (KF-96-100cs) の表面張力 $\gamma=20.9$ mN/m、密度 $\rho=0.965$ g/cm³ (以上カタログのデータ値)、エアホールの半径 $r=1.0\mu\text{m}$ として、上式から釣り合う液体中の高さ h を求めると4.4mになった。使用したPCファイバは150本のエアホールを持っているので、150本4.4m分の体積は、半球液滴レンズで換算すると実に3000個分である。このことから、直径 $1.0\mu\text{m}$ エアホールの毛細管現象の威力の大きさを把握することができる。

Fig.22は、エアホールの内壁を撥油コーティングした場合の予想図である。撥油コーティングすることで、液体と内壁との濡れ性をなくすことができるので、毛細管現象は吸引力ではなく、逆に斥力として働く。

6. 7 超短パルスレーザーによるカップリング試験

この液滴レンズ付PCファイバにTi:Sapphireレーザー(波長745nm、パルス幅100fs)を照射させて、コアにカップリングの様子を観測するために、2つのCCDカメラでPCファイバ端面の液滴レンズを観察した。さらに、コアにカップルしたときの出力光をスペクトルアナライザで計測を行った。図中のCCD(※1)カメラは入射端面の断面を観測するためのもので、ポンプ光を入射端面に照射させたときに発生する反射光を使い、それを $f=1000$ のレンズで絞ってCCDカメラに像転送している。CCD(※2)は入射端面の側面を観測するためのもので、2つのCCDカメラで撮影した写真がFig.23である。ファイバ長10cmの場合と85cmの場合の液滴レンズ付PCファイバのスペクトルをFig.24に重ねて表示させた。また、液滴レンズ付PCファイバのカップリング効率の測定も行い、その結果をFig.25に示した。高強度のパワーを入れる場合には、入射強度を落とした状態でアライメント調整を行い、入射スポット位置がコアに当たっていることを確認した上で入射強度を上げる必要がある。アライメント調整を慎重に行えば、液滴レンズをPCファイバに装着させることにより、入射パワー200mW強の光でも光破壊されないということが本実験により確認された。

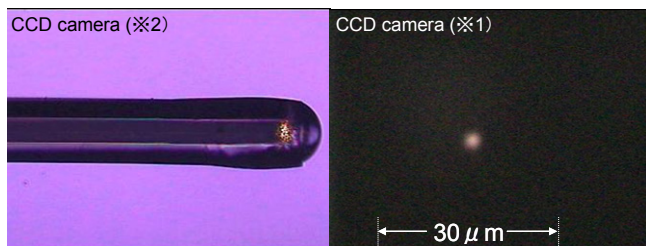


Fig.23 液滴レンズ装着PCファイバの側面写真(※2)と断面写真(※1)。

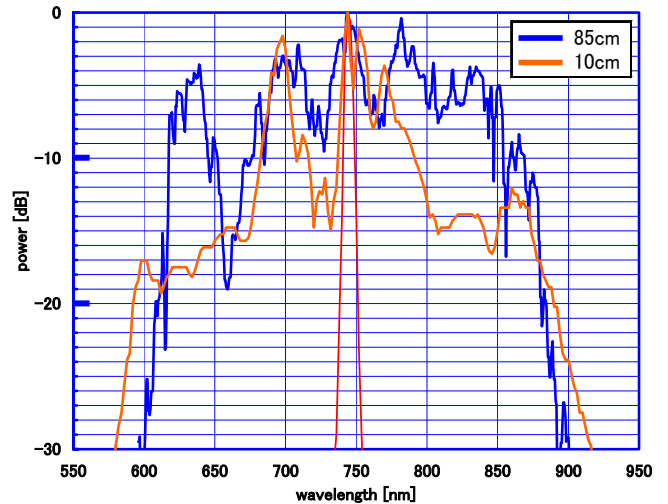


Fig.24 液滴レンズ装着PCファイバのスペクトル

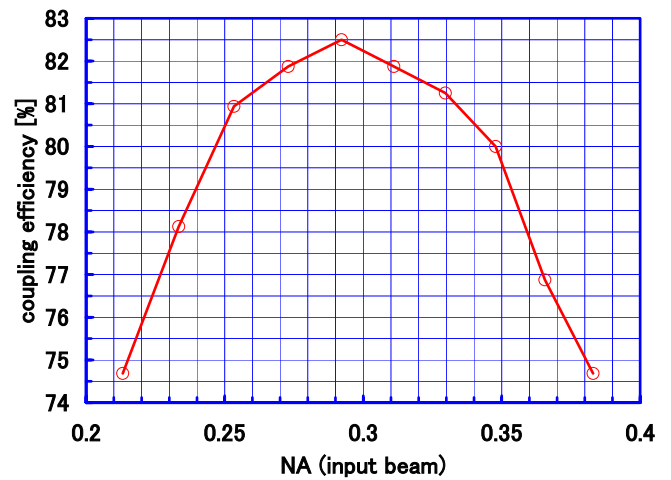


Fig.25 液滴レンズ装着PCファイバのカップリング効率

7. 研究成果のまとめ

- (1) PCファイバの端面に液滴レンズを作成する手法を開発(撥油効果を用いた毛細管現象の抑制)
 - (2) 液体レンズの利点を確認
 - (a) 振動の影響は少ない
 - (b) 端面損傷強度が増加する
 - (3) 高出力白色フェムト秒光源の開発
- 以上、上記3つのことを確認することができた。

8. 参考文献

- [1] J.K.Ranka, R.S.Windeler, and A.J.Stentz, "Visible continuum generation in air-silica microstructure fibers with anomalous dispersion at 800nm," Opt.Lett.25, 25-27(2000)
- [2] V.L.Kalashnikov, P.Dombi, T.Fuji, W.J.Wadsworth, J.C.Knight, P.S.J.Russell, R.S.Windeler, A.Apolonski, "Maximization of supercontinua in photonic crystal fibers by using double pulses and polarization effects," Appl. Phys. B 77,319-324(2003)
- [3] Gyeong-Jun Kong, Jinchae Kim, Hae-Young Choi, Joo Eun Im, Byung-Hyuk Park, Un-Chul Paek, and Byeong Ha Lee, "Lensed photonic crystal fiber obtained by use of an arc discharge," Opt.Lett.31,894-896(2006)
- [4] Limin Xiao, Wei jin, and M.S.Demokan, "Fusion splicing small-core photonic crystal fibers and single-mode fibers by repeated arc discharges," Opt.Lett.32, 115-117(2007)
- [5] 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)
- [6] 土屋健介、中尾政之, "ピコリットル分注のためのマイクロディスペンサの開発," 日本機械学会第14回バイオエンジニアリング講演会講演論文集 (No.02-04, pp.207-208, 2002)