

最近の技術から

対向レーザービームによるトラップ技術

坂 口 孝 幸

計量研究所量子部 〒305 つくば市梅園 1-1-4

レーザービームの中に微粒子が吸い込まれトラップされるレーザービームトラップは、Ashkinにより始められた¹⁾。初め、ポリスチレンラテックス粒子で行われていたトラップは、その後、原子のトラップに用いられ²⁾、さらに、微生物のトラップにも用いられるようになつた³⁾。この方法により、特定された微粒子を遠隔的かつ非接触に捕獲・操作することができるようになった。また、機械的接触がないので、より正確な観測・計測が可能になった。この手法は、近年、微生物、微粒子のトラップ、マニュピレーション技術として注目を集めていく⁴⁾。

レーザービームトラップには、対向ビームを用いる方法と、単一ビーム⁵⁾を用いる方法がある。ここでは、Ashkinにより始められた時から行われている対向レーザービームを用いる方法について話を進める。

レーザービームによる微粒子のトラップの原理は¹⁾、次のようなものである（図1）。レーザービームが粒子の表面で屈折する時に、運動量の移行による力を受ける。この時粒子全体に加わる力 FF を半球での力の積分 $F_1 \cdot F_2$ に分けて考える。この力をレーザービームの軸方向 x と半径方向 r について考える。

レーザービームの半径方向では、粒子の中心がレーザービームの軸上からずれると、レーザービームの軸に近

い半球が強い電場の中にいることになる。軸に近い方が力が強くなり ($F_{z1} > F_{z2}$)、レーザービームの中心方向へ粒子が引き込まれる。粒子の中心がレーザービームの軸上に来ると、力がつり合い ($F_{z1} = F_{z2}$)、ここが安定点となる。つまり粒子は、レーザービームの中心に引き込まれるような力を受ける。

レーザービームの軸方向では、 F_1 , F_2 の合力のレーザービームの軸方向への力 F_r を考える。平行レーザービームや鋭角にフォーカスされたレーザービームの場合には、 F_r はレーザービームの進行方向を向き、前方への力を産み出す。

結局、微粒子はレーザービームの中に引き込まれるとビームに沿ってビームの進行方向へ押されることになる。1本のレーザービームでは微粒子は、ビームに沿って輸送されるだけだが、2本のレーザービームを対向させてぶつけることにより3次元トラップが可能になる。微粒子は向かい合う2本のレーザービームの力がつり合う点でトラップされる。平行レーザービームでは、トラップされる場所を特定することはできないが、鋭角にフォーカスされたレーザービームを用いることにより、トラップする場所を対向する2本のレーザービームのそれぞれの焦点の間に特定することが可能になる（図2）。トラップされる位置は、2焦点の中点だけではなく、焦

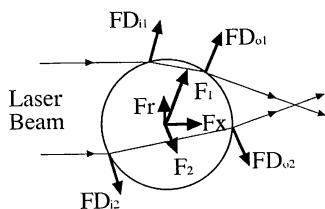


図1 レーザービームによる力の発生

FD: 球の表面で光が屈折することによる力,
 F_1 , F_2 : FD のそれぞれの半球での積分,
 F_z : F_1 , F_2 の合力のレーザービーム軸方向の力,
 F_r : F_1 , F_2 の合力のレーザービームの半径方向の力

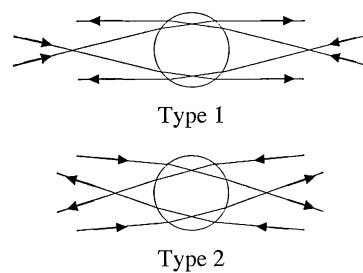


図2 対向レーザービームによるトラップ
Type 1: 互いの焦点の前方に粒子をトラップ,
Type 2: 互いの焦点の後方に粒子をトラップ

点間距離を操作することにより、それぞれの焦点の近く2箇所に同時にトラップをしたり、焦点間なら右寄り、左寄り、真ん中、どの地点でも止めておくことが可能である。

レーザートラップ装置は、光源となるcwレーザー、レーザービーム取り回し用の鏡・ビームスプリッター、トラップ位置を決めるレンズと微動台、試料容器からなっている(図3)。ビームスプリッターで分けられたレーザービームが、試料容器の中でレーザービームの波長程度のオーダーで正確に対向するように光学系を配置する。特にレーザービームの波長よりも小さな径の微粒子をトラップするときにはアライメントの正確さがトラップの可否を決定するポイントとなる。トラップされた粒子の観測は、レーザービームの側方から顕微鏡を用いて行うことができる(図4)。また、微粒子の散乱光による観測も可能である。

レーザービームトラップが発生するビーム半径方向のトラップ力は、粒径の小さい粒子では弱く、粒径の大きい粒子では強くなっている。われわれの実験では、波長514.5 nmのレーザービームを、ビームエキスパンダーで直径16 mmに拡大したものを焦点距離50 mmのレンズで焦点を結ばせている。この時のトラップ力は直径0.09 μmの粒子に対して0.061 nN/W、11.9 μmの粒子に対して89 nN/Wと見積られている。したがって、粒径の小さい粒子をトラップするには、レーザービーム強

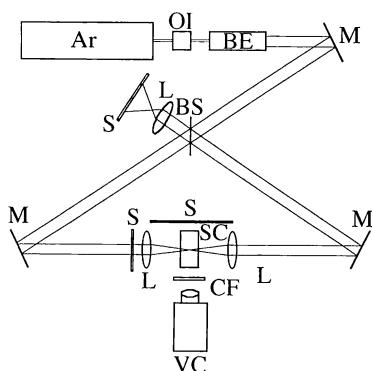


図3 実験装置配置図

Ar:アルゴンイオンレーザー, OI:光アイソレーター, BE:ビームエキスパンダー(ビーム径16mm), M:反射鏡, BS:ビームスプリッター, L:レンズ(焦点距離50mm), SC:試料容器, CF:吸収フィルター, VC:ビデオカメラ, S:スクリーン

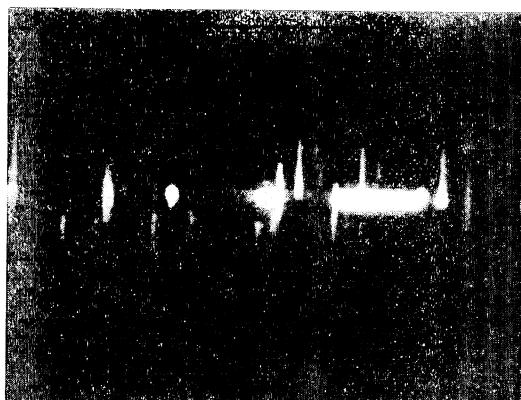


図4 対向レーザービームによるラテックス粒子のトラップの写真

中央で大きく輝いている点がトラップされたラテックス粒子(直径11.9 μm)、トラップされていないラテックス粒子が対流により縦に流れている。右にある太い線は、レーザービームに沿って安定点へ移動しているラテックス粒子の軌跡。

度が必要で、粒径の大きい粒子をトラップするには、ビーム強度は弱くてすむ。

対向レーザービーム法では、ビームを長焦点のレンズを用いて鋭角にフォーカスするため、試料セル内部に光学系を持ち込む必要がなく、対象となる系本来の条件で、観察・操作を行うことができる利点を持つ。これは、レーザービームによる微生物、微粒子の輸送や加工操作を行うのに適している。そのほか、光学系が簡単、粒子をレーザービームに沿って並べられる等の利点を持っている。

文 献

- 1) A. Ashkin : "Acceleration and trapping of particles by radiation pressure," Phys. Rev. Lett., **24** (1970) 156-159.
- 2) A. Ashkin : "Atomic-beam deflection by resonance-radiation pressure," Phys. Rev. Lett., **25** (1970) 1321-1324.
- 3) A. Ashkin and J. M. Dziedzic : "Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria," Science, **235** (1987) 1517-1520.
- 4) W. H. Wright, G. J. Sonek, Y. Tadir and M. W. Berns : "Laser trapping in cell biology," IEEE J. Quantum Electron., **26** (1990) 2148-2157.
- 5) A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm and S. Chu : "Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles," Opt. Lett., **11** (1986) 288-290.

(1991年10月4日受理)