

ウェット光学素子の開発

米田研究室 石亀 嵩洋

1. 序論

現在、様々な原理、理論を応用した光学素子が開発されており、その中でも自由表面を持つ性質を応用したウェット光学素子は最も期待されている光学素子の1つである。ウェット光学の主なテーマは自由表面の形状を如何にして制御するかという事である。その手法の一例として、電場の印加、液体の粘性の調節、濡れ性等の界面と自由表面との間の状態を変化させる方法などが挙げられる。

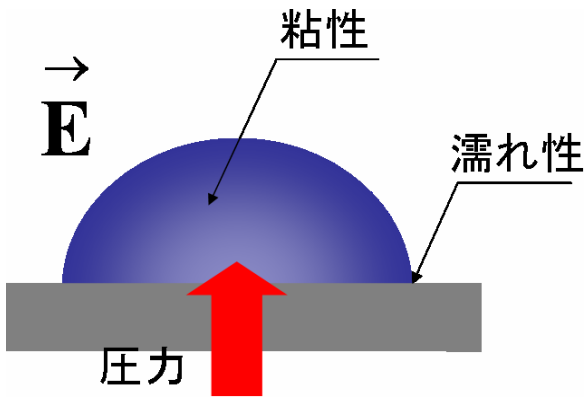


Fig. 1 ウェット光学の概念図。

ウェット光学については現在、種々の形で研究、開発されており、その中には光学製品として実用化されているものも存在する。ウェット光学に関する研究としては、例えば、電気的濡れ現象により形状を変化させた液滴をレンズとして用いる方法[1]や、2種類の異なる液体に加わる屈折力を応用して、液体を微小カメラ用の焦点調節可能なレンズとして用いる方法[2]などが提案されている。ウェット光学素子の最大の特徴は構成物質が液体であることで、それによって様々な利点が見られる。まず、液体の表面張力が働くことによって、固体の光学素子のように傷が付くなどして損傷することがない。また、僅かな量の液体でもレンズの役割を果たすことができるため、ウェット光学素子を用いることで撮像系の大幅な小型化

が可能になる。さらに焦点距離調節に用いる場合、固体レンズのようにレンズを物理的に移動させる必要がないため、消費電力が抑えられるという利点もある。

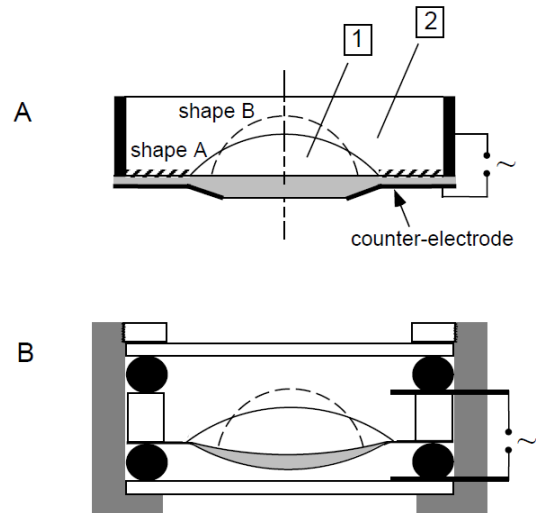


Fig. 2 電気的濡れ現象による焦点距離調節レンズ。

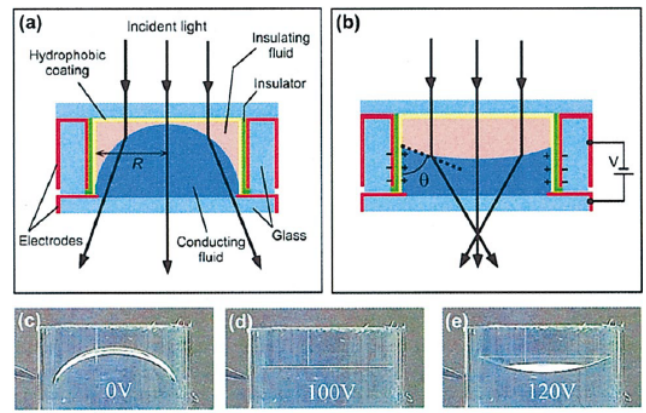


Fig. 3 屈折力を応用した焦点距離調節レンズ。

本研究では、界面と自由表面との間の状態を変化させる方法と、自由表面の内外に圧力差を印加する方法の2つのアプローチから、シリコンオイルを用いたウェット光学素子の提案をし、実際にその開発を行った。ここで、シリコンオイルを用いた理由は、その屈折率が約 1.4 となっておりガラスと同程度である事と、可視光領域における透過率がほぼ 100%となっている事であり、光学素子としての利用に適しているからである。

2. 界面の状態変化による方法

界面に撥油処理を施すことでシリコンオイルに対する濡れ性を変化させ、表面形状の制御を行った。ここで、撥油処理を施す為には界面の洗浄が重要になってくるが、本研究では、その端的なものとしてフォトニック・クリスタル・ファイバ(PCF)を使用した。PCFはコアの周囲にエアホール群を周期的に配置させた幾何学的構造を持ち、更なるそのエアホール径も $2\ \mu\text{m}$ と非常に微細な構造となっている[3]。この構造ゆえに精確な洗浄が困難だが、そのPCFを綺麗に洗浄できれば、ウェット光学の要であるクリーン性を達成することができる。つまりその様な洗浄システムは他のウェット光学素子を開発する際に於いても、有効性があるということが言える。

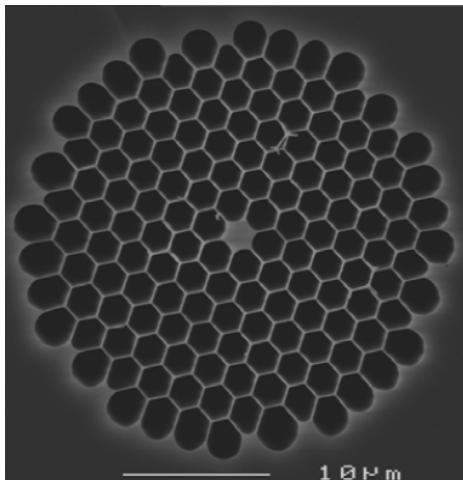


Fig. 4 PCFの断面図(参考文献[3]より)。

PCFにシリコンオイルを付着させる際、PCFの持つ構造の為に非常に強力な毛細管現象が働く。これを抑制するためには撥油処理が不可欠となり、その撥油処理を確実に施すための洗浄が重要となる。つまり、PCFにシリコンオイルを付着させることは、クリーン性を確認するという意味を持つ。ここで、PCFの毛細管現象について考える。Fig. 5は模式図である。液体は、その表面張力と、液体に働く重力が釣り合うまで毛細管現象によってエアホール内に吸入される。このとき、液体が吸入され、釣り合う高さ H は次のような式で表すことができる。

$$H = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r} \quad \dots \text{式 1}$$

この式にPCFとシリコンオイルの値を代入すると、 H は約 $3\ \text{m}$ にもなり、PCFの毛細管現象が如何に強力であるかということが分かる。

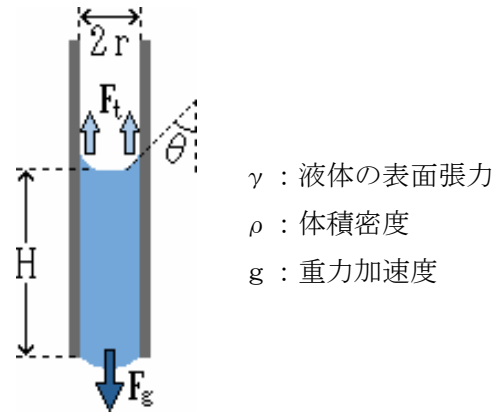


Fig. 5 PCFの毛細管現象。

このように複雑な構造を持つPCFの洗浄を行うためには、通常の洗浄システムを用いたのではクリーン性を達成することは困難である。洗浄に広く使用されている、超音波洗浄機を例として考えてみる。超音波洗浄機は超音波によって洗浄液を振動させ、対象物の周囲を洗浄液が行き来することで洗浄を行う。このとき、Fig. 6(a)のように超音波の波長に対してエアホール径が十分な大きさを持つ場合は、超音波がエアホール内に入射し、洗浄を行うことができる。しかしPCFの場合、エアホール径は $2\ \mu\text{m}$ となっており、超音波の波長の数 mm に比べて極めて小さい値になっている。このため超音波はエアホール内に上手く進入することができず、結果的に洗浄は不十分なものになってしまう。

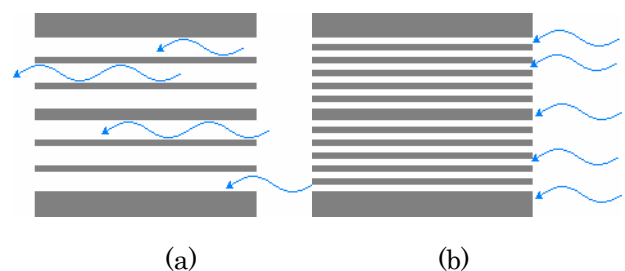


Fig. 6 超音波洗浄機による洗浄の模式図。超音波の波長に対してエアホール径が(a)十分な大きさを持つ場合(b)小さい場合。

PCF の洗浄を行う為の洗浄システムに要求されることは、まずエアホール内の洗浄液が確実に移動し洗浄を行うこと、そして複数本を同一条件で洗浄できることである。これは同一条件で洗浄することによって、再現性の高いサンプル作製が可能になるからである。

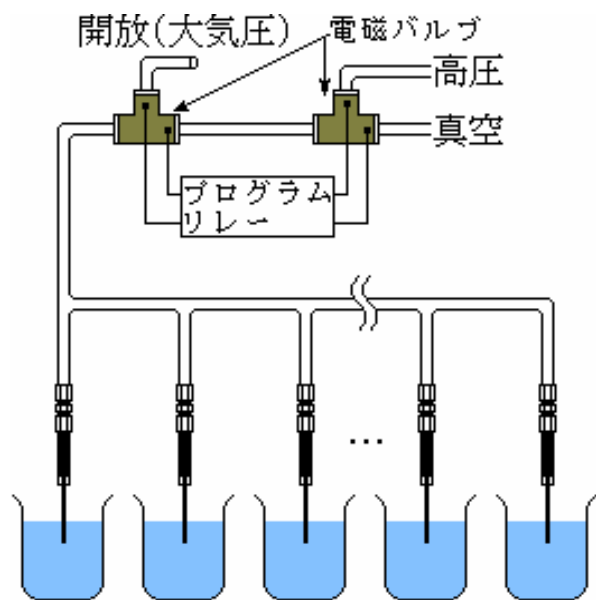


Fig. 7 自動洗浄システムの概念図。

そこで、Fig. 7 に示した自動洗浄システムを構築した。これはエアホール内の圧力を変化させることにより、洗浄液を直接吸入、排出し、エアホール内壁の洗浄を行う。圧力弁の開閉にはマルチポート電磁バルブを用い、二つのバルブの開閉タイミングは予めプログラムを組んだプログラムリレーによって制御されている。ここで、電磁バルブの高圧側は窒素ガスボンベに、真空側は真空ポンプに接続されている。吸気圧は 120 mbar、排気圧は 3900 mbar で、洗浄液の吸入と排出を交互に行う一つのサイクルを1時間に100回繰り返すようにプログラミングした。また、この洗浄動作の他に、排気のみを継続して行う連続排出動作も可能である。

洗浄液の吸入、排出の動作を自動化することにより、洗浄液がエアホール内に浸入する際、その量を常に一定値に保つことが可能になっている。洗浄液の吸入量が一定でなく毎回異なる値になってしまうと、多量の洗浄液を吸入した際にそれ

までは洗浄されていなかった部分にまで洗浄液が浸入する。その後排出を行う時に、既に洗浄液が何度も往復して洗浄されていた部分を、新たに洗浄液が浸入した部分の汚れを通過し、それまでの洗浄が無意味になってしまう。また、洗浄の自動化による他の利点は、吸入と排出を交互に行う動作を多数回行うことができるという点、またその動作が安定しているという点である。数回の動作であればマニュアルでも可能だが、ウェット光学素子の為の洗浄となると現実的には非常に困難で、自動化は必須であると言える。

次に、自動洗浄システムを用いて洗浄を行った PCF に撥油処理を施し、シリコンオイルの液体レンズを装着した。このとき、撥油剤の吸入量を変化させ、それによる表面形状の違いを観測した。撥油剤の吸入量は、ファイバ下端からの液柱の高さで変化させた。その時の様子を Fig. 8 に示す。また、Fig. 9 は撥油剤の吸入量に対する、液体レンズの曲率半径の変化を表したグラフである。

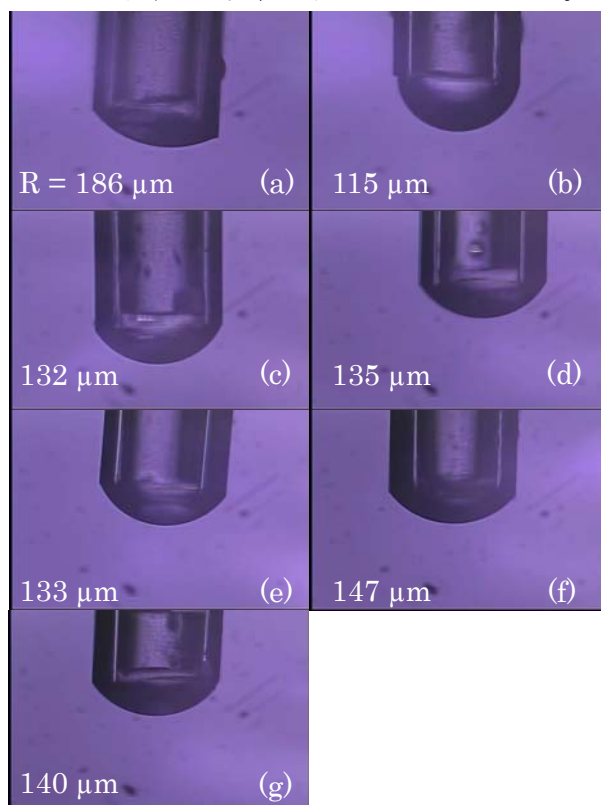


Fig. 8 PCF に装着した液体レンズ。撥油剤吸入量はファイバ下端から、(a)~(g)の順に各々、5 mm, 5 mm, 4 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm, 全排出。図中の数値は液体レンズの曲率半径。

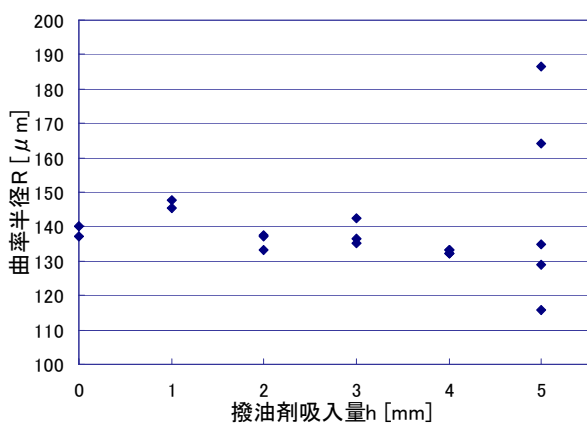


Fig. 9 撥油剤の吸入量に対する液体レンズの曲率半径の変化。

以上の結果を見ると、撥油剤の吸入量が多いほど曲率半径が小さく、半球状に近い形状の液体レンズが得られている。これは、加熱時にエアホール内に残っている撥油剤の量が多いほど撥油効果は強いものが得られるという事が考えられ、さらに吸入量が多いほど加熱、乾燥後までに許容できるエラーバーの範囲が大きく、撥油剤が定着しやすいという事を示している。しかし逆に、Fig. 8(b)のように小さな曲率半径の液体レンズが得られる一方、撥油処理の一つでも穴があると Fig. 8(a)のように曲率半径が大きくなってしまいう可能性もふくんでいるのである。

また、液体レンズを装着した PCF に赤色発光レーザーモジュールを用いてレーザー光を入射し、この液体レンズがエアホール内部に浸入することなく、きちんとレンズとして機能していることを確認した。

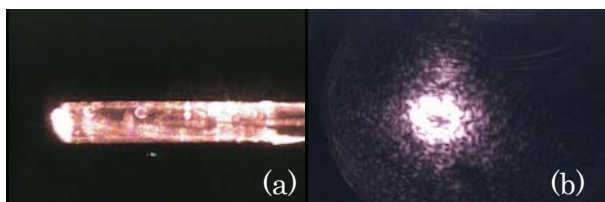


Fig. 10 液体レンズ装着 PCF へのレーザー光入射。PCF の(a)側面、(b)出力側の様子。

3. 内外の圧力差による方法

PCF のエアホール内と外部との間に圧力差を

設けることで、液体レンズ表面形状の制御を行った。エアホール内を外部より僅かに高压にすることで内側から膨張させ、レンズ形状を変化させた。このとき、エアホール内と外部の圧力差は 10 mbar である。加えて、この液体レンズが耐える限界圧力差を測定したところ 80 mbar となった。

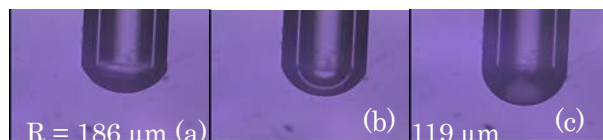


Fig. 11 圧力印加による表面形状の制御の様子。(a) 平常時、(b)圧力印加で膨張し始め、(c)一定の大きさで安定する。

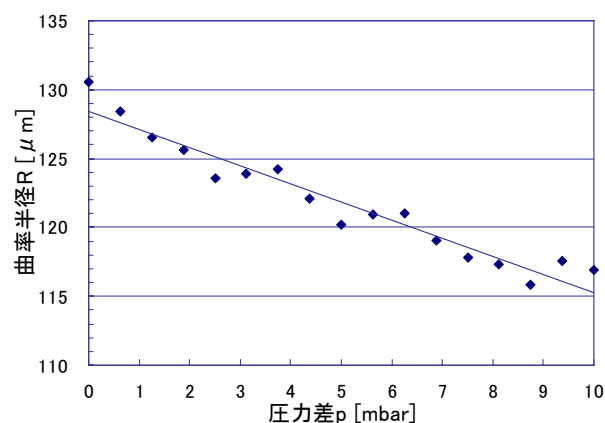


Fig. 12 内外の圧力差と液体レンズの曲率半径。

4. 結論

自動洗浄システムの導入によりウェット光学の要であるクリーン性を達成し、撥油処理によって界面の濡れ性を変化させた液体レンズ装着 PCF を作製した。このとき、撥油剤を多く残した方が撥油効果が大きくなりやすく、球面の極率半径が大きいものが得られることが分った。さらに、エアホール内の圧力変化で表面形状を制御可能な圧力印加液体レンズを開発し、焦点調節への応用の可能性を確認した。

参考文献

- [1] B. Berge *et al.*, *Eur. Phys. J. E* **3**, 159 (2000).
- [2] S. Kuiper *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 1128 (2004)
- [3] blazephotonics, <http://www.crystal-fibre.com/datasheets/NL-20-735.pdf>