

半導体レーザピンセットによる微粒子の操作

田中 卓夫*, 武居 悟**, 葛谷 幹夫***

Manipulation of Microparticles by Optical Tweezers Using Laser Diode

Takuo TANAKA*, Satoru TAKEI**, and Mikio KUZUYA***

(Received November 25, 2003)

A laser micro-tweezers system was constructed using an optical microscope equipped with a long working distance objective lens and a diode laser. The system incorporates motor-driven beam steering optics which allows the positioning the trapping spot with micrometer resolution. The system was applied to the manipulation of polystyrene particles of 5 μm and 900 nm in diameter. The experimental results showed that polystyrene particles can be trapped and manipulated manually using a joystick connected to a computer. In the case of 900 nm particles, especially, several particles can be trapped in the laser spot and moved together. The trapping force was found to be a piconewton order and linearly increased with the laser power.

Keywords: Optical tweezers, Laser diode, Trapping, Microscope, Objective lens, Microparticle

1. 緒 言

レーザピンセット (LMT: Laser Micro-Tweezers)^{1,2)}は、レーザを物体に照射した際に生ずる光の放射圧を利用してミクロンオーダーの粒子や細胞を非接触、非破壊で捕捉移動する装置で、近年、工学、医学、生物学などの分野で利用が報告されている。³⁻¹⁴⁾しかし、レーザピンセットは一般に装置が大掛かりで、複雑、高価などの理由から、それほど普及していないのが現状である。そこで、我々は、小型、安価で、操作性の優れたレーザピンセットの実用化を目的として性能向上の研究を行っている。¹⁵⁾

前報¹⁵⁾では、半導体レーザと長作動距離対物レンズの組み合わせから成るLMTを試作し、ミクロンオーダーの各種粒子(ポリスチレン球、片栗粉、イースト菌)のトラップが可能であることを確認した。そして、球状でないセラミックス粒子の場合、粒子はトラップされた後、回転する現象を確認した。また、トラップ力は、レーザパワーに比例して直線的に増加することを明らかにした。しかし、試作したLMTは光学系が固定されているため、粒子の移動は出来ない。そこで、今回、著者らは、対物レンズを3軸微動装置に取り付け、ビームの操作ができるように改良した。

*電気工学専攻大学院生 (Graduate Student, Electrical Engineering)

**電子工学科学生 (Student, Department of Electronic Engineering)

***電子工学科 (Department of Electronic Engineering)

本論文では、改良した半導体レーザーピンセットシステムについて述べる。そして、対物レンズに倍率40倍の超長作動対物レンズ（開口数 $NA=0.5$ 、作動距離 $WD=9.8\text{mm}$ ）を用いて実験を行った結果、粒径 $5\mu\text{m}$ のポリスチレン粒子のトラップと移動が可能であることを示す。また、このときのレーザーパワーとトラップ力の関係について調べた結果について述べる。さらに、本システムを用いて粒径 900nm のポリスチレン粒子のトラッピングを行った結果、複数の粒子を捕集しながら、移動できることを示す。

2. LMTシステム

改良したLMTシステムの基本構成は、前報¹⁵⁾のシステムと同様で、Fig.1に示すように顕微鏡、半導体レーザー、CCDカメラ、照明、モニタおよび画像処理用パソコンから構成される。

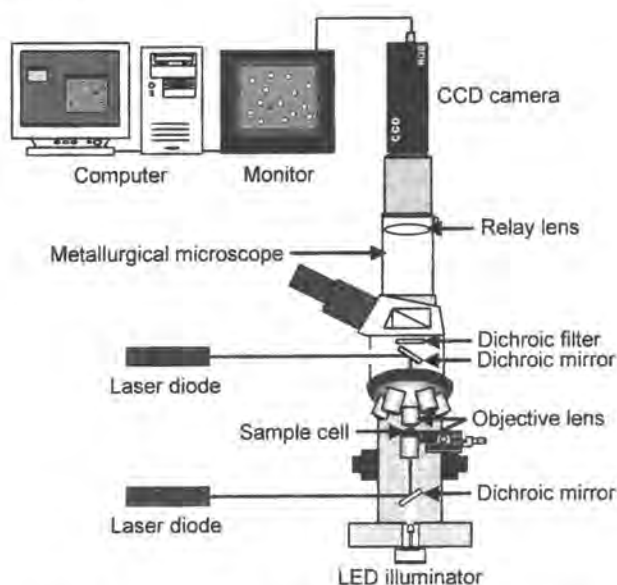


Fig.1 Schematic diagram of the laser micro-tweezers (LMT) system.

顕微鏡にはNikon社製の金属顕微鏡OPTIPHOTを用いた。レーザービームは、顕微鏡付属の対物レンズと試料ステージの下側に設置した対物レンズにより、ダイクロイックミラーを介して試料の上方および下方から入射でき、2台の半導体レーザーを用いることにより、2方向から粒子を独立にトラップできる。半導体レーザーには、可視光（赤色）レーザー（発振波長： 685nm 、最大出力： 20mW 連

続発振）を用いた。照明光は試料の下方から入射させ、下側のレンズを利用して試料に照射している。照明には小型で発熱の少ない高輝度（ 50cd ）の緑色LEDを用いた。試料およびトラッピングの様子は上方に設置したレーザービーム減光用ダイクロイックフィルタおよびリレーレンズを介してCCDカメラでモニタし、ビデオ信号はパソコンに転送され、画像の観測、録画ができるようになっている。

今回、微粒子操作を可能とするために、下方に設置した対物レンズは、Fig.2に示すように、3軸微動装置（シグマ光機、SOM-B13E）に接続した。本装置は付属のコントローラ（シグマ光機、OMEC-4BF）により最小移動距離 $1\mu\text{m}$ 、移動速度 $1.5\sim 100\mu\text{m/s}$ でX,Y,Z軸方向の移動が可能である。コントローラはRS-232Cを介してパソコンに接続され、当研究室で開発したレーザービーム操作ソフトによりマウスあるいはジョイパッドを用いてレーザースポットを移動することができる。

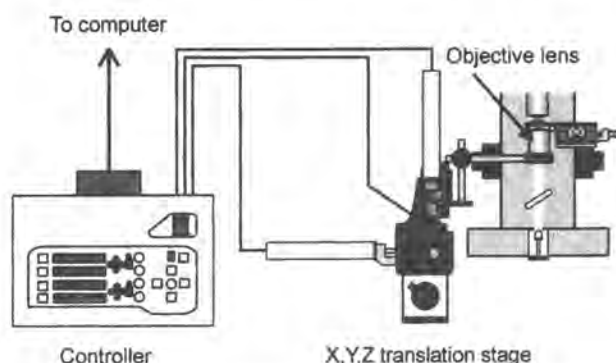


Fig.2 Schematic diagram of the manipulation system.

なお、実験にはTable1に示す2種類の対物レンズを使用した。また、トラッピング用試料として、粒径 $5\mu\text{m}$ と 900nm のポリスチレン粒子を用いた。いずれの粒子も水中で拡散させた後、スライドガラスとカバーガラスで挟み込み、トラッピング実験を行った。

Table1 Specification of objective lens.

	Working distance (WD) [mm]	Numerical aperture (NA)
Long working distance (LWD) objective $\times 60$	4.9	0.7
Extra-long working distance (ELWD) objective $\times 40$	9.8	0.5

3. 実験結果

微粒子の操作 本実験では、微粒子の操作を目的とするため、Fig.3に示すように下側の対物レンズを用い、レーザービームを試料下方から入射させ、粒子のトラッピングを行った。対物レンズには40倍の超長作動距離対物レンズを用いた。

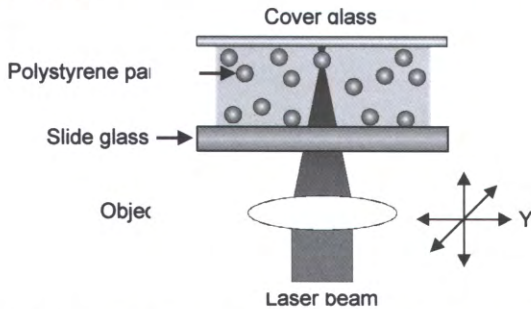


Fig.3 Manipulation of particle by upward-directed laser beam.

まず、試料に粒径 $5\mu\text{m}$ のポリスチレン粒子を用い、そのトラップと移動を試みた。その結果、Fig.4の一連の写真に示すように、粒子aはトラップされた後、ジョイパッドの操作により任意の位置に移動できることを確認した。

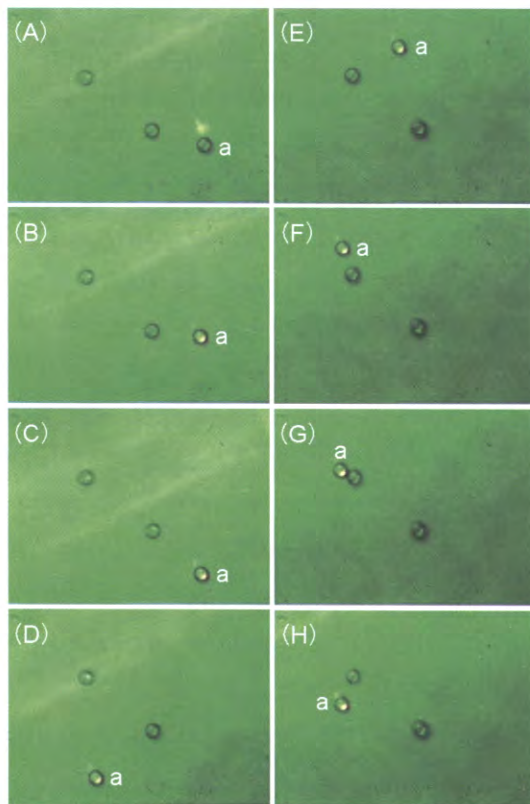


Fig.4 Images from the CCD camera showing the manipulation of a $5\text{-}\mu\text{m}$ polystyrene particle.

次に、粒径 900nm のポリスチレン粒子を用いて同様の実験を行った。その結果、Fig.5に示すように移動した粒子がレーザースポットの中心に引き寄せられ、トラップされることを確認した(Fig.5(A))。次に、レーザースポットを移動させると付近の粒子を捕集しながら複数の粒子を移動できることを確認した(Fig.5(B))。レーザービームを遮断するとトラップされていた複数の粒子は、ブラウン運動により拡散する(Fig.5(C))。

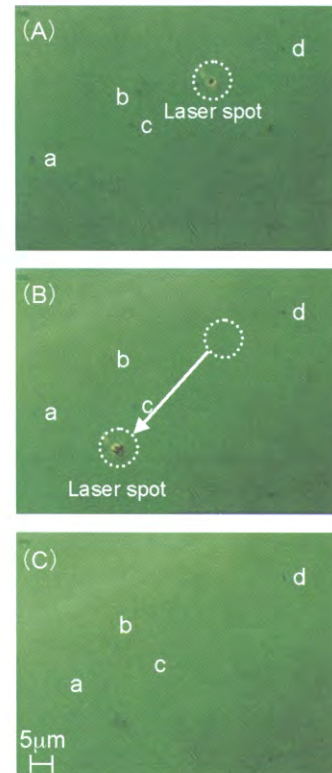


Fig.5 Images from the CCD camera showing the manipulation of polystyrene particles of 900 nm in size.

レーザーパワーとトラップ力 半導体レーザーを試料の下方から入射したときのレーザーパワーとトラップ力(水平成分)の関係を定量的に測定した。実験には、水中に拡散した粒径 $5\mu\text{m}$ のポリスチレン粒子を用い、レーザーパワーはND減衰フィルタを用いて変化させた。トラップ力 F は以下のストークスの法則を用いて計算した。

$$F=6\pi\eta r v$$

ここで、 η は流体の粘性率、 r は粒子の半径、 v は粒子の速度である。実験条件より $\eta=10^{-3}\text{Ns/m}^2$ 、 $r=2.5\mu\text{m}$ を用いた。

なお、前報¹⁵⁾のHe-Neレーザを試料上方から入射したときのトラップ力の測定では、粒子の速度 v は粒子がレーザスポットの周辺から中心にトラップされるまでの時間と移動距離から求められた平均速度を用いたため、正確なトラップ力の測定はできなかった。そこで今回、粒子をトラップ後、レーザスポットの移動速度を上昇させ、粒子がトラップからはずれる限界の速度を用いて、トラップ力を求めた。

Fig.6はトラップ力の測定結果で、(a)は40倍の超長作動距離対物レンズ、(b)は60倍の長作動距離対物レンズの結果である。トラップ力は5回の測定の平均値である。横軸はレンズ集光後のレーザパワーを示し、縦軸にトラップ力を示す。この結果より、いずれの対物レンズの場合もトラップ力はレーザパワーに比例して直線的に増加し、また、トラップ力の大きさはピコニュートンのオーダーとなる。また、同じレーザパワーのとき、60倍の長作動距離対物レンズは、40倍の超長作動距離対物レンズに比べて約0.13pN大きなトラップ力が得られた。

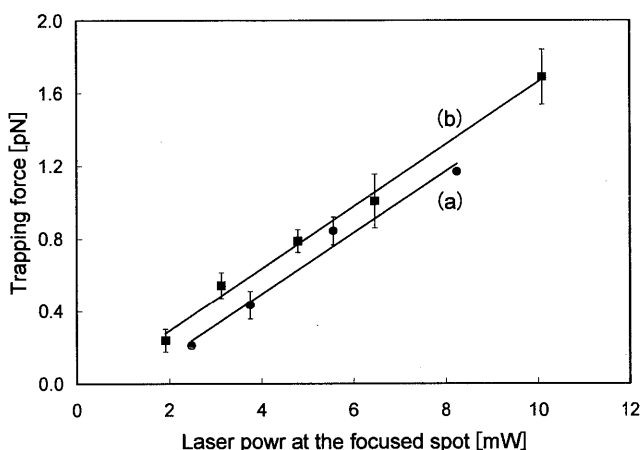


Fig.6 Relation between the transverse trapping force and the laser power.

(a) ELWD objective ($\times 40$, NA=0.50, WD=9.8mm)

(b) LWD objective ($\times 60$, NA=0.70, WD=4.9mm)

最近、Ulanowskiら¹⁶⁾が、近赤外半導体レーザ(820nm, 20mW)と水浸対物レンズ($\times 70$, NA=1.23, WD=0.2mm)の組み合わせを用いてレーザパワーとトラップ力の関係を測定している。彼らの結果は、使用した対物レンズの開口数が我々のレンズと比べて2倍以上大きいため、

トラップ力が約2倍となっている点を除けば、我々の結果と同様である。

4. 結 言

ビーム操作機能を備えた半導体レーザピンセットシステムを開発した。本システムを用いて、粒径 $5\mu\text{m}$ と900nmのポリスチレン粒子のトラッピングを行った結果、トラップ粒子を任意の位置に移動でき、特に900nmの粒子の場合、複数の粒子を捕集しながら移動可能なことを確認した。また、トラップ力はレーザパワーに比例して直線的に増加し、その大きさはピコニュートンのオーダーであることがわかった。

参 考 文 献

- 1) A.Ashkin : *Phys.Rev.Lett.*, **24**, 156 (1970).
- 2) A.Ashkin : *Science*, **210**, 1081 (1980).
- 3) 杉浦忠男, 河田聡, 南茂夫 : *分光研究*, **39**, 342 (1990).
- 4) 橘彰一, 浮田宏生 : *光学*, **27**, 524 (1998).
- 5) A.Ashkin, J.M.Dziedzic, and T.Yamane : *Nature*, **330**, 769 (1987).
- 6) H.Misaura, K.Sasaki, M.Kobayashi, N.Kitamura, and H.Masuhara : *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 310 (1992).
- 7) 佐藤俊一, 稲塚文男 : *レーザー研究*, **20**, 2 (1992).
- 8) 笹木敬司 : *光学*, **21**, 22 (1992).
- 9) 増原極微変換プロジェクト 編 : "マイクロ化学" (化学同人, 1993) p.63.
- 10) T.T.Perkins, S.R.Qualce, D.E.Smith, and S.Chu : *Science*, **264**, 822 (1994).
- 11) J.T.Finter, R.M.Simmons, and J.A.Spudich : *Nature*, **368**, 113 (1994).
- 12) 倉知正, 田代英夫 : *レーザー研究*, **24**, 1148 (1996).
- 13) 三澤弘明, 三輪昌史 : *精密工学会誌*, **63**, 959 (1997).
- 14) P.Galajda and P.Drmos : *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 249 (2001).
- 15) 田中卓夫, 葛谷幹夫 : *中部大学工学部紀要* **38**, 61 (2002).
- 16) Z Ulanowski and I K Ludlow : *Meas. Sci. Technol.*, **11**, 1778 (2000).