

光ファイバーチップによる光ピンセットの研究

森永実研究室 大草聖也

平成 30 年 3 月

1. 序論

光による粒子のトラップを 1980 年代 A.Ashkin が初めて成功した。このような光により微小体を捕捉することを光ピンセットと呼び、数 μm までの大きさの微粒子を捕捉し三次元的に自由に操作することができる。これは光による力である放射圧の作用によるものである。また光を用いているため、非接触・非侵襲で傷つけることなく微粒子の操作ができる。このような性質上、生物学や医学等の分野で応用されることが多い。またこの光ピンセットは実験装置に光ファイバーを利用することができる。光ファイバーによる数 nm スケールの微小体のトラップが可能になれば、量子ドット等の機能性微小発光体に応用することも可能になると考えられる。このような応用の実用化を可能にするためには、発光を伝送路である光ファイバーに効率的にカップルすることが鍵である。レンズによる集光でなく光ファイバーから出てきた光で発光体をトラップすることにより発光体を自動的にファイバー端の中心に付着させることができる。光による捕捉により先端に機能性微小発光体を付着させたまま試料から引き上げ、乾燥させれば光ファイバー先端中心に機能性発光微小体をカップルしたデバイスが作成できる。このデバイスが作成できれば、単一光子を作成することも可能になると考えられる。

2. 原理

ある媒質中を伝播する光(レーザー)は進行方向の向きに運動量をもつ。この光は異なる屈折率の媒質に入射すると、元の媒質と入射した媒質との境界面で反射・屈折が生じる。これにより光の進行方向が変化し、光の持つ運動量が変化する。この時運動量保存則により、変化した分の光の運動量が境界面において力の反作

用として働く。このような光による力を放射圧と呼ぶ。図 1、図 2 においてそれぞれ反射と屈折における光と力の向きを示す。反射の場合は境界面に対して鉛直下向きに力が働き、入射角 $\theta = 0$ で鉛直に入射した際に最大の力が働く。屈折においては、出射側の物質の屈折率が入射側の物質の屈折率よりも大きい場合には鉛直上向きに力が働き、媒質の屈折率の大小関係が逆になると鉛直下向きの力が発生する。溶液中において光(レーザー)を微粒子に照射すると、媒質と粒子の境界面において上記のように発生する力が粒子に働き、反射光の場合は散乱力として粒子を光の進行方向の向きに、屈折光の場合は勾配力として粒子を焦点に引き寄せる向きに力が発生する。光を用いた微粒子の補足に関してはこのような光により境界面に与えられる力を利用する。

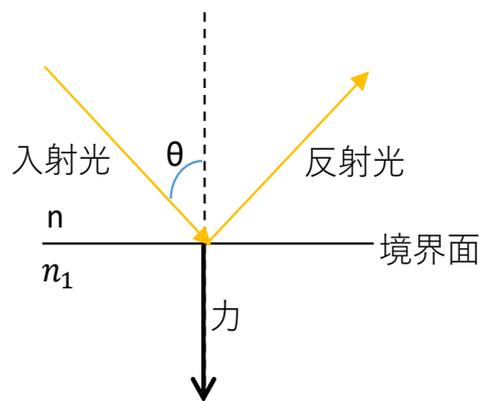


図 1 反射光の場合

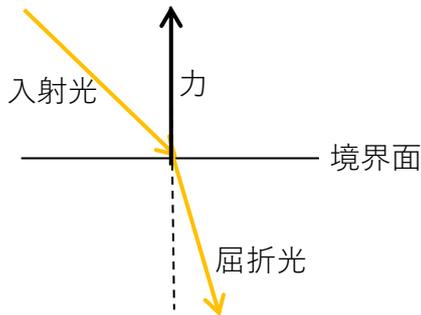


図2 屈折光の場合

実際に粒子に光が入射する際には粒子が光の波長よりも大きいミミ散乱領域では、トラップされる粒子が大きいいためトラップは光線光学の域内で説明できる。光軸と粒子の中心位置が直線状にあり、微小球の屈折率が周辺媒質の屈折率よりも高い場合における光の方向成分の変化を下図3左の図で考える。溶媒中で対物レンズによって集光された光Aは粒子による屈折でA'に変化し、光の方向成分が変化によりベクトル F_A が発生する。発生したベクトルの合力が光の焦点方向へと粒子に力を発生させるため粒子は焦点方向へと引き寄せられる。また同じ条件で光軸上に粒子が存在しない場合でも結果として粒子を焦点方向に引き寄せるように力が働く。(図3右)

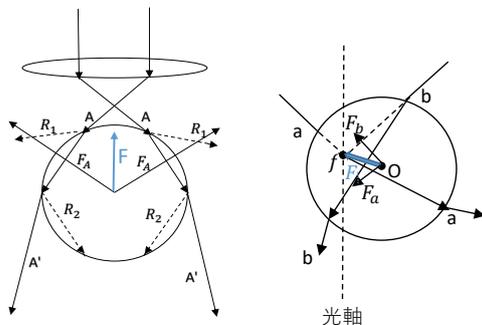


図3 粒子による光の進行方向の変化

補足対象である粒子が光の波長よりもかなり小さい nm サイズである場合、光線光学を適用して考えることはできなくなるため、レイリーの光散乱理論よりナノ粒子を一つの電気双極子として近似する。反射及び内部吸収による散乱力は散乱体の散乱断面積と光強度に比例する量となる。散乱断面積は光の波長 λ の関数であり、微粒子の半径を r とすると r^6/λ^4 に比例する。一方、分極率と光電界の相互作用によって発生する勾配力は、分極率と光強度勾配に比例する。この時光強度勾配は ∇E^2 と表現できここでのEは光の電界を示す。レイリー散乱領域において安定的にトラップされるためには焦点方向への力である勾配力が逆方向への力である散乱力よりも大きい必要がある。またブラウン運動により粒子自体に働く力も考慮しなければならない。

このような特性上レイリー散乱領域においてトラップを行う際には、開口数の大きいレンズを用いて光軸に対して大きい角度で入射する光線成分を増やすことにより ∇E^2 を増加させるか、金属や誘電体のような分極率の大きい材料を選ぶことが必要である。

3 実験方法

3.1 通常の光ピンセット

実際に光ピンセットを用いて粒子をトラップするにあたり、倒立顕微鏡に平方光を入射させるために図4のような光学系を設置した。

光源としてはデュアルトラッキング多出力電源から出力した80 mWで波長が532nmのレーザーを用いた。

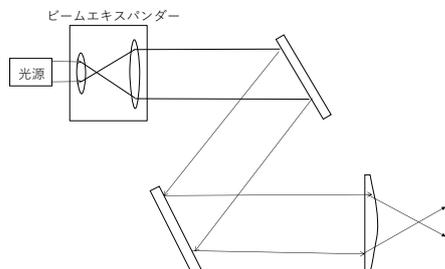


図4 設置したアライメント

倒立顕微鏡に光源として入射した光は図5のように倒立顕微鏡内に入射しレンズにより平方光とされ、接続している対物レンズにより集光され出射しトラップ対象である粒子が浮遊してる試料に入射させた。対物レンズは倍率が40倍で開口数(NA)が0.65のものを使用した。

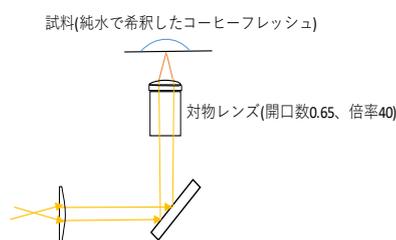


図5 顕微鏡内における光路

また今回の実験において捕捉対象である油の粒子の屈折率はおよそ1.47である。

3.2 光ファイバーによる光ピンセットの実験装置の作成

光ファイバーを光ピンセットの実験装置に導入するにあたり、アライメントを通常の光ピンセットと光ファイバーによる光ピンセットの両方を行えるように当初のアライメントにいくつかの装置を加えて図6のようなアライメントにした。

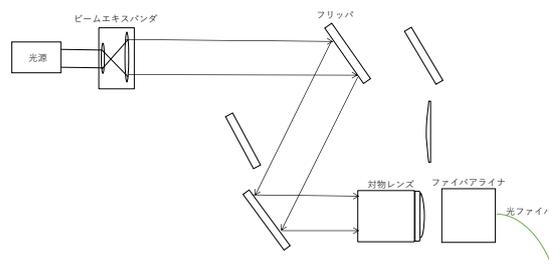


図6 最終的なアライメント図

4 実験結果

図8は実際に通常の光ピンセットを用いている様子の写真である。ホコリを除去しることができなかつたため動かない影のようなものが常時ある。①、②は粒子を光によりトラップしている時の中心にトラップした粒子は動いていないが左下の方に見えている粒子は液体に発生している流れにより動いている。③ではトラップに使用していた光を遮断し粒子をトラップしていた状態から放している。これにより粒子は動き出した様子を③から④にかけて示している。トラップした粒子の直径の大きさは約 $6\mu\text{m}$ 程度である。

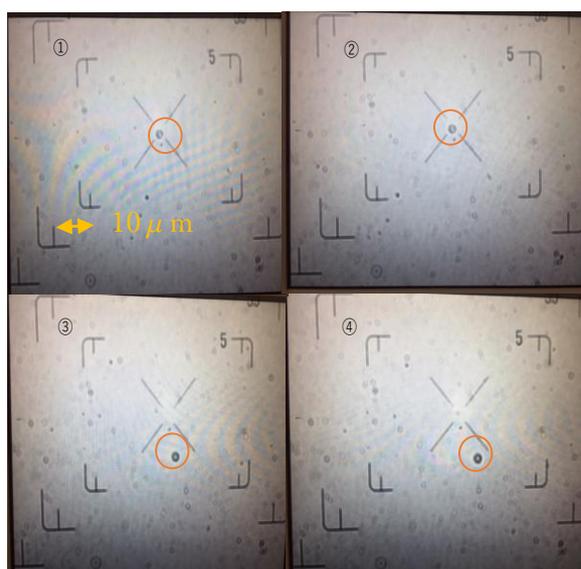


図8 通常の光ピンセットによる捕捉

次に、ファイバーから光を出射させた状態で流れている粒子のトラップを検証したものが図9である。

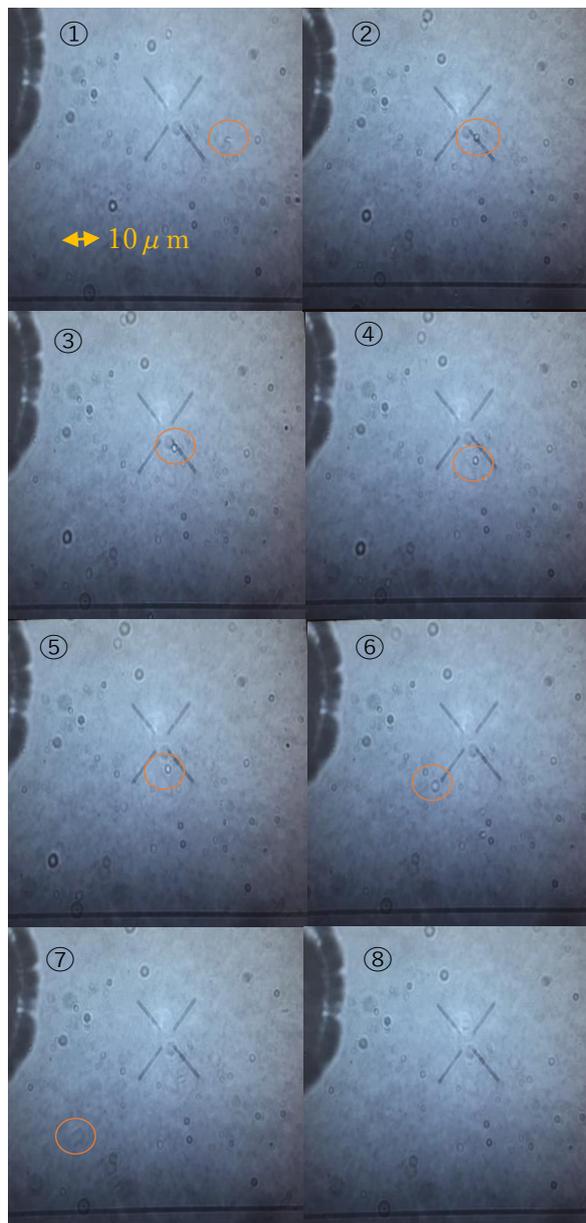


図9 光ファイバ先端からの光放射による実験結果

まず①で流れてきた粒子が中心から少し右下に下がった位置で動きが遅くなり同じような場所にとどまっていることを②③④⑤で示している。⑤の後ファイバーに入射さ

せていた光を遮るととどまっていた粒子は動き出し流れていった。その様子を⑥⑦⑧で示している。粒子が液中でこのようなふるまいを見せたのは、粒子が光ファイバーから出射する光に対して影響を受けていたためであると考えられる。先端が平面状の光ファイバーは先端が先細りしたテーパードファイバーとは異なり、コア軸上で散乱力の方が勾配力よりも大きいと考えられる。そのため光ファイバーから出射した光が入射した粒子に結果として光により光の進行方向の向きに押される力が働き、結果カバーガラス上の表面に粒子が押さえつけられ一定の位置にとどまるという結果になったのではないかと考えた。

5. 今後の展望

今後は先端をテーパ状にした光ファイバーを用いての粒子の捕捉と、その捕捉が成功すれば数 nm スケールの微小体の捕捉も試みていきたいと考えている。

6. 参考文献

- [1] Ashkin, J M Dziedzic, J E Bjorkholm and S Chu,. (1986)"Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles", Opt. Lett. 11, 288,.
- [2] Zhihai Liu, Chengkai Guo, Jun Yang, and Libo Yuan (2006)"Tapered fiber optical tweezers for microscopic particle trapping: fabrication and application", Optical Society of America.