

ナノ光ファイバーの作製と、それを用いた量子ドットの特性評価

森永実 研究室 竹村 武士

平成 29 年 3 月 10 日

1. 序論

1986 年に A.Ashkin によって初めて実証された光ピンセットは生物学、物理学、化学などにおいて広く利用されてきた[1]。現在では、金微粒子や、量子ドットといったナノスケールのトラッピングなど用途が広がっていき、トラップの精度が上がるのが期待されている。生物学では、光ピンセットを用いた細胞、ウイルス、バクテリア、DNA 分子の研究に応用されている。

通常の光ピンセットではレーザービームを集光して勾配力を得ているため、強い勾配力を得るためには高 NA の対物レンズ、顕微鏡が用いられる。そのため、光ピンセットの実験には装置の準備が必要であった。この解決策として光ファイバーを用いた光ピンセットが 1993 年に開発された[5]。光ファイバーを使用することで、粒子の取り扱いが非常に簡単になり、微小粒子や生体分子の捕獲、移動などの実用化に適している。しかし、光ファイバーのピンセットは対物レンズによるそれと比較すると集光力が弱いため、勾配力が減少し三次元でのトラッピングが難しいとされており、レンズ状の先端を持つファイバーチップなども開発されてきている[11]。

我々はより強い勾配力を持つトラッピングを可能にするテーパードファイバーチップの開発を行っている。理想ファイバー端のシミュレーションをし、断熱性のあるフ

ァイバー構造を取ることで、伝搬ロスなく強い集光力を持つファイバーチップを作成することできると考えられる。理想的なファイバーチップの作成をし、生体粒子などよりもさらに小さい発光性金属粒子などのナノスケールでのトラッピングを目指している。

2. 原理

2.1 テーパードファイバー

テーパードファイバーは光ファイバーの断面の径を細くしたものであり、細くする過程で左右のテーパー部分が生じる。図 2.2 はテーパードファイバーの模式図を表しており、コア-クラッド伝搬部、テーパー部、クラッド-エア伝搬部の 3 つに分けられる。このテーパー部では、コア部に閉じ込められていた伝搬モードの染み出しが大きくなるため、モード変換が起こり、伝搬効率が悪くなる。このロスは、光軸に対する先細り角度 Ω が増加するほど大きくなる。角度 Ω を用いてテーパー部の長さ z_t を表しており、表すと

$$z_t = \frac{R}{\tan(\Omega)} \quad (2.1)$$

となる。ここで R はテーパー部のファイバーの半径である。 R における二つのモード間のビート長 z_b は

$$z_b = \frac{2\pi}{\Delta\beta} = \frac{\lambda}{n_{eff,1} - n_{eff,2}} \quad (2.2)$$

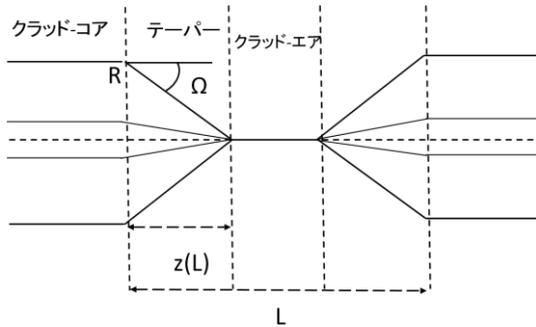


図.1 テーパー角

テーパードファイバーの長さがビート長に比べて十分長い時($z_t \gg z_b$)にはロスが少なくなり、ファイバー中のモード変換は断熱的になる。

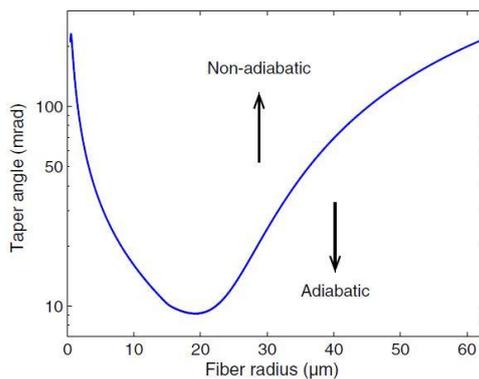


図.2 テーパー角の断熱、非断熱性[3]

図.2は横軸がファイバー半径、縦軸がテーパー角度となっており、モード変換が断熱になるためのテーパー角度の限界値を表している。グラフ線より上の角度であるときにモード変換は非断熱的になり、下の角度であれば断熱的になるため、伝搬効率を上げるためのファイバー形状の目安となる。また、式(2.10)より入射波長の変化によって断熱角度が変化するため、伝搬させる光の波長に適したテーパードファイバーを作る必要がある。

2.2 光ピンセット

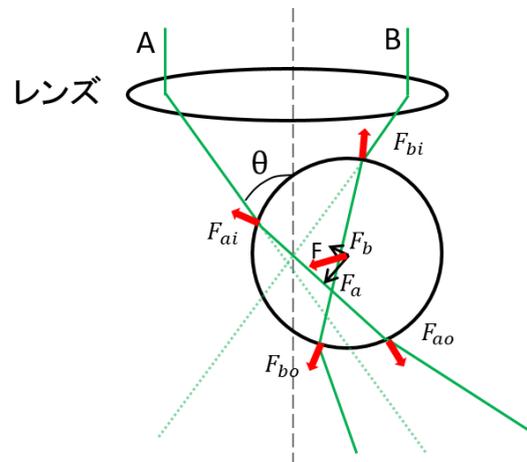


図.3 テーパー角の断熱、非断熱性

Mie 散乱領域は、粒子の半径 a が波長よりも大きい場合を表す。対物レンズで集光された光が粒子に照射する時、光線 A、B の様に光軸に対して角度 θ をなして入射する光がある。光線 A では微粒子に入射する時に境界面に生じる力 F_{ai} と、微粒子を出る時に境界面に生じる力 F_{ao} の合力は F_a となる。同様に光線 B でも F_b が生じ、 F_a と F_b の合力 F は対物レンズの光軸方向に引き寄せられる力となる。A-B 間に存在する光線の屈折によって働く力を足し合わせたものが、微小球全体に働く力となり、微小球はスポット付近にトラップされる。ただし、微小球がスポットよりも下に位置している場合は、屈折率の大小にもよるが、スポット付近に引き寄せる力が弱く、反射によって微粒子が押し出される力が強くなるため、トラップが困難になる。

微粒子の大きさが波長よりも小さい領域においては、サブミクロン、ナノメートルサイズの微小球は、不均一な電場中を移動する誘電双極子として考えられる。この場合、この双極子は力 F の勾配力が生じる。

$$F = \frac{1}{2} \alpha \nabla E^2 \quad (2.3)$$

E は電場の強度、 α は分極率である。 ∇E^2 は電場の強度に比例するため、 F のベクトル成分は光の強度が増加する方向に向く。よって 3 次元的に収束されたレーザーであれば、点双極子は対物レンズの焦点に引き寄せられていく。トラップする上で、重要になってくる、もう一つの光学的な力である F_{rad} は、粒子の表面で光子が散乱や吸収された時に起こる、粒子への放射圧であり、

$$F_{rad} = \frac{nP}{c} C_{est} \quad (2.4)$$

$$C_{est} = C_{scat} + C_{abs} = \frac{k^4 |\alpha|^2}{4\pi} + k\alpha'' \quad (2.5)$$

で表される。 P はポインティングベクトルの時間平均、 n は媒質の屈折率である。 C_{est} は吸収断面積 C_{abs} と散乱断面積 C_{scat} の合計であり、 α'' は分極率の虚数部分を表している。勾配力 F は分極率に対して比例しており、 F_{rad} は分極率の 2 乗に比例しているため、適切な分極率を持つ粒子材料の選択が、光トラップの重要な要素となる。

$$\alpha = 3V \frac{\epsilon_p - \epsilon_m}{\epsilon_p + 2\epsilon_m} \quad (2.24)$$

分極率は式(2.24)で表される。 V は粒子の体積、 ϵ_p 、 ϵ_m はそれぞれ粒子と溶媒の誘電率である。ただし、これは粒子の径が波長に対してかなり小さい場合のみ有効となる ($d \ll \lambda$)。

2.3 ファイバー光ピンセット

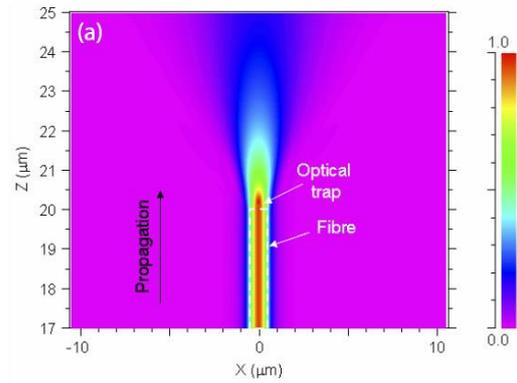


図.4 ファイバーチップの電場強度分布[4]

図.4 はサブミクロンまでテーパ化した光ファイバー中の電場の強度を表したものである[21]。ファイバー先端から放出された光はファイバー端から離れるにつれて、強度が減少していくが、先端部分ではファイバーから出たにもかかわらず、強い強度の電場が存在していることがわかる。そのため、先端部分での勾配力が高まり、粒子が先端でトラップされるようになる。

3 実験

3.1 ファイバー径のシミュレーション

ファイバー断面から放射されるレーザーの強度分布の計算を行った。まず、ファイバー半径 a における縦方向伝搬定数 β を求めた。導波モードにおいて β はファイバーの固有方程式によって決定される。python を使用した挟み込みの計算で各半径における β の値を求め、ファイバー内外におけるレーザー強度を求めた。

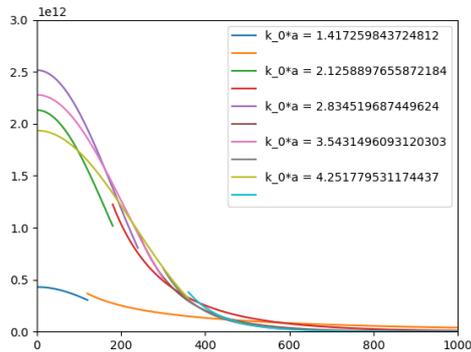


図 5. ファイバー半径 r による電場強度分布

図.5は伝搬光波長 532nm 、 $a=120\text{nm}$ (青、オレンジ)、 180 (緑、赤)、 240nm (紫、茶)、 300nm (桃、灰)、 360nm (黄土、水)、におけるファイバー内外でのレーザーの強度分布を表している。一番強度が強くなるのはファイバー中心 $r=0$ の部分であるが、外に向かっていき、ファイバー外に出たときにグラフは連続ではなくなり、ファイバー内よりも高い強度となっている場が存在する。そのため、ファイバーからの漏れ出しが大きくなり、断面の集光度が低くなる。特に $a=120\text{nm}$ では他と半径の時と比べなだらかなカーブをしており 1000nm 付近でもある程度の強度を持っているため、ほとんどの光がファイバー外に出てしまっていることがわかる。そのため、光の閉じ込めには限界があり、効率的に集光するためには波長と同等程度から半波長程度の径を持ったテーパードファイバーチップが良いと考えた。

3.2 光ピンセットの実験

微粒子をトラップするためのレーザー光源として DPSS レーザーを用いた。図は光ピンセット実験の模式図である。レーザーはビームエキスパンダーで広げられ、顕微鏡内部に入射する。顕微鏡内部に備わってい

るビームスプリッターによって対物レンズにレーザーが入射される。対物レンズの倍率は 50 倍、 NA は 0.75 の物を使用した。 1064nm カットフィルターによって不要な赤外光をカットした後のレーザーパワーは 55mW で、カバーガラス透過後の粒子に直接かかるレーザーパワーは 20mW であった。

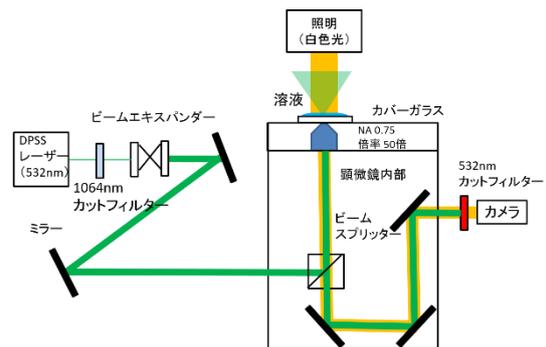


図.6 光ピンセット実験の光学系

図 7 はレーザーによってトラップされた粒子の時間経過を表している。溶液中の粒子は溶液の乾燥や、ブラウン運動などによって移動している。これをすべての径のポリスチレン球で行った結果、 10 、 5 、 2 、 $1\mu\text{m}$ の径の球でのトラップを確認できた。

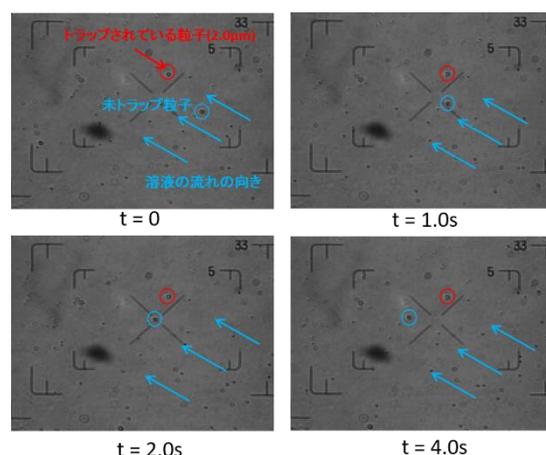


図.7 トラップされている粒子

3.3 テーパードファイバーの作製

加工にはファイバー延伸用の X ステージ①、X ステージ②、火口ノズル用の Y ステージの 3 つのステージで制御する。ステージの制御には **Arduino** を用いており、ステージの移動距離、速度、タイミングを変えることができる。ファイバー伝搬方向を二つの X ステージで制御することで、加熱距離 L を調整、左右非対称性のテーパードファイバーを作成することができる。光ファイバーは X ステージ①、②にそれぞれ彫られている溝と、上部の磁石によって挟まれ定されている。

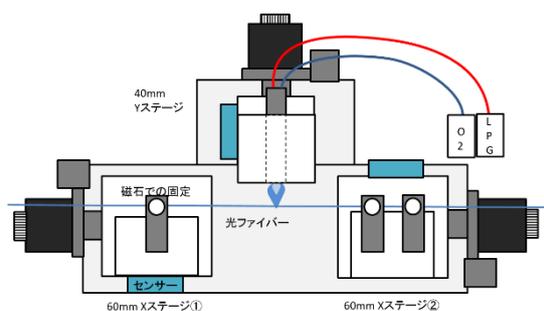


図 8 光ファイバー加工機

テーパードファイバーの作製について 2 種類の延伸方法を用いた。1 つは X ステージ①と X ステージ②を逆方向に移動させる単延伸である。この場合 L の値は最も小さくなる。図 3.12 は単延伸によって片側を 2.5mm ずつ引き伸ばしたときに作製されたテーパードファイバーの直径分布である。上部写真の画像はこのテーパードファイバーの最小径部分であり、11.2 μm であった。左右等速度、同距離延伸しているため、左右対称なテーパードファイバーが作製された。これを左右の延伸速度、延伸距離を変えることで左右非対称なテーパードファイバーを作製され、テーパー角を変化させることができる。

2 つ目の方法は両方のステージを同じ方向に移動させながら、ステージ間の距離を少しずつ離していく振動延伸である。バーナーで加熱されるファイバーの範囲が大きくなるため L の値がその振幅によって変化する。式(2.19)よりテーパードファイバーの最小径は加熱距離 L と延伸距離 Z によって決まる。 Z はステージの移動距離と等しくなるため、**Arduino** で制御することができるが、 L は実測できないため、実験結果と理論値とのフィッティングより求めた。

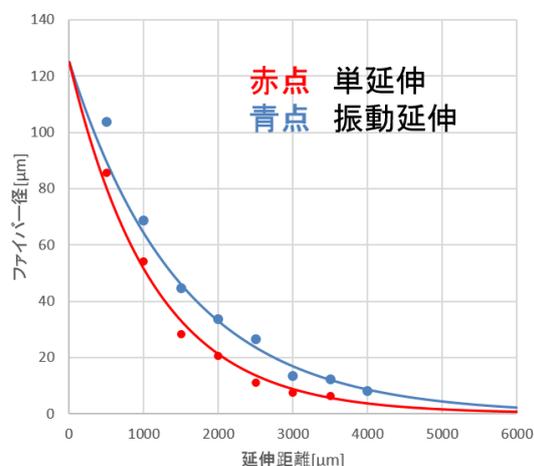


図 9 延伸距離でのファイバー径の変化

図 9 は延伸距離によるテーパードファイバーの中心部分の最小径との関係を表したものである。赤点、赤線で示す単延伸での L は 1120nm であった。振動延伸での振幅は 1.0mm に設定し、一周期で 500 μm ファイバーが伸びるように設定した。青点、青線で示されるグラフが振動延伸であり、これより $L = 1650\text{nm}$ を得た。

3.4 ファイバーチップによる光ピンセット

対物レンズによる光ピンセット実験でも使用した DPSS レーザー(532nm)を用いて、ファイバーピンセット実験を行った。加工していない状態のファイバー端から放射されるレーザーのパワーは約 15mW であった。

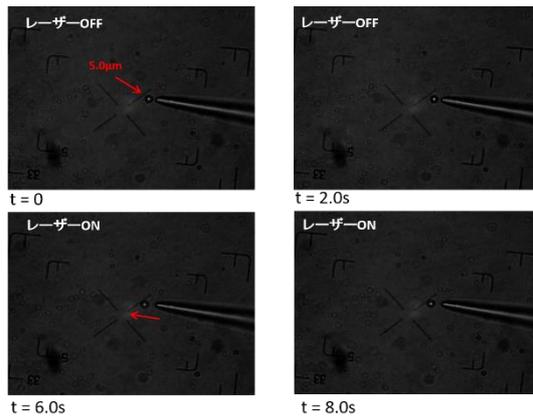


図 10 ファイバーチップでの光ピンセットの検証

図 10 の $t=0$ において、レーザーの光をカットしているときはチップ先端のポリスチレン粒子は $t=2$ になっても移動していない。レーザーをファイバーに透過させると、先端にあった粒子がチップから離れる方向に $2\sim 3\mu\text{m}$ 移動した ($t=6.0\text{s}$)。これは粒子がレーザー光を反射したことにより、反作用の力を受け、移動したものだと考えた。ファイバーチップから放射される光は先端から広がっていくがチップ先端の形状がなだらかな円状であったため、光軸方向の成分が強くなり、粒子が押し出されたと考えた

結論、展望

ファイバーピンセットの勾配力を比較する対象として、対物レンズによる光ピンセット実験を行い、捕捉可能粒径の実験を行った。テーパード光ファイバーの延伸加工装置は二軸のステージを用いて加熱距離、延伸長さを調整できるように設計した。延伸距離とファイバーの最小径の関係を実験によりもとめ、理論値と照らし合わせた。

ファイバー加工の精度が上がりナノスケールでの形状加工が可能となれば、伝搬ロスがほぼ 0 のファイバーチップ製作が可能となる。CO₂ レーザーなどの局所的な加熱

をする装置の組み合わせにより、ファイバーチップによるナノ粒子の光ピンセットを目指す。

参考文献

- [1] Ashkin, J.M. Dziedzic, J.E. Bjorkholm, and S. Chu, "Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles," *Opt. Lett.* **11**, 288-290 (1986)
- [2] Taguchi, H. Ueno, T. Hiramatsu, and M. Ikeda, "Optical trapping of dielectric particle and biological cell using optical fiber," *Electron. Lett.* **33**, 413-414 (1997)
- [3] Kali P Nayak, Mark Sadgrove, Ramachandrarao Yalla, Fam Le Kien and Kohzo Hakuta 'Nanofiber quantum photonics' *J. Opt.* **20** (2018)073001 (52pp)
- [4] G.Brambilla 'Optical fibre nanowires and microwires : a review' *J. Opt.* **12** (2010) 043001 (19pp)