

最近の技術から

レーザーピンセットによる微粒子, 微生物操作

佐藤 俊一*・稲場 文男**

* 東北大学電気通信研究所 〒983 仙台市青葉区片平 2-1-1

** 新技術事業団稲場生物フォトプロジェクト 〒983 仙台市宮城野区榴岡 2-1-6

1. はじめに

光が運動量を持っていることは古くから知られており, その検証実験も今世紀はじめに試みられている。しかしながら, 当時はインコヒーレントな光源しかなかったため光の運動量を観測することはきわめて難しかった。ところがレーザーの出現によって, 微小領域に強度の大きな光を集中することが比較的容易にできるようになり, 光の持つ運動量を検出することや, ささまざまな応用の研究が広汎な分野で活発に行われるようになった。その代表的な例として, 原子のレーザー冷却¹⁾ や微小物体の光トラッピング²⁾ などが挙げられる。本文ではこのうちとくにレーザー光を精巧なピンセットのように用いて, 微小粒子や生体細胞, 微生物の捕捉・転送などの非接触操作を行うことのできるレーザートラッピング法について, われわれの最近の実験結果を中心に述べる。

2. 微小粒子に対する光トラッピングの原理

本文で対象とするような, 光の波長と同程度かそれ以上の大きさをもつ微小物体, すなわち Mie 粒子に対する光の力学的な効果は, 幾何光学的近似により簡単に説明することができる³⁾。

図1のように上方から進行してくるガウス型の強度分布をもつレーザー光を, 開口数の大きなレンズによって強く絞り, その焦点より下方にトラップしようとする球形の微小物体がある場合を考える。A で表した光線は粒子表面で反射および屈折されるが, 微小粒子と周囲の媒質との屈折率差が小さい場合には反射率は十分小さくなるので, 簡単のため以下では屈折光のみを考えることとする。図より屈折された光線Aの運動量変化により, 粒子には運動量を保存するように右上向きの力 F_{Ai} が働くことがわかる。また粒子内を通り抜けて再び粒子外に出射される場合にも右上向きの力 F_{Ao} が働き, この二つの合力として F_A という力が生じる。同様に光線Bによっても F_B という合力が生じ, 球全体には結果として上向きの力 F が働くことになる。この力はレーザー光

ビーム内の粒子の位置によって異なり, 粒子に加わる重力と浮力の差と釣り合う位置で粒子は安定となり, トラップされることになる。

3. 光トラッピング効果による微小粒子の捕捉・転送

図2に光トラッピングのための基本的な装置構成を示す。連続発振するレーザー光を顕微鏡内に導き, 対物レンズで集光する。この焦点付近に微小粒子を誘導してい

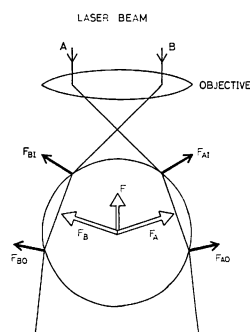


図1 単一レーザー光ビームによる3次元的な光トラッピングの幾何光学的な原理図

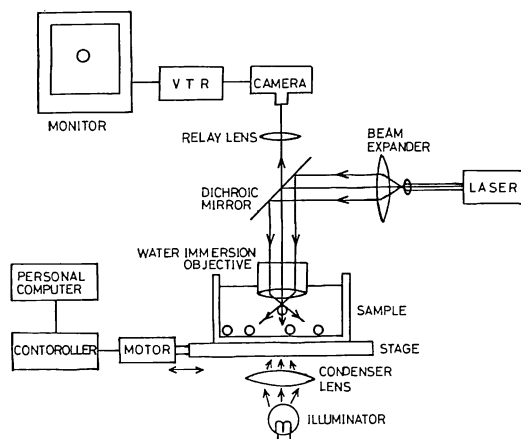


図2 単一レーザー光ビームによる微小物体の光トラッピングの実験装置のブロック図

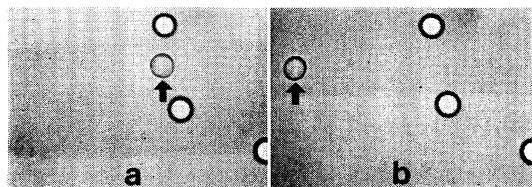


図3 Ar レーザー光によるポリスチレンラテックス球 (直径 $10\ \mu\text{m}$) の光トラッピングの様子 (レーザー出力: $2\ \text{mW}$)
(a) 矢印の球をトラップ, (b) レーザー光ビームの移動とともに球も移動

くと、粒子は引き込まれるようにして光トラップされる。波長 $488\ \text{nm}$ の Ar レーザー光により、直径 $10\ \mu\text{m}$ のポリスチレンラテックス球をトラップしている様子を図3に示す。図3(a)の矢印で示した球にレーザー光を集光して、トラッピングを行っている。他の球はサンプルセルの底に沈んでいてピン트가合っていない。次に図3(b)にみられるようにレーザー光ビームを左方に移動すると、ラテックス球もそれに追従して動くことがわかる。このような光トラッピングは、用いるレーザー光の波長において吸収が十分低く、周囲の媒質よりも屈折率が高い物体であれば可能であり、生体細胞や細菌などのトラッピングも容易に実現することができる⁴⁻⁷⁾。その具体例として図4に $1.3\ \mu\text{m}$ 帯半導体レーザー光を用いてイースト菌をトラップしている様子を示す。この他、われわれは同様の装置でリンパ球や赤血球、バクテリアなどの光トラップの操作も行っており、いずれの場合でもレーザー光の出力は数 mW 程度あれば十分である。

ただしここで留意すべきことは、光トラッピング操作ではレーザー光を強く集光するため、生体試料の場合にはわずかな吸収でも熱や光化学作用による損傷が発生しやすいことである。そのためレーザー光としては可視域よりも近赤外域などの吸収のなるべく少ない波長のレーザー (たとえば半導体レーザー、Nd:YAG レーザーなど) を使用することが望ましい⁵⁻⁷⁾。

光トラッピング効果によって生じるレーザー光ビームに対して垂直な方向の力の大きさは、ストークスの法則から実験的に求めることができる⁵⁻⁷⁾。具体的には、ポリスチレンラテックス球などの球形粒子を光トラッピングし、その粒子または周囲の媒質 (たとえば水) を動かして、粒子がトラップからはずれるときの粒子または媒質の移動速度を測定する。この速度からトラッピング力が算定でき、われわれの実験によって、この力とレーザー光出力の間には比例関係のあることや、波長 $830\ \text{nm}$ の場合の大きさは $10^{-7}\ \text{dyne/mW}$ 程度であることが判

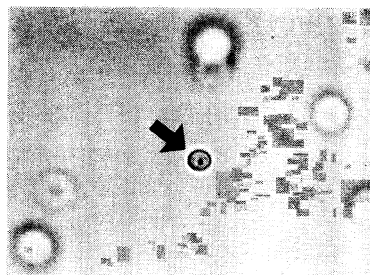


図4 $1.3\ \mu\text{m}$ 帯半導体レーザー光によるイースト菌の光トラッピングの様子 (レーザー出力: $4.5\ \text{mW}$)

明している。また、波長が短いほうがこの値は大きいという傾向のあることも確かめられている⁵⁻⁷⁾。

4. おわりに

レーザー光を用いた光トラッピング効果により、光のピンセットと呼ぶにふさわしい非接触で非破壊な微小物体の捕捉・転送が容易に実現される。しかも3次元的に光トラッピングできる物体の大きさは、現在のところ数十 nm から数十 μm の程度が報告されているが、レーザーや光学系などの改良によってはもう少し広い範囲で可能と考えられる。

また、光トラッピングできる物体の形状も球形に限らず、扁平状や棒状などの種々の生体試料の実験も試みられている。さらにレーザー光ビームの強度分布の異方性を積極的に利用して、捕捉・回転操作を行うことも実証されており⁵⁻⁷⁾、光トラッピング法は非接触、非破壊、無菌的で安全、かつ制御性の優れたまったく新しいマニピュレーションの手法として、複数の光ビームの利用を含めて、広汎な分野での応用が今後期待される。

文 献

- 1) たとえば, P. Meystre and S. Stenholm ed.: J. Opt. Soc. Am., B2 (1985) 1707-1860.
- 2) たとえば, A. Ashkin: Science, 210 (1980) 1081-1088.
- 3) A. Ashkin, J.M. Dziedzic, J.E. Bjorkholm and S. Chu: Opt. Lett., 11 (1986) 288-290.
- 4) 大弓正志, 芝田 洋, 佐藤俊一, 稲場文男: 第36回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 第1分冊, 3p-PB-11 (1989) p. 230.
- 5) 大弓正志, 芝田 洋, 佐藤俊一, 稲場文男: 日本レーザー医学会誌, 10 (1990) 27-30.
- 6) 大弓正志, 芝田 洋, 佐藤俊一, 小川 洋, 稲場文男: 日本レーザー医学会誌, 10 (1990) 31-34.
- 7) S. Sato, M. Ohyumi, Y. Ogawa and H. Inaba: CLEO '90, Tech. Dig. Series, Vol. 7 (Opt. Soc. Am., Washington, DC, 1990), Paper CTUH98, pp. 174-175.

(1990年6月12日受理)