

研究速報

ミクロンオーダーの金微粒子の光トラッピング

佐藤 俊一・原田 康則*・早稲田嘉夫

東北大学素材工学研究所 〒980-77 仙台市青葉区片平 2-1-1

(1994年8月15日受付, 1994年10月25日受理)

Optical Trapping of Micrometer-Sized Gold Particles

Shunichi SATO, Yasunori HARADA* and Yoshio WASEDA

Institute for Advanced Materials Processing, Tohoku University,
2-1-1, Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-77

(Received August 15, 1994; Accepted October 25, 1994)

Two-dimensional optical trapping of micrometer-sized gold particles are demonstrated using a TEM₀₀ and a TEM₀₁* mode Nd: YAG laser beams. By using line-shaped focused beam, simultaneous trapping of plural particles is also demonstrated. Calculated results of trapping forces considering the absorption, based on ray optics, agreed with the experimental results.

1. はじめに

光トラッピング法は“光ピンセット”とも称され、マイクロメーターないしナノメーター程度の微粒子をその焦点付近に非接触かつ非破壊で捕捉する技術である¹⁾。これまでには、主に生体細胞²⁾や生体内物質、高分子などの透明な微粒子を中心とした応用研究がなされてきた。これらに対し走査レーザービームを用いることによってマイクロメーターの金属微粒子³⁾や、あるいはレーザー光ビームを走査することなく直径 38 nm の金微粒子を光トラッピングした例⁴⁾が報告されている。

本文では、マイクロメーター程度の大きさの金微粒子をビーム走査せずに光トラッピングした結果について報告する。実験では、ガウス型 (TEM₀₀) およびドーナツ型 (TEM₀₁*) の強度分布を持つ Nd: YAG レーザー光ビームの焦点が金微粒子の下部付近にある場合にのみ 2 次元的な光トラッピング（すなわち、光軸に垂直な方向のみに粒子をトラップする）が観測された。また、シリンドリカルレンズを用いて焦点での強度分布を線状にし

た場合、複数の微粒子を同時にトラップできることも観測された。さらに、幾何光学理論に基づき任意の焦点位置における光トラッピング力を計算したところ、実験事実をよく説明できる結果が得られた。

2. 金微粒子に対する光トラッピングの実験方法および結果

用いた金微粒子はほぼ球形であり、直径はおよそ 2~5 μm の間に分布している。これをガラスのシャーレに入れた後、蒸留水を加え実験に用いた。光トラッピングのための波長 1.064 μm の Nd: YAG レーザー光を顕微鏡内に導き、開口数 1.2 の水浸式対物レンズで集光した。焦点付近でのビームウエストは約 0.5 μm と見積もられる。光トラッピングの様子は顕微鏡上に取り付けた CCD カメラによって観察した。

Fig. 1 は約 50 mW のガウス型レーザー光ビームを用いて光トラップされた金微粒子を示している。Fig. 1(a) の中央付近の矢印が示されている直径約 3 μm の金微粒子にレーザー光が照射されている。この状態でレーザー光ビームを下方に移動すると、Fig. 1(b) のようにトラップされた粒子のみが移動していることがわかる。この際、レーザー光ビームの焦点は金微粒子の下側、すなわちガラスシャーレ側にあることに注意されたい。も

* 現在: 宇部興産(株)機械・エンジニアリング事業本部

〒755 宇都市大字小串字沖の山 1980

Present address: Machinery and Engineering Division, UBE Industries, Ltd., 1980, Okinoyama, Kogushi, Ube 755

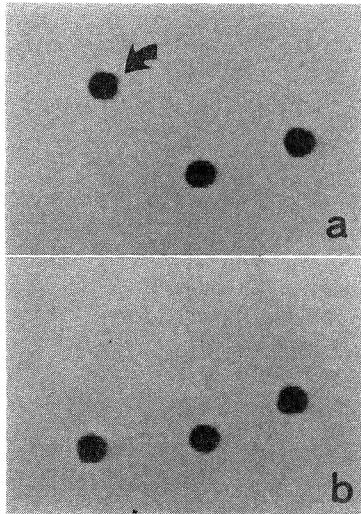


Fig. 1 Optically trapped micrometer-sized gold particle. (a) A particle indicated by an arrow is optically trapped. (b) By moving the TEM₀₀ mode laser beam of approximately 50 mW, the trapped particle moves with the laser beam.

し、焦点が微粒子の上側にある場合には、微粒子は押されるようにしてビームの光軸から遠ざかるのが観測される。すなわちその場合には、光トラッピングは実現されない。

Fig. 1 のような光トラッピングは、ドーナツ型の強度分布を持つレーザー光ビームでも同じように認められた。また、どちらの強度分布の場合でもレーザー光強度を上げ、かつビームの焦点を微粒子に近づけていくと、丸い気泡のようなものが突然発生して微粒子を飛ばしてしまい、光トラッピングができなくなることが観測された。これは、微粒子によってレーザー光が吸収され、その結果生じた熱によるものと考えられる。したがって、ドーナツ型ビームを用いて微粒子を光のかごに閉じこめることによって3次元的な光トラッピングを行うこと³⁾はわれわれの実験では実現できなかった。なお、レーザー光や顕微鏡ステージを 50 μm/s 以上の速さで移動しても、金微粒子は光トラッピングされた状態を保っていた。

次に、レーザー光導光系の一部にシリンドリカルレンズを用いて焦点形状を線状にした場合の光トラッピングの例を Fig. 2 に示す。線状のビーム焦点は Fig. 2(a) の中央付近に横に配置しているが、そこに矢印で示された直径 2~4 μm の 4 個の金微粒子が光トラッピングされている。この場合約 30 mW のドーナツ型のレーザー光ビームを用いている。顕微鏡ステージを紙面に対して

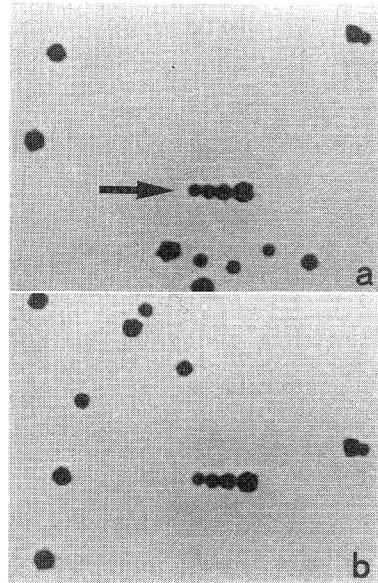


Fig. 2 Optically trapped four gold particles. Trapped particles indicated by an arrow do not change their position in spite of the movement of the microscope stage as shown in (b). A TEM_{01*} mode Nd: YAG laser beam was approximately 30 mW.

下方に移動すると Fig. 2(b) のように周囲の粒子のみが移動し、光トラッピングされた 4 個の粒子は同じ位置に留まっていることがわかる。このような光トラッピングはガウス型のビームを用いた場合にも観測された。また、Fig. 1 と同様にレーザー光焦点が粒子の下方に位置している場合にのみ光トラッピングが可能であった。

3. 金微粒子に対する光トラッピング力の計算および考察

以上で観測された実験結果を考察するために、幾何光学理論に基づいて光トラッピング力の計算を行った。吸収のない球体に対する理論は既に報告されているが⁵⁾、本研究ではその計算手法を基に、屈折率が複素数 ($m = n - ik$) で表されるような物質についての計算方法を新たに開発した。ここで n は屈折率、 k は消衰係数である。なお、光圧力によって生じる力 F は

$$F = Qn_b I/c \quad (1)$$

で表した。ここで I は光の強度、 c は真空中の光の速度、 n_b は球の周囲の媒質の屈折率、 Q は力への変換率を表す無次元量である。以下では Q によって力を評価することにする。

計算では、入射光は反射、屈折および吸収されると

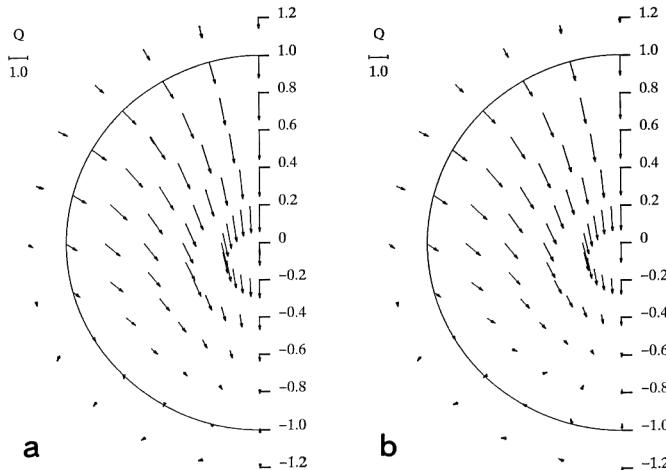


Fig. 3 Distribution of calculated Q for a $6 \mu\text{m}$ diameter gold particle ($m = 0.28 - 7.5i$). (a) Gauss beam, (b) Donut beam.

し、反射および屈折により生じる力は文献5)と同様にしたが、屈折角は吸収のない場合と異なること⁶⁾を考慮した。吸収による力の向きは光の進行方向と同じとし、吸収された光の運動量がすべて力に変換されたとした。ただし、ここで生じた力は球の半径方向に垂直な成分を持っており、これは球の回転運動に寄与するため除外して計算を行った。

Fig. 3(a) は直径 $6 \mu\text{m}$ の金微粒子 ($m = 0.28 - 7.5i$)⁷⁾について、球全体に働く力の計算結果を、ビーム焦点位置を変化させて表示したものである。レーザー光ビームの集光角は用いた対物レンズの開口数から 65° とし、レンズ開口半径に対するガウス型ビーム半径の比は 1.7 としている。力の分布は光軸に関して対称であるため、球の左半分（半円の部分）についてのみ表示されている。図ではひとつの矢印の起点の位置にレーザー光ビームの焦点がある時の球全体に働く力 (Q で表示) が、多数の異なる焦点位置に対して表示されている。各々の矢印の向きと長さはそれぞれ Q の向きと大きさを表している。右側の数値は球の半径で規格化した球中心からの距離を示しており、マイナス記号は球の下部であることを示している。

図からわかるように、焦点が球の上部にある場合、力は右下向きとなっている。これは球を光軸から押し出すような力が働くために、光トラッピングは実現されないことを示している。これに対して球の下部では左向きの成分を持つ場合があり、このとき球は光軸方向に引き寄せられて光トラッピングされることを示している。これらの計算結果は、前述した実験結果と定性的に一致している。また、光トラッピングされる状態での Q の値とし

て約 0.19 が得られた。この値は吸収のない場合の値 0.326⁵⁾ と比較するとやや小さいものの、捕捉・輸送などに使用する上では十分な力が生じることを示唆している。

Fig. 3(b) はドーナツ型ビームの場合についての計算結果であり、開口に対するビーム径比は 1.0 である。全体として力の分布はガウス型の場合と同じであるが、球下部での左向きの成分が大きく、より光トラッピングしやすい傾向があることがわかる。

また、いずれの場合も一部では上向きの力が生じていることも示されており、3次元的なトラッピングの可能性を示唆している。しかしながら、実験ではレーザー光出力を上げたり、焦点位置を上げたりすると気泡発生のために光トラッピングの維持が困難になり、3次元的なトラッピングは観測されなかった。もし、吸収により発生する熱の効率的な冷却方法が実現されれば、金微粒子を持ち上げることも可能になると考えられる。

なお、本論文において観測された現象に対して、熱による力 (radiometric force) が関与している可能性も考えられる。しかしながら、金微粒子の消衰係数が大きいため光は球のごく表面でほとんど吸収されていると考えられることと、radiometric force は高温部から低温部の方向に働くことを考慮すると、ガウス型ビームを用いた場合には radiometric force は球を光軸から押し出すように働き、光トラッピングはできなくなるものと考えられる。実験ではガウス型ビームでも 2 次元的な光トラッピングが可能であったことから、radiometric force よりも光圧力の方が大きく寄与しているものと判断される。

4. ま と め

本論文では、ガウスおよびドーナツ型の強度分布を持つ Nd: YAG レーザービームを用いてミクロンオーダーの球形金微粒子に対する光トラッピングを試みた。その結果 2 次元的ながら光トラッピングが実現された。また、線状の焦点を持つビームを用いることによって複数の粒子を同時に光トラッピングできることも見いだされた。さらに、幾何光学理論に基づいて、吸収を考慮した光トラッピング力の計算方法を新たに開発し、力の分布を求めたところ、実験結果をよく説明できることを明らかにした。

本研究の一部は文部省科学研究費補助金によって行われた。また、有益な助言をいただいた東北工業大学稻場文男教授に感謝します。

文 献

- 1) 例えは、佐藤俊一、稲場文男：“微小物体・細胞のレーザー光トラッピング”，光学，**21** (1992) 77-82.
- 2) 例えは、A. Ashkin, J.M. Dziedzic and T. Yamane: “Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams,” Nature (London), **330** (1987) 769-771.
- 3) K. Sasaki, M. Koshioka, H. Misawa, N. Kitamura and H. Masuhara: “Optical trapping of a metal particle and a water droplet by a scanning laser beam,” Appl. Phys. Lett., **60** (1992) 807-809.
- 4) K. Svoboda and S. Block: “Optical trapping of metallic Rayleigh particles,” Opt. Lett., **19** (1994) 930-932.
- 5) A. Ashkin: “Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime,” Biophys. J., **61** (1992) 569-582.
- 6) 鶴田匡夫：応用光学 I (培風館、東京、1990) pp. 42-45.
- 7) D.W. Lynch and W.R. Hunter: “Comments on the optical constants of metals and an introduction to the data for several metals,” *Handbook of Optical Constants of Solids*, ed. E.D. Palik (Academic Press, Orlando, 1985) pp. 275-367.