

光ピンセットの開発

清水和子研究室 茂泉 純

【実験背景】

光ピンセットは、ミクロンオーダーの物体を3次元的に操作することができ、微小な物体を捕獲できることから、細胞の捕獲に応用されている。また、マイクロモーターの原理もこの光ピンセットと同じ原理で使われているものもある。

【目的】

マイクروسコープ下で、直径が数 μm から数十 μm までの粒子に上からレーザーを集光照射して捕獲し、どの程度の力で捕獲されるかを測定する。

【原理】

光の波長より十分大きい対象物なので幾何光学で考える。レンズをパスして集光させたレーザー光を粒子に照射する際、ビームウェストが粒子の少し上にあるように照射させる。そうすると、周辺媒質の屈折率 n_{ext} と粒子の屈折率 n_{in} の違い($n_{ext} < n_{in}$)からレーザー光は反射光と屈折光に分かれる。その時、入射光の境界面に対する法線方向の光運動量が変化する。それらの運動量は保存されるので、境界面にはその反作用の力が働く。図1では F_A がその境界面の合成力であり、この合成力をたし合わせると上向きに力が働くことになる。この上向きの力が、粒子の重力からその粒子が周辺媒質から受ける浮力を差し引いた値よりも大きければ粒子は捕獲されたということになる。

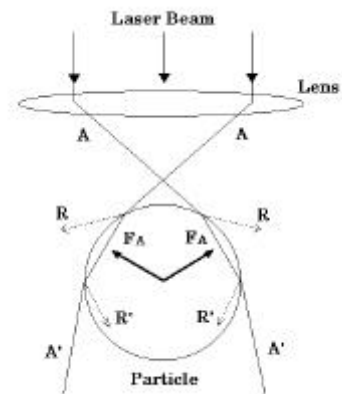


図1 力の作用

$$\frac{f_{all}}{mg - f_v} > 1$$

ここで、 f_{all} は合成力、 m は粒子の質量、 g は重力加速度、 f_v は浮力である。

まず、図2のようなモデルを考える。入射光の運動量を $\hbar k (k = 2\pi n_{ext} / \lambda)$ とすると、点A、Bでの屈折光からの運動量変化による力の大きさはそれぞれ

$$f_1 = \hbar k (\cos \mathbf{a} - n_{in} \cos \mathbf{b})$$

$$f_2 = \hbar k (n_{in} \cos \mathbf{b} - \cos \mathbf{a})$$

と表わすことができる。 \mathbf{a} は入射角、 \mathbf{b} は屈折角、 λ は波長、 \hbar はプランク定数である。また、点A、Bでの反射光からの運動量変化による力の大きさはそれぞれ、

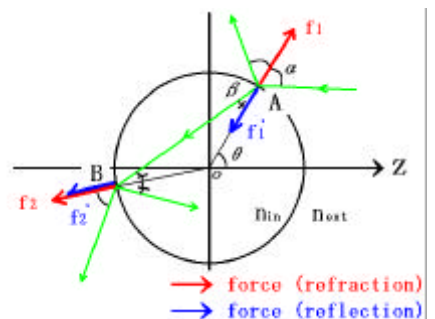


図2 1本の光線による力

$$f_1' = 2hk \cos a$$

$$f_2' = 2hkn_{in} \cos b$$

となる。

これらの力の Z 成分のみをたし合わせると次のように表わされる。

$$\angle AOB = p - 2b - (p - q) = q - 2b$$

$$f_{refr} = f_1 \cos q - f_2 \cos(q - 2b)$$

$$f_{refl} = -f_1' \cos q - f_2' \cos(q - 2b)$$

したがって Z 方向の力は、

$$f = f_{refr} + f_{refl}$$

となる。

この力は、光の強度によって単位面積あたりの運動量密度が異なるために強度、反射率や透過率にも依存する。

【実験に使用したもの】

対物レンズ	倍率・・・20倍 NA・・・0.35
捕獲対象物	ポリスチレンラテックス球 直径・・・10.35 μm 屈折率・・・1.58
周辺媒質	薄洗剤水溶液 屈折率・・・1.33
セル	ガラスプレート（右図） * M3 のワッシャーをはりつけたもの。 * 倍率 10 倍の対物レンズで内径全体が見える。

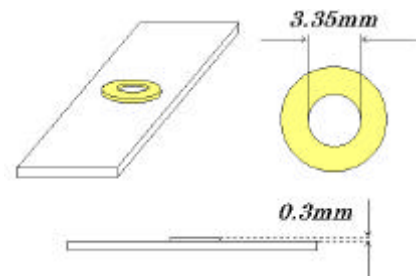


図 3 セルの形状

【実験方法】

今回、レーザー光を動かして対象物を捕獲することは困難なため、3 次元的に操作できる（上下方向に 1 μm づつ動かせる）精度のよいステージを動かすことで対象物をレーザー光の下にくるようにした。右図のような光学系を組み、10 倍の対物レンズを用いてステージを上下に動かし、粒子がいる範囲をしぼった。次に 20 倍にかえて粒子にピン点を合わせ、集光したレーザー光のポイントにステージを動かし、粒子をそのポイントにもってきた。

- * マイクロスコープの内部に BS(ビームスプリッター)が 2 つと対物レンズによる反射のため、対象物に照射するレーザー光のパワーはレーザー出力の 1/10 に落ちていた。

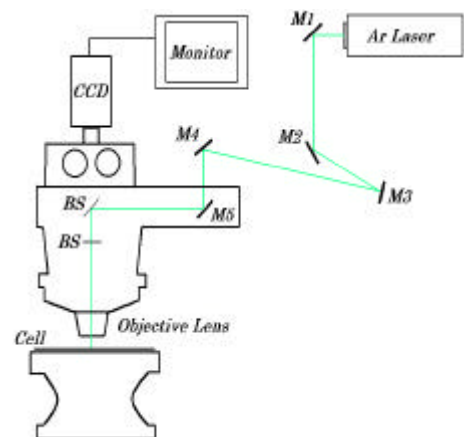


図 4 実験配置

【ビームウェストの測定】

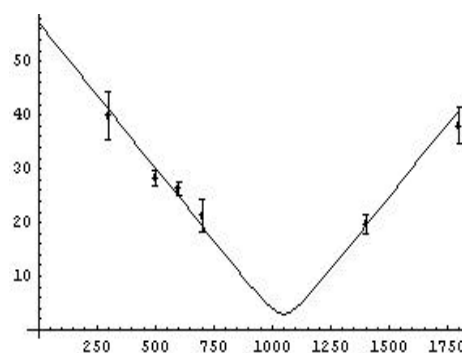
ナイフエッジでいくつかの任意の距離でビームスポットをカットしていき、フォトダイオードで光の強度を測定した。その測定したグラフからビーム半径をだし、プロットした。プロットした点において以下の式でフィッティングをかけてグラフを描いた。ビームウェスト w_0 は次のようになった。

$$w_0 = 514.5 \text{ nm}$$

$$w_0 = 2.8 \pm 0.2 \text{ } \mu\text{m}$$

$$w = w_0 \sqrt{1 + \frac{2(Z - Z_0)^2}{w_0^4}}$$

Beam Radius (μm)



Distance (μm)

図5 ビーム半径

* マイクロスコープを通したセル中でのビームウェストの位置を測定していない。

【実験結果】

1 レーザー光に粒子を近づけていき、レーザー光が粒子に少しでも照射すると、粒子は横方向の勾配力を受けて光軸にすい寄せられた。その後、ステージを x 、 y 方向(平面内)に動かしていき粒子を移動させた。この時、ステージを手で操作しているのので、力の加減を間違えると粒子がレーザー光から外れてしまった。下の4つの写真は捕獲した粒子を移動させた時のものである。

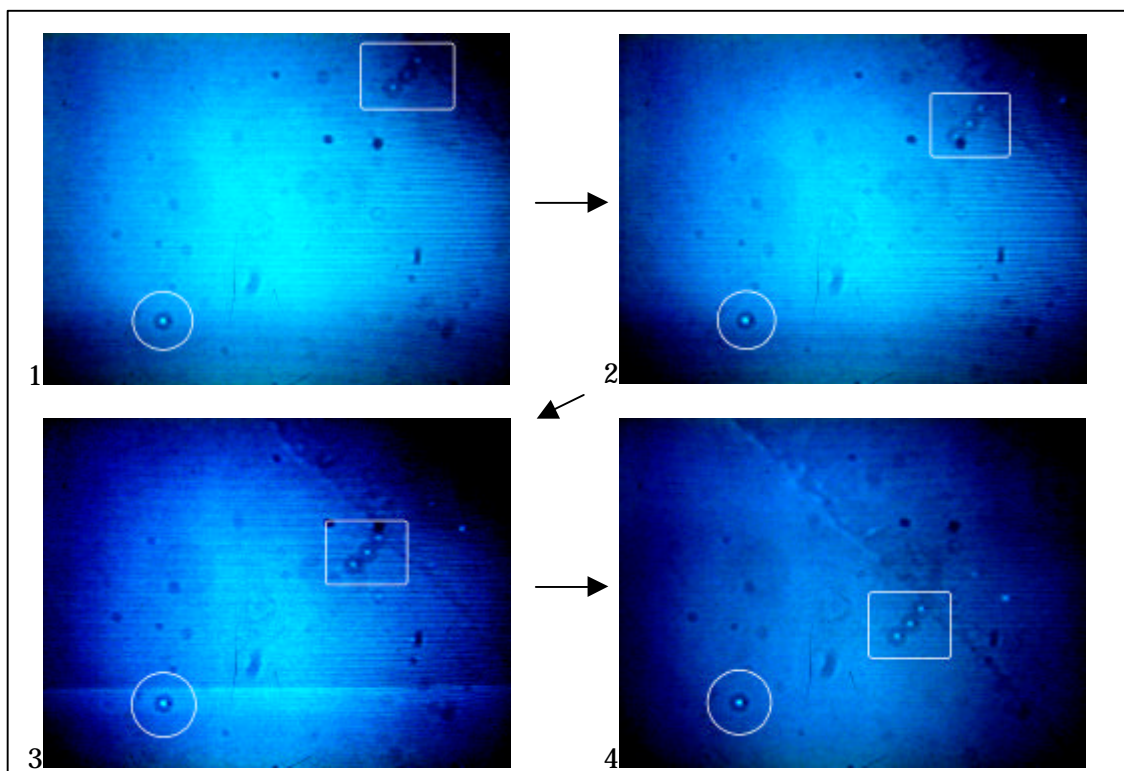
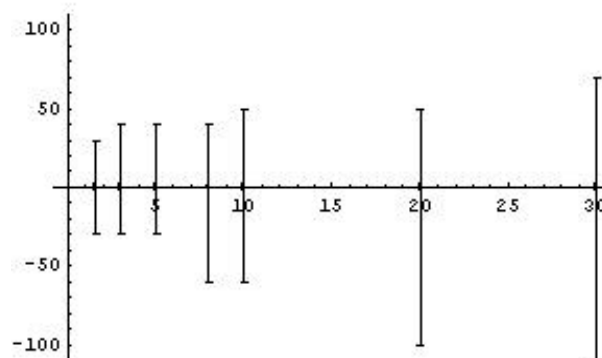


図6 粒子の移動

【パワーとトラップ可能な垂直方向範囲】

マイクروسコープのピントを粒子に合わせ、そこからステージを上下に動かし、レーザー光を照射し、ステージを x、y 方向に動かして外れてしまうかどうかを確認しながら一回一回レーザー光を切りながら測定を行った。

トラップ可能な垂直方向範囲 (μm)



粒子に照射するパワー (mW)

図7 パワーとトラップ可能な垂直方向範囲

【まとめと今後の予定】

- 実際に粒子をトラップして、平面上で動かすことに成功した。
- パワーが小さくても (今回は 1.6mW) トラップできたが、あまり大きなパワーで行うと粒子が熱によって変形してしまった。
- トラップ可能な垂直方向範囲はパワーと関係あることが理論からも実験からもわかった。しかしながら、自分の目での確認なのでピントが合わなくなってくる程、曖昧な測定になってしまった。また、ステージも手で操作しているので力の加減が多少はあったと思われる。
- 今回はデモンストレーションだけだったので力の測定を行えるようにセルの形状を横からもトラップされている様子が見えるように作製する。また、ステージを一定の力を加えて操作できるようにする。
- NA とトラップ力の関係を調べてみる。(理論からいくとトラップ可能な垂直方向範囲が狭くなりトラップ力は大きくなる。)
- ラゲルガウシアンビームを用いて粒子をトラップし、その運動を観察する。

【参考文献】

レーザー物理入門 (霜田光一著)、Journal Optics Society of American /Vol.9, No.10 (R.Gussgard and T.Lindmo)