

光ピンセットの研究

清水研究室 0513056 澁川友美子

【背景】

光ピンセットとはレーザー光を対物レンズで集光させ、その光の放射圧によって $1\mu\text{m}$ から数十 μm の大きさの対象物をとらえ、自由に動かすことができるものである。

通常光ピンセットの研究には、最大強度が中心で最大値をとるガウス分布型のビームを光源として用いるが、本研究室では、最大強度が中心からある距離離れたところで最大値をとるドーナツ型のビーム形状をもつラゲールガウスモードビームを用いて光ピンセットの研究を行ってきた。

【目標・目的】

本研究は、色素レーザーを用いてラゲールガウスモードビームを生成し、 $1\mu\text{m}$ から数十 μm の粒子をトラップする際に、このモードでの有効性を検証することを目標にかかげ、そのための比較対象として、エルミートガウスモードビームにおいて $1\mu\text{m}$ の粒子をトラップし、トラップに必要なパワーと粒子がトラップされる位置の精密測定を行うことを目的とした。

【原理】

屈折率 n_1 の媒質中を伝播する強度 I のレーザー光は運動量を持ち、この光が屈折率の異なる媒質(屈折率 n_2)に入射すると、境界面で反射と屈折が生じて光の進行方向が変化し、運動量に変化する。その際運動量保存則により光の運動量の変化分が境界面に生じる。この力を放射圧という。

レーザー光を溶液中の微粒子に照射すると、運動量の変化分は微粒子に受け渡され、それがレーザー光の焦点位置の方向に向かう力に変換される。表面反射を無視して、各光線の透過した成分だけを考えると、図1のように粒子がビームウェストより上側にあるとき、レーザー光の焦点位置の方向に向かう力と、光の進行方向に働く力が釣り合って微粒子を焦点位置付近に捕捉することができる。

逆に、図2のように粒子がビームウェストより下側にあると、運動量変化によって生じる力は、光の進行方向に向かう力と同じ向きになり、全体に粒子を押し上げる力が強く働く。そのため、トラップすることは困難になる。

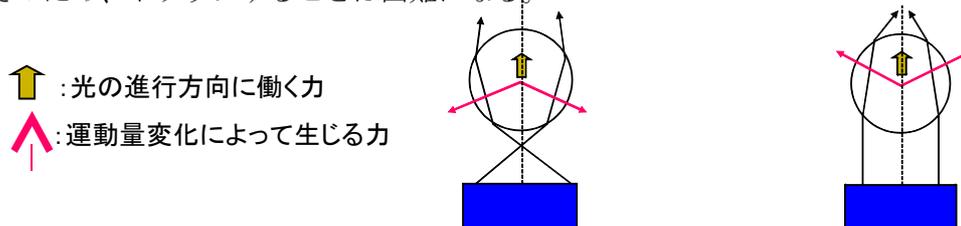


図1 粒子がビームウェストの上側にあるとき 図2 粒子がビームウェストの下側にあるとき

また、球の中心に対して対称の位置にある、 a と b の典型的な一対の光線を考える。2つの光線は屈折するとき光線の運動量の変化の向きにそれぞれ F_a と F_b の2つの力を生じる。光線 a の方が光線 b よりも強いので、力 F_a の方が力 F_b よりも強く、光の強度が最大である中心軸に向かって高屈折率の球をひっぱる横向きの力がはたらく。

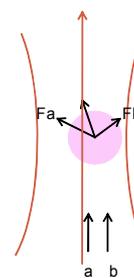


図3 粒子にかかる力

【実験】

[実験試料]

- ・対象物：ポリスチレンラテックス球 直径：1 μ m 屈折率：1.58
- ・周辺媒質：薄洗剤溶液 屈折率：1.33

[光学系]

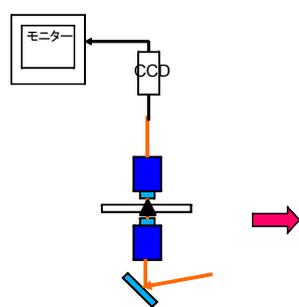


図4 z軸上から見た顕微鏡

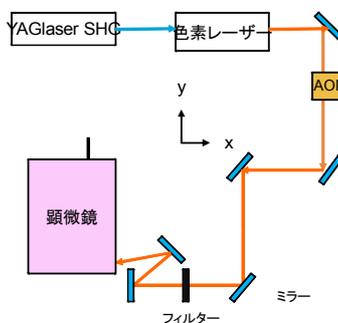


図5 xy面での光学系

- 上レンズ：50倍 開口数：0.80 WD：0.54mm
- 下レンズ：50倍 開口数：0.55 WD：8.7mm

[実験方法]

1. セルの製作

レンズの作動距離が短いため、120~170 μ mのカバーガラスをスペーサーとし、また、半永久的に使うために接着剤で堤防を作り密封したセルを作った。

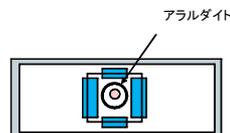


図6 上から見た図

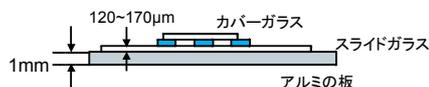


図7 断面図

2. 光学系において数種類のフィルターを出し入れしてパワーを変え、トラップ出来るパワーを▲の位置で測定した。
3. パワー固定で、下の50倍レンズを上下に0.5 μ mずつ動かし、ビーム上で粒子がトラップされる位置を測定した。
4. 画像取り込みソフトを用いて、ビームウェストとビーム幅の拡がりを見算した。
CCDカメラの単位はpixelで表されるため、40Line/mmの回折格子を用いて解析し、

1pixel=0.26 μm を基に計算した。

【結果】

トラップの条件を「x y 面内に、外れることなく 50 μm 動かせること」と定義した。理由としては、動かす速度によってトラップ出来る場合と出来ない場合があり、それによりトラップ出来るレーザーパワーの限度が変化してしまうため、まずは広い範囲に動かせるということを重要視して測定を行いたかったためである。

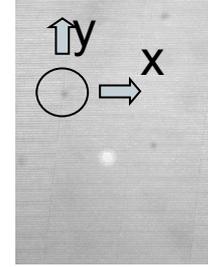


図 8 50倍レンズで観測した粒子

パワーにおいては、上限 2.90mW、下限 0.35mW のパワーでトラップが可能であることがわかった。上限を超えると、パワーが強すぎて粒子を押し上げる力が強くなり、下限を下回るとパワーが弱くてトラップすることができなかった。

次に4通りのパワーで、ビームウエスト、トラップ可能なビームウエストからの距離、そして図 10 に示すようにトラップ可能な z 軸上での範囲 A をそれぞれ測定し、図 9 のような結果が得られた。図 11 は、レーザーパワーに対して、z 軸上でビームウエストを 0 とし、そこからレンズを z 軸上に動かしてどのくらいの範囲でトラップが出来るかを示したグラフである。

パワー[mW]	ビームウエスト[μm]	ビームウエストからの距離[μm]	トラップ可能範囲 A[μm]
2.16	2.86	0~4.94	4.94
1.20	2.60	0~5.2	5.2
0.84	2.60	0.52~8.06	7.54
0.35	2.08	2.08~7.03	4.94

図 9 4種類のパワーによる測定値

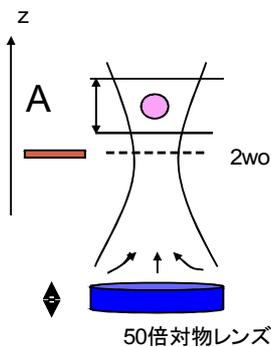


図 10 トラップ可能な範囲 A

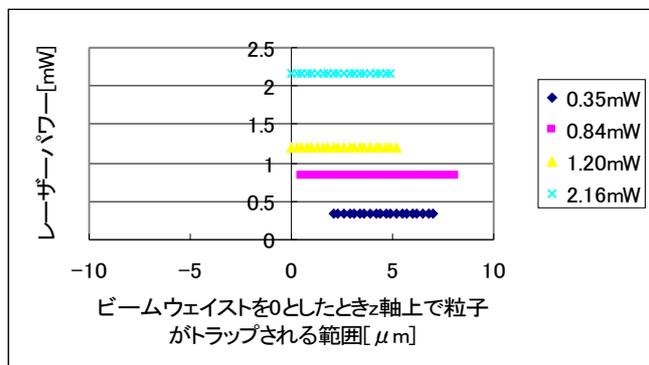


図 11 パワーとトラップされる範囲の関係

【まとめ】

以上の実験から、 0.35mW という小さなパワーでもトラップが可能であることがわかった。また、ある程度のパワーになると、トラップは出来ても徐々に粒子は押し上げられ、やがて上のカバーガラスにくっついて動かなくなってしまった。

パワーが強いと、ビームウェイストの大きさも粒子の大きさに比べて大きくなるため、ビームウェイストの位置でもトラップができた。また、トラップ出来る最小のパワー 0.35mW でもビームウェイストは粒子の約 2 倍あるが、測定結果より、ビームウェイストから $2\mu\text{m}$ 以上離れたところまでビーム幅が広がらないとトラップ出来なかったことから、粒子をトラップする条件として、ビーム幅は粒子の大きさの 2 倍より大きくなければならないことがわかった。

4 種類のパワーのうち、 0.84mW のときのトラップ範囲が $7.54\mu\text{m}$ と他に比べて広いことから、 0.84mW 辺りのレーザーパワーがトラップ実験に最適であると予測できる。

今回の測定では、トラップの際にレーザー光を xy 面内で動かす速度について考慮しなかったが、速く動かすとトラップから外れることから、レーザー光を動かす速度についても考える必要があると考えた。今後は、パルスモーターをつけるなどして、一定の速度で動かせるようにしようと考えている。また、トラップ出来る時間も測る必要があった。

【今後の課題】

- ・粒子のサイズを変えて同様の実験を行う。
- ・ラゲールガウスモードを生成する。
- ・トラップ実験を行い、今回の実験結果と比較し、ラゲールガウスモードでの有効性を実証する。

【参考文献】

- ・レーザー物理入門 (霜田 光一著)
- ・レーザー光の圧力 (A.アシュキン)
- ・輪帯偏光ビームによる光軸方向のレーザー・トラップ力増強 (杉浦 忠男・河田 聡)
- ・Optical trapping (Keir C. Neuman and Steven M.Block)