

# レーザー光による粒子の浮揚実験

清水 和子 研究室 松崎 健竜

## はじめに

本実験の目的は、レーザー光をレンズで集光し、光の圧力によって、数 $\mu\text{m}$ 程度の微小粒子を浮揚させたり、自由に動かす操作を、顕微鏡下において行うことが出来る光ピンセットの開発を行うことである。第一段階として、光による微小球のトラップを行う。

## ガウシアンビームによる光の圧力

光ピンセットの原理は光線の運動量の保存則による。光は屈折率の異なる媒質に入射するとき、境界面において反射光と屈折光に分かれる。屈折率が $n_1$ 、 $n_2$ の媒質の境界面に光が入射したとき、入射角を $\theta$ 、屈折角を $\phi$ とすると、このとき屈折の法則は以下のように成り立つ。

$$n_1 \sin\theta = n_2 \sin\phi$$

光として強度 $I$ のレーザー光を入射する。このとき強度 $I$ のレーザー光は $n_1(I/c^2)$ の運動量を持つ。 $c$ は光速)。このレーザー光が屈折率の異なる媒質に入射すると、光線の進行方向が変化し、そのため光線の運動量が変化する。全運動量は保存されるので、光線の運動量の変化分から発生した力が境界面に作用する。また運動量は、境界面に垂直な方向に変化するので、従って力は境界面に垂直に作用する。

図1において、光線 $a$ 、 $b$ が、ポリスチレン微小球を透過する成分を持つとき、各光線が微小球で反射、または屈折することで、2つの光線の運動量の変化分に相当する力が及ぼされることになる。全運動量は保存されるので、一部の運動量が微小球に分配され、これが微小球を動かす力となる。レーザー光の断面の強度分布はガウス分布であるので、光強度はビーム中央で最も大きく、光軸から外れるに従って小さくなっていく。微小球の屈折率が周囲の媒質の屈折率より大きい場合、光線 $a$ はレーザー中央から遠ざかる方向に屈折する。この光線の運動量の変化から発生した力 $F_a$ はビームの中央方向に向かう。光線 $b$ はレーザー中央に向かう方向に屈折する。この光線の運動量の変化から発生した力 $F_b$ はビームの周辺方向に向かう。しかし、光線 $a$ は光線 $b$ よりも強度が大きいこと

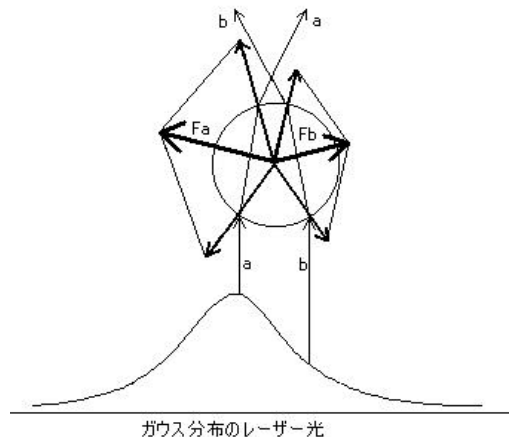


図1

から、この2つの力は同じではなく、レーザー中央部の光線 a で発生した力  $F_a$  の方がより大きくなり、微小球はレーザー中央付近に引っ張られる力を受ける。また、レーザーを鉛直上向きに微小球に当てた場合、レーザーの進行方向に働く力と微小球に働く重力とが釣り合うならば、微小球はそこに浮揚することになる。

### ガウシアンビームの変換式

$$E = \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp \left[ -i(kz - \phi) - r^2 \left( \frac{1}{\{\omega(z)\}^2} + \frac{ik}{2R} \right) \right]$$

これは基本ガウシアンビームの式である。この式の指数部分を複素パラメーターとすると、

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{q_0 + z} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi \{\omega(z)\}^2}$$

複素パラメーター:  $q(z)$   
 曲率半径:  $R(z)$   
 ビーム半径:  $\omega(z)$

となる。  $Z = Z_0$  のとき曲率半径  $R(z)$  は無限大となり、以下の式が導出できる。

$$q(z_0) = -i \frac{\lambda}{\pi \{\omega(z_0)\}^2}$$

これらの式から、ある面における  $q(z)$  の値が知れたとき、他の面における複素パラメーターを見出すことが出来る。また、ビーム半径、曲率半径を計算することができる。

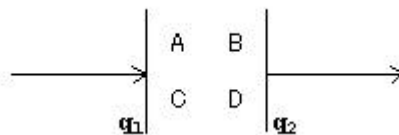


図 2

また図 2 のように光線行列  $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$  で表せる空間をガウスビームが伝搬するとき、複素パラメーター  $q_1$ 、 $q_2$  の変換は、以下のような関係で表せる。

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D}$$

これらの計算式から、目標である  $1 \mu\text{m}$  のビームウエストをセル中に作ることができる実験配置を決定できる。

### 実験配置の決定

ここでセルのガラス壁の厚さは  $1 \text{ mm}$ 、ガラスの屈折率は  $1.5$ 、セル中には水が入り、水の屈折率は  $1.33$  とする。レーザー光がちょうどセル中にビームウエスト

を作る実験配置を考える。以下の行列は、焦点距離  $f$  の薄肉レンズ、間隔  $d$  の空間、屈折率が異なる媒質の平面境界、それぞれの光線行列である。平面境界の光線行列については、入射面側の屈折率を  $n_1$ 、出射面側の屈折率を  $n_2$  とする。

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix}$$

焦点距離  $f$  のレンズ、 間隔  $d$  の空間、 屈折率の異なる媒質の平面境界

これらの光線行列を用い、複素パラメータをセル中にできるビームウエストの位置まで変換する。変換された複素パラメータは実部と虚部とで表せる。実部は 0 となり、それぞれ解くことにより、およそ  $1 \mu\text{m}$  までにビームウエストを絞るための、使用するレンズの焦点距離、レンズ間の距離、実験経路を決定することができる。結果、図 3 で表すように、レンズ 1 の焦点距離は  $0.2 \text{ m}$ 、レンズ 2 の焦点距離は  $0.05 \text{ m}$ 、レンズ 1 までの距離は  $3.11 \text{ m}$ 、レンズ 1 とレンズ 2 の間の距離は  $1.85 \text{ m}$  となり、このときセル中にできるビームウエストは  $1.18 \mu\text{m}$  となる。

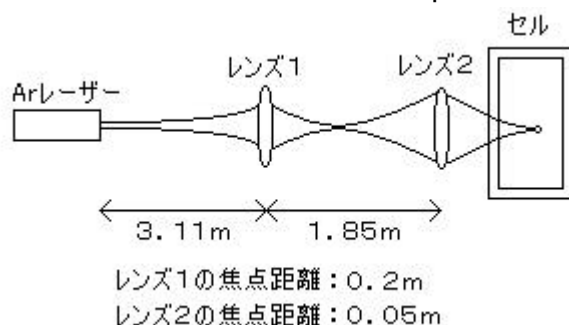


図 3

### 実験概要

図 4 のような配置で実験を行った。波長  $488 \text{ nm}$  の Ar レーザーを用い、セル中には水と直径  $60 \mu\text{m}$  のポリスチレン微小球が入る。図 3 のレンズ 1 とレンズ 2 との間にビームスプリッターを入れ、分かれたレーザー光は、レンズ 2 と同じく焦点距離  $0.05 \text{ m}$  のレンズ 3 で集光され、セル中にビームウエストを作る。また、ビームスプリッターから、レンズ 2、レンズ 3 までのそれぞれの距離は、ほぼ等しくなるように配置し、セルの左右からレーザー光を入れ、微小球をトラップさせる。

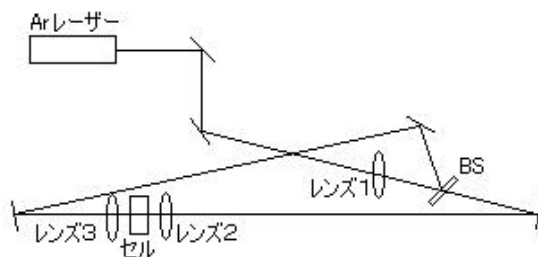
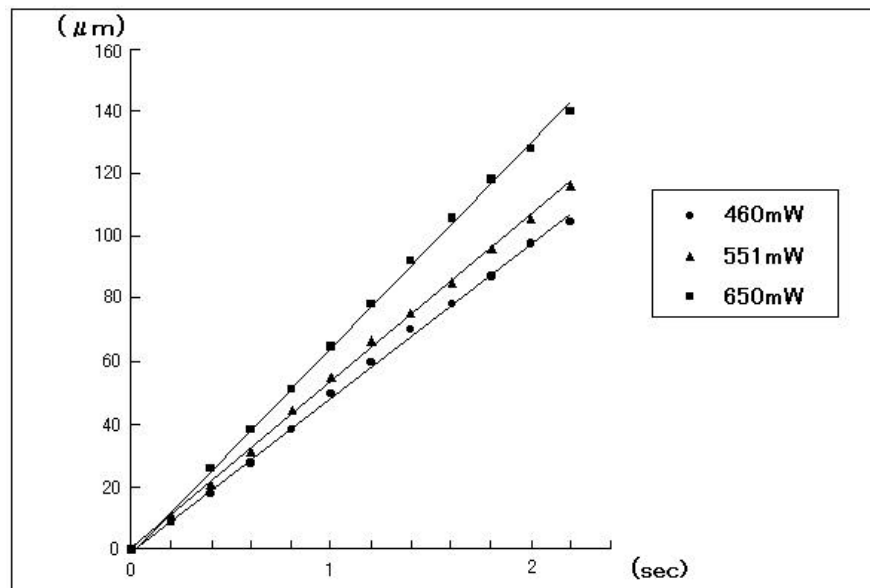


図 4

## 結果

Ar レーザーのパワーを 1 w で発振し、ビームスプリッターで分け、セルの左右からレーザー光を入れ、微粒子をトラップすることができた。また、レンズ 3 からのレーザー光をさえぎったとき、レンズ 2 からのレーザー光の圧力によって微粒子が押され、平衡点から移動するのが観測できた。下記は、レーザーのパワーを変え、片方のレーザーをさえぎったとき、横軸に時間、縦軸に距離をとり、微粒子がどの程度平衡点から移動したかを示すグラフである。



## まとめ

今回の実験から、粒子は確かにレーザー光の圧力によって押され、レーザー光の光軸に向かうように力が働く。受ける力はレーザーのパワーに比例し大きくなり、上記のグラフで、粒子の動く速度はグラフの傾きであり、グラフからもそのことが読み取れる。つまり、左右のレーザー光から受ける力が釣り合う平衡点で、粒子はとどまり、トラップすることができる。また 650 mW のパワーにおいて、速度は約  $70 \mu\text{m}/\text{sec}$  で、これは計算値と比較してもほぼ一致するといえる。

## 参考文献

The pressure of laser light (ARTHUR ASHKIN)

レーザー物理入門 (霜田 光一)