

レーザー光による粒子の浮揚実験

清水和子 研 助川貴信

<はじめに>

まわりの媒質と屈折率の異なる微粒子に光を照射すると光の圧力が生じる。その光の圧力を用いてサブミクロンから数十 μm 程度の粒子を操作する手法は、生物学や化学分野の細胞操作や細胞融合、微粒子の位置制御・配列などの応用が行われ、注目されている。本実験は光ピンセットの研究として、微粒子の浮揚実験を行う。

<光の放射圧>

光は運動量を持ち、光が物体に当たり、屈折して方向が変化するとき運動量は変化する。このとき運動量は保存されるので、球に対して反作用の力が生じる。その力は光の圧力 ... 放射圧と呼ばれている。また、この光の放射圧を用いて物質を捕えたり、運んだりすることができ、光ピンセットの原理となる。

<光のびんの原理>

球の中心に対して対称の位置にある、典型的な a と b の一対の光線を考える(図1)。レーザー強度はガウス分布をしているので光軸上が最も強い。プラスチック粒子にはたらく力の大きさは、それにあたる全光線の及ぼす力の加え合わせで計算できる。

照射した光は、球の表面で部分的に反射したり屈折したりして進行方向が変わり、運動量が変わる。運動量保存則により微粒子の境界面に反作用の力が生じる。ガウス形の光線の中心軸をはずれた位置にあり、まわりの媒質より大きい屈折率をもつ粒子が受ける横方向の力は、非常に微小な表面反射を無視して考えると、透過した成分の力だけになる。2つの光線は

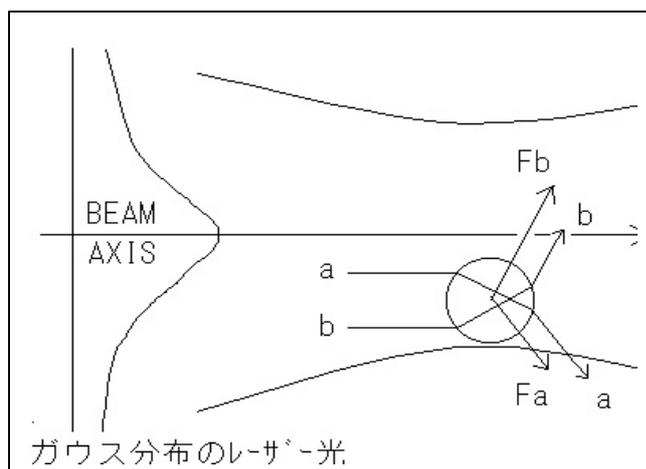
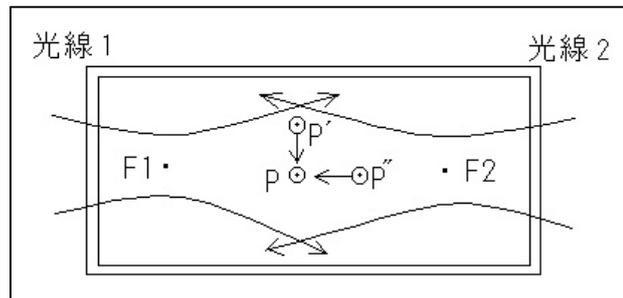


図1

屈折するとき運動量が変わる向きに、それぞれ F_a と F_b 方向の2つの力が生じる。光線 a の方が光線 b よりも強いので力 F_a の方が F_b より強く、光の強度が最大である中心軸に向かって、球をひっぱる正の向きの力がはたらき、光線軸上付近に捕らえられていく。

図2のようにレーザー光を微粒に両方向から照射する場合を考える。点F1とF2は光線1と2の焦点で光線のビームウエストが最小の点である。レーザー光は焦点で最も集光し、その後回折して広がっていく。対称点Pにおかれた球は、どの方向に動いても光による復元力がはたらくので、最終的に点Pに落ち着く。P'では2つの光線の各々の横向き力が粒子をPへ押し戻す。P''では、光線1の力はビーム半径が広がって弱いのにに対して、光線2の力は強いので粒子はPへ押し戻され、平衡点Pで浮揚することになる。

図 2



< ガウスビームの変換 >

基本ガウスビームの式は次式で表される。

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

(z) : ビーム半径
R(z) : 曲率半径

複素ビームパラメーターは曲率半径とビーム半径の足し合わせで表される。

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

q(z) : 複素パラメーター

z = z₀ のとき R(z)

$$\frac{1}{q(z_0)} = -i \frac{\lambda}{\pi \omega^2(z_0)} \quad (\text{式 1})$$

となる。複素パラメーター q は光がある空間を伝播するときに変換される。出射側の出射複素パラメーター q₂ は空間の光線行列が A, B, C, D と入射側の入射複素パラメーター q₁ をもちいて次式のようになる (図 3)

図 3

$$q_2 = \frac{A q_1 + B}{C q_1 + D}$$

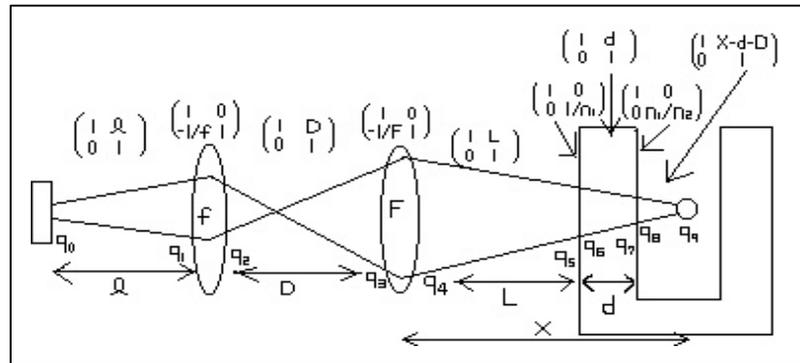


変換された複素パラメーターを (式 1) として代入し、実数部と虚数部で連立方程式を解くことによってビームウエストを決定することができる。

< 実験配置の決定 >

Ar レーザーからセルまでの配置を図4のように考える。

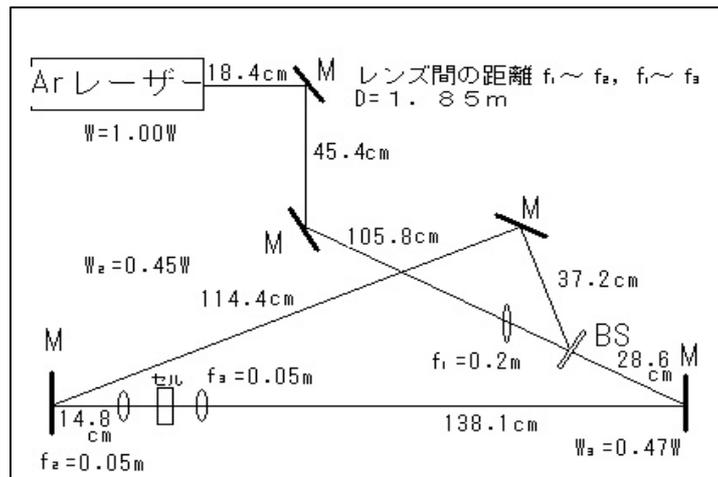
図4



ガラスの屈折率 : $n_1 = 1.5$ 、 水の屈折率 : $n_2 = 1.33$
 セルの厚さ : $d = 0.001 \text{ m}$
 レンズの焦点距離 : 0.2 m 、 0.05 m

レーザー光が微粒子まで至る伝播空間において、計9回のガウスビーム変換を行う。Ar レーザー発振直後の複素パラメーター $q_0 = i \frac{0.2^2}{0.001}$ を q_9 まで変換し、レーザー光のビームウエストがおよそ $1.0 \mu\text{m}$ になるような D (レンズ間の距離) を計算すると $D = 1.85 \text{ m}$ となる。レンズの間にビームスプリッター (BS) を入れ、レーザー光を2つに分け、その互いのレーザー光がセルの両面から入射し、図2のように球に当たる。(図5)

図5



< 測定 >

Ar レーザーのパワーを 1.00 W にして発振する。レーザー光は BS によってレンズ2の方へ $W_2 = 0.45 \text{ W}$ 、レンズ3の方へ $W_3 = 0.47 \text{ W}$ と分かれ、それぞれのレーザー光が微粒子に照射されたときトラップされた。(図6,7)

レンズを通り集光したビームウエストは $W_2 = 1.182 \times 10^{-6} \text{ m}$ 、 $W_3 = 1.179 \times 10^{-6} \text{ m}$ 。レーザー光のパワー密度は $W_2/\text{cm}^2 = 1.071 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 、 $W_3/\text{cm}^2 = 1.076 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ であり、レーザー光を遮ったときの粒子の移動速度は約 $47.41 \mu\text{m/sec}$ であった。次にレーザーパワーを 1.0 w から 1.5 w まで変化させたときの粒子の速度変化は図8のような結果になった。

図6 トラップされる瞬間



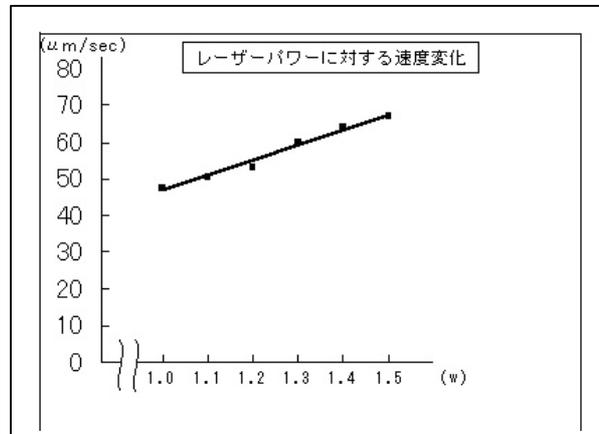
図7 トラップ



(上方向から $60 \mu\text{m}$ の粒子が落ちてくる)

(左右のレーザーで平衡点で安定している)

図8 レーザーパワーに対する速度変化



<まとめ>

今回の実験で、レーザー光の放射圧によって微粒子の移動が観測でき、レーザーパワー 1.0 w で $60 \mu\text{m}$ の微粒子をトラップできた。微粒子がトラップされている状態で、一方のレーザー光を短時間さえぎってみたところ、レーザー光のさえぎった方向へ動き、レーザー光を再びあてると粒子の平衡点に徐々にもどった。微粒子にかかる両方の復元力の力の差によって、粒子は動かされ平衡点にもどされたということになる。

* 参考文献

The pressure of laser light (ARTHUR ASHKIN) 、レーザー物理入門 (霜田 光一)

