

光ピンセットにおける 微粒子操作の解析

清水和子研究室 谷 祐輔

《背景》

光ピンセット技術は、光が直接物体に及ぼす光放射圧を利用したもので、ミクロンオーダーの物体を非接触、非破壊で3次元的に操作できる。また、複数の光ビームを用いるとマイクロ構造物を組み立てる可能性があるため、マイクロマシンの分野で注目されている。

《目的》

顕微鏡下で直径10 μmの微小球に下からレーザーを集光照射して3次元トラップを目指す。さらに、どの程度の力で捕捉できるのかを測定する。

《原理》

レーザー光が微小球に及ぼす力は球の大きさが波長より十分大きいとき、幾何光学的に説明できる。レーザー光が粒子に入射すると、境界面で周辺媒質の屈折率 n_1 と微小球の屈折率 n_2 の違い ($n_1 < n_2$) から透過光と反射光に分かれる。そのとき、光の進行方向が変化し、運動量が変化する。そのため、運動量保存則により境界面に力が作用する。これが、粒子を捕捉する力となる。

レーザー光照射による微小球のトラッピング

・微小球に働く力

$$F = (F_A)_Z + (F_B)_Z$$

・持ち上がる条件

$$F > \text{重力} - \text{浮力}$$

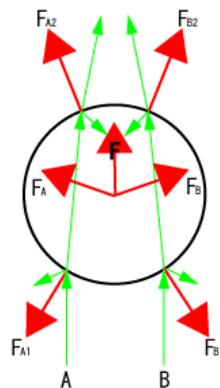


図1 光線による力

光線 A は微小球に入るとき境界面で反射・屈折し、 F_{A1} で示された方向に力を及ぼす。また、周辺媒質に出る際にも内部反射・屈折し、 F_{A2} で示された方向に力を及ぼす。 F_{A1} と F_{A2} の合力が F_A となる。同様に光線 B の合力が F_B である。図のように、光線 A と光線 B の強度分布が対称であり、 F_A と F_B の力は等しくなり、鉛直上向きとしての合力 F が粒子に働く力となる。この力が重力よりも大きければ、物体の浮揚が起こる。

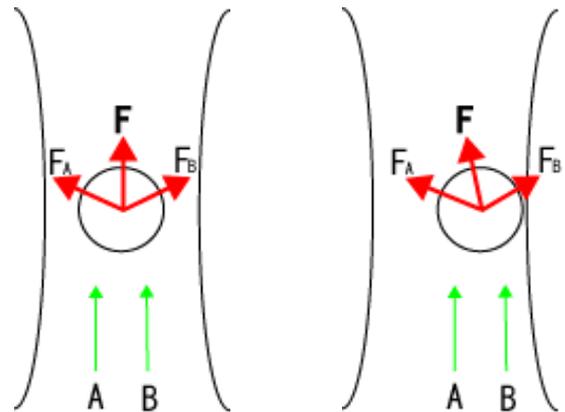


図2 勾配力による力

微小球がレーザー光の中心軸から、少し外れている位置にある場合、レーザー光がガウス型分布のときには F_A と F_B の水平成分に力の差が生じ、粒子にはレーザー光の中心軸に引き戻される力が作用する。よって、この微小球はレーザー光による力と重力の釣り合った位置で3次元的に安定となり、光トラッピングされることになる。

《実験》

実験試料

- ・補足対象物：ポリスチレンラテックス球
直径：10 μm 屈折率：1.58
- ・周辺媒質：薄洗剤水溶液 屈折率：1.33

薄洗剤水を使用するのは水より粘性が低く、微小球をトラップしやすくするために使用した。

実験方法

- ・顕微鏡下で、セルの下からの入射光を粒子に照射し、粒子を3次元トラップし操作する。
- ・光源はNd:YVO₄レーザー ($\lambda = 532 \text{ nm}$)を使用した。
- ・上の対物レンズ：20倍 NA = 0.35
- ・下の対物レンズ：10倍 NA = 0.35

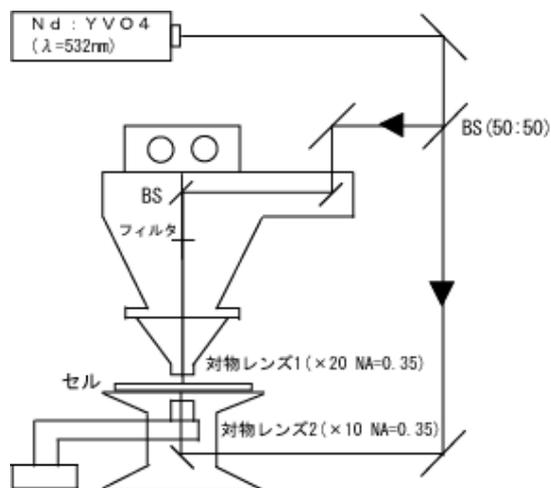


図3 実験配置

セルはプレパラートにM3 (深さ: 300 μm) のワッシャーを貼り付けたものにカバーガラスをかぶせて使用した。

《実験結果》

・右の写真 (図4) は実際に微小球がトラップされている様子を示す。上から ~ とする。黒い影はレンズ、プレパラートの汚れである。

小さく丸く見えるのが微小球である。焦点はプレパラート上に合っている。写真の中心よりやや上にある球をトラップすることにする。他の球と同様にピントが合っていることから、プレパラート上にいることがわかる。

球に下からレーザーを照射した瞬間の写真である。レーザーを照射して十分に時間をおいた写真である。干渉縞が広がっているのがわかる。

トラップしていたレーザーを遮った瞬間の写真である。他の球と比べ、ピントがずれている。この球は、プレパラートから40 μm 上方でトラップされていた。

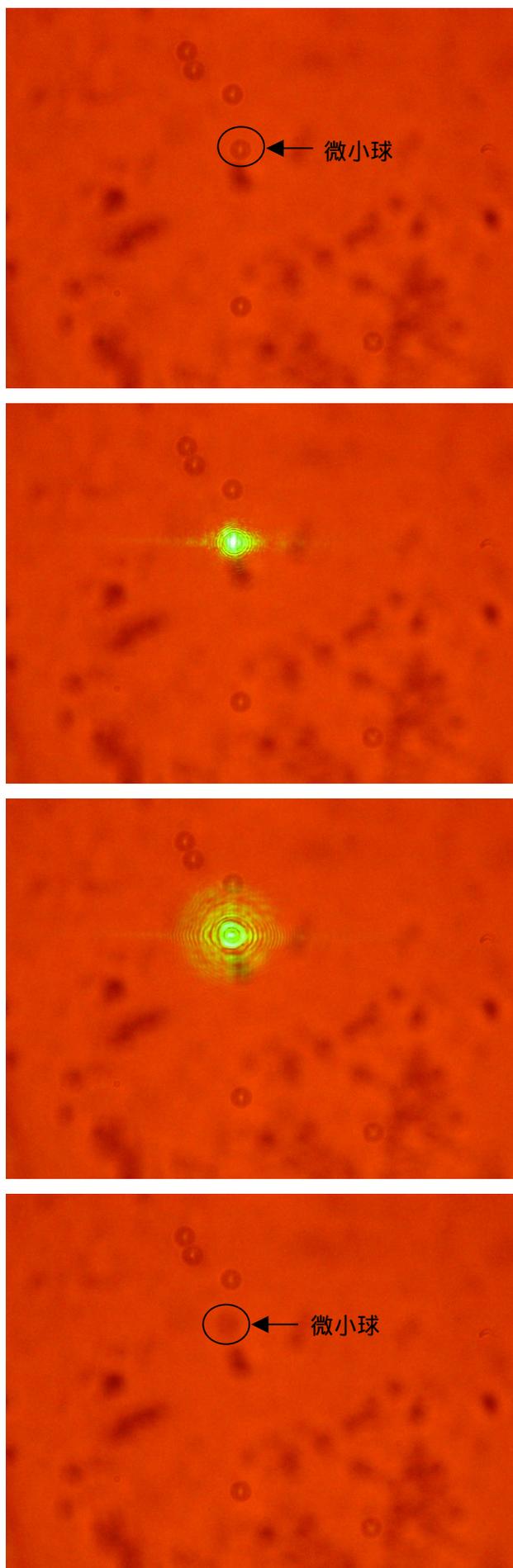


図4 微小球のトラップ

三次元トラップの解析

この写真は、上下方向のみのものであるが、この状態でレーザー光を水平方向にずらすと、その方向に球を移動させることができた。光軸方向のトラップはレーザー強度、ビーム径、集光角に依存していることがわかった。本実験ではレーザー強度、ビーム径を変化させることで、微小球を3次的に操作した。レーザー強度が強すぎると、微小球が上のカバーガラスに衝突してしまうので、3次元操作ができなくなってしまった。また、レーザー強度を弱くしてビーム径を大きくすると上の方にいくと水の対流によりトラップが外れてしまった。

図5に観測した解析座標を示す。原点はプレパラート上とした。Zは、トラップ前の微小球の位置と焦点と距離である。Z'は、トラップされた微小球の高さである。

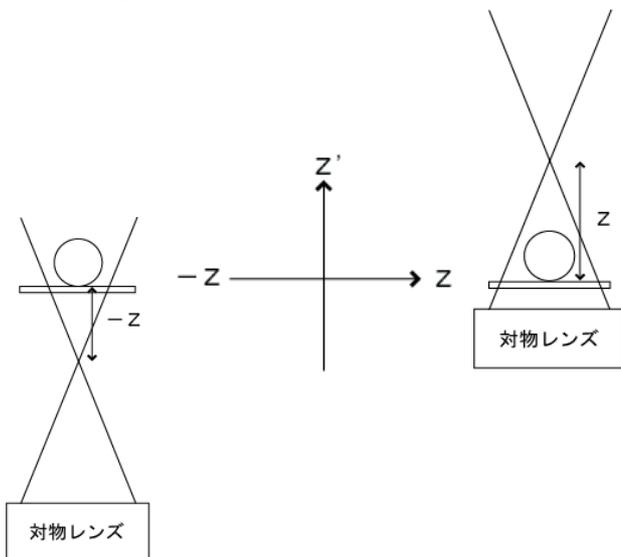


図5 ZとZ'の取り方

図6は図5に従い、微小球の位置と焦点の距離の関係を示す。丸印はレーザー強度が2.8 mWのとき、正方形の印は2.0 mWのときである。

2.0 mWのとき、Z = 0付近では微小球の浮揚が確認できなかった。このことから、微小球に照射するビーム径が小さいときは及ぼす力が小さくなることがわかる。さらに、このときはレーザーが及ぼす力よりも(重力 - 浮力)のほうが大きかったことがわかる。また、傾きが等しいので、微粒子と焦点との距離、つまり対物レンズを上下することによって

微小球を3次的に操作できたことがわかる。

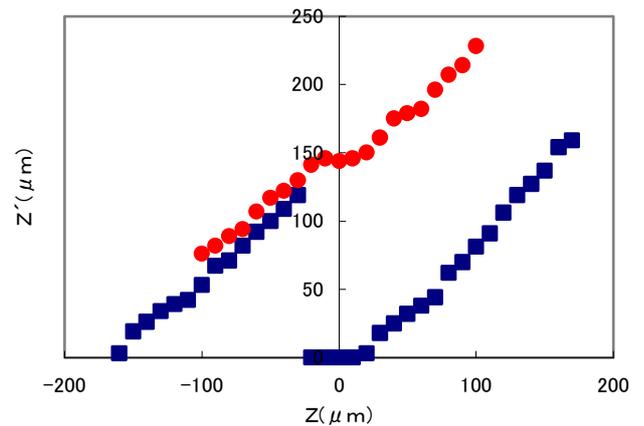


図6 ZとZ'のグラフ

図7はトラップされた微小球の位置と焦点の距離の関係である。Z = |Z - Z'|とした。このグラフからも、対物レンズとトラップされた微小球の位置が誤差分を含めるとほぼ一定であることがわかる。

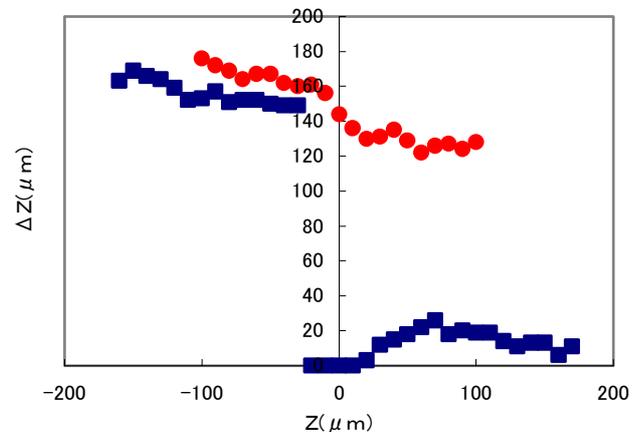


図7 ZとZ'のグラフ

図6、図7から2.0 mWでも、2.8 mWでも対物レンズを上下させることによって微小球を3次的に操作できることがわかる。このことから、光軸方向に働く力は球に照射するビーム径に依存することがわかった。

図8にZと力のグラフを示す。微小球の位置と焦点の距離は、球に照射するビーム径に置き換えて考えることができる。Fはレーザー光が球に及ぼす力で

ある。gは(重力 - 浮力)とし、 w_0 は最小ビーム径である。グレーゾーンはFが(重力 - 浮力)よりも弱いときである。2.0 mWの場合、焦点から離れている位置($Z < -20$ 、 $10 < Z$)においては、トラップできるが、焦点 w_0 の近く($-20 < Z < 10$)においては、レーザーが及ぼす力Fより(重力 - 浮力)の方が大きく、微小球がトラップできなかった。2.8 mWの場合、焦点 w_0 の近くでもトラップができた。

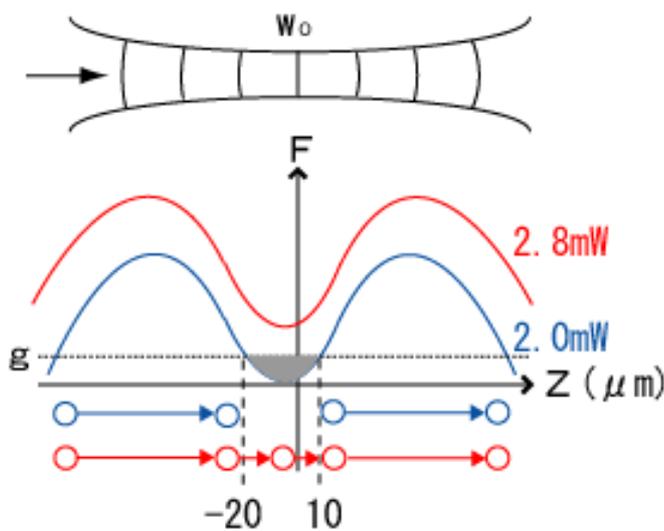


図8 Zと力のグラフ

《まとめ》

- ・下方向からのレーザー光での3次元トラップは、最小パワー1.4 mWで実現できた。(対物レンズ10倍、 $NA = 0.35$)
- ・トラップは、微小球がプレパレートから近い場合、水が乾かない限り観測時間内で長時間、安定してできた。微小球がプレパレートから遠い場合、トラップから外れてしまった。図6の2.0 mWのとき、 $Z = 180 \mu\text{m}$ ではトラップできなかった。これは、水の対流の影響と微小球に照射するレーザーの単位面積あたりのレーザーパワーが弱まったことが原因であると考えられる。
- ・トラップ位置は、レンズとレーザー波長が同じ場合、粒子と焦点の距離が一定のときには、レーザーパワーに依存することがわかった。

・本実験で使用した $NA = 0.35$ のレンズの場合、上方向からのレーザー光での3次元トラップは、(重力 - 浮力)よりも上に持ち上げる力が働かないため理論上、上方向からのレーザー光での3次元トラップは NA が1.0以上であるレンズを使用することが望ましいことがわかった。

- ・浮揚している粒子に上方向からレーザー光を照射すると押される力を確認した。
- ・計算上、最小ビーム径は $1.5 \mu\text{m}$ であった。

《今後の課題》

- ・ NA の高い対物レンズを使い、上方向からのレーザーで3次元トラップの実現。
- ・ラゲールガウスビームを用い実験を行う。

《参考文献》

- ・レーザー物理入門(霜田光一著 岩波書店)
- ・レーザー応用光学(小原、神成、佐藤著 共立出版)