

レーザ光ピンセットによる微粒子の 回転操作

Rotation of Micro-particles by Laser Optical Tweezers

鈴木 洋平・スズキ ヨウヘイ・Suzuki Youhei／神谷 裕樹・カミヤ ユウキ・Kamiya Yuuki／葛谷 幹夫・
クズヤ ミキオ・Kuzuya Mikio

SUBJECT

レーザ光ピンセットによる微粒子の回転操作

ABSTRACT

円偏光レーザを用いて粒子の回転実験を行った結果、粒子は円偏光の角運動量によって回転し、回転方向は円偏光の向きによって変えられることが確認できた。回転トルクはレーザパワーに比例して直線的に増加し、レーザ出力 1mW あたり 10^{-18} Nm のオーダーのトルクが生成された。また、直線偏光レーザによる形状異方性の粒子の回転では、レーザの焦点を粒子の上下に移動することにより回転の向きを制御できることも確認できた。

レーザ光ピンセットによる微粒子の回転操作

鈴木 洋平*, 神谷 裕樹**, 葛谷 幹夫***

Rotation of Micro-Particles by Laser Optical Tweezers

Youhei SUZUKI*, Yuuki KAMIYA** and Mikio KUZUYA***

(Received October, 2, 2013)

This paper describes experiments regarding the optical rotation of micrometer-sized particles via use of the angular momentum of a circularly polarized laser beam. A linearly polarized He-Ne laser (632.8 nm, 75m W) was circularly polarized using a quarter-wave plate and was focused onto an oval particle, which was deformed by pressing down a polystyrene latex of 10 μm in diameter. The experimental results showed that the particle can be rotated clockwise and counter-clockwise with right and left circularly polarized laser beams, respectively. Under these conditions, the torque generated was of the order of 10^{-18} Nm and was linearly proportional to the power of the laser. The values of torque were compared with the total angular momentum of the laser beam. It was also found that the direction of circle rotation via the linearly polarized laser beam could be controlled by changing the position of the particle in relation to the focal point of the laser beam.

Keywords: Optical tweezers, Circularly polarized laser, Angular momentum, Torque, Rotation

1. 緒 言

レーザ光ピンセット (LOT: Laser Optical Tweezers) は、光の放射圧を利用してマイクロメートルあるいはナノメートルサイズの微粒子を非接触・非破壊で捕捉、移動する装置である^{1,2)}。LOTは、近年、工学、医学、生物学などの分野で利用が報告され、この装置への注目が高まりつつある³⁻⁸⁾。しかし、市販されているLOT装置は、一般に大掛かりで複雑、高価などの理由から広く普及していない。

そこで、我々は小型、安価で操作性の優れた光ピンセットの実用化を目的として、装置の開発およびその性能向上のための基礎研究を行っている。

開発中のLOTは、市販の光学顕微鏡の照明装置を取り外して、レーザ光が試料に集光できるように改造したもので、極めてシンプルな構成の装置である。対物レンズには試料セルの形状の制約が少なく、セッティングが容易であるという観点から、長作動距離レンズを採用している。そして、レーザにHe-Neレーザと可視および近赤外の半導体レーザを用い、各種微粒子(プラスチック粒

*電気電子工学専攻大学院生 (Graduate Student, Electrical and Electronic Engineering)

**シミズ工業株式会社 (Shimizu Industry Co., Ltd.)

***電子情報工学科 (Department of Electronics and Information Engineering)

子, ガラスビーズ, セラミック粒子, 片栗粉, イースト菌)のトラップ, 移動および回転が可能であることを示すとともに, その基礎特性を明らかにしてきた⁹⁻¹¹⁾.

ところで, LOTで粒子を回転させるには2つの方法がある. 1つは物体形状による反射, 屈折光の異方性を利用して, 物体の境界面で生ずる運動量変化を回転トルクに変換する方法で, もう1つは円偏光の光子が有する角運動量($h/2\pi$)の物体への移動を利用して回転させる方法である. 我々のこれまでの回転実験は前者の方法を用いてきた. そこで今回, 円偏光レーザを用いて回転実験を行い, 両者の方法による回転の操作性および特性について比較・検討した.

2. LOTシステム

LOTシステムは, Fig.1に示すように顕微鏡, レーザ, 試料照明装置および画像観測・解析装置から構成されている. 顕微鏡にはNIKON社製の金属顕微鏡(OPTIPHOT)を用いた.

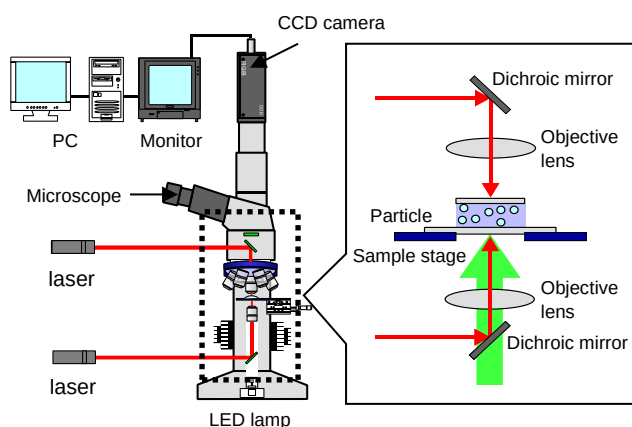


Fig.1 Schematic diagram of the laser optical tweezers (LOT) system.

本システムは, 試料の上方および下方にそれぞれダイクロイックミラーと対物レンズからなる集光系を設置しており, 2方向から独立にトラップを行うことができる. トラップの様子は上方の対物レンズを介してCCDカメラでモニターするとともに, ビデオ信号はパソコンに転送され動画の観測, 保存が行える. なお, CCDカメラと対物レンズの間には, 必要に応じてレーザ光カット用ダイクロイックフィルタが挿入される. 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)に接続され, 最小移動距離 $1\mu\text{m}$, 移動速度 $1.5\sim 100\mu\text{m/s}$ でレーザスポットを操作できる.

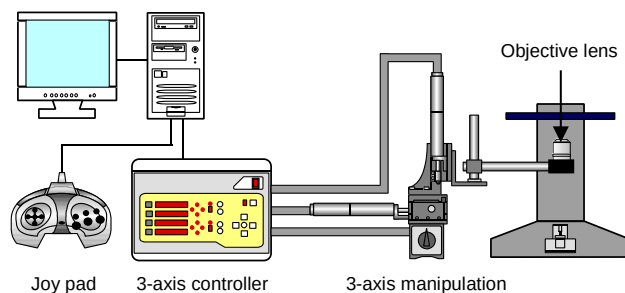


Fig.2 Schematic diagram of the manipulation system.

3. 回転実験

回転実験は, Fig.3に示すようにレーザを試料上方から入射させ, $\lambda/4$ 波長板を用いて円偏光にして行った. 使用したレーザは直線偏光(消光比,500:1)のHe-Neレーザで, ビーム径は 1.25mm である. レーザの出力は 75mW で一定のため, ND減衰フィルタを用いて出力を調整した.

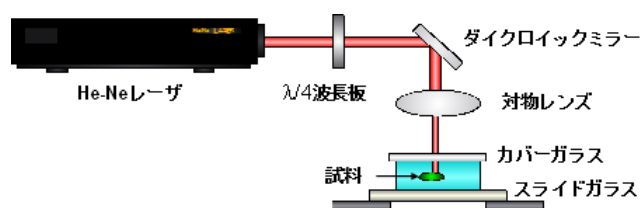


Fig.3 Optical arrangement for the rotation of particle.

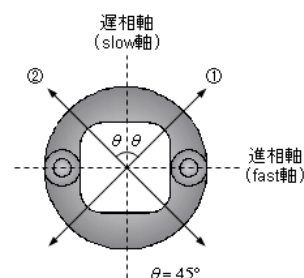


Fig.4 a quartz $\lambda/4$ -wave.

$\lambda/4$ 波長板はシグマ光機(株)の波長板(WPQ-6328-4M)を用い, Fig.4に示すようにレーザの直線偏光を①あるいは②の方向に合わせることで, 左右の円偏光が得られる. 対物レンズには, 超長作動距離の100倍レンズ(NIKON, NA=0.75, WD=4.7mm)を使用した. 試料には粒径 $10\mu\text{m}$ のラテックス粒子を用いた. しかし, 球形の粒子では回転の確認および回転速度の測定ができないため, 楕円球状に変形させて使用した.

3. 実験結果

円偏光による回転

直線偏光のレーザで変形ラテックス粒子をトラップした後、 $\lambda/4$ 波長板を回転させて円偏光にした。その結果、Fig.5に示すようにトラップ粒子(Fig.4-9①)は左回転し(Fig.4-9②～⑤)、直線偏光に戻すと回転は止まり(Fig.4-9⑥)、逆回りの円偏光で右回転した(Fig.4-9⑦～⑨)。この実験を数回繰り返した結果、再現性の良い回転操作が行えた。これより、円偏光レーザで粒子が回転でき、偏光の向きを変えることにより粒子の回転方向を操作できることが確認できた。

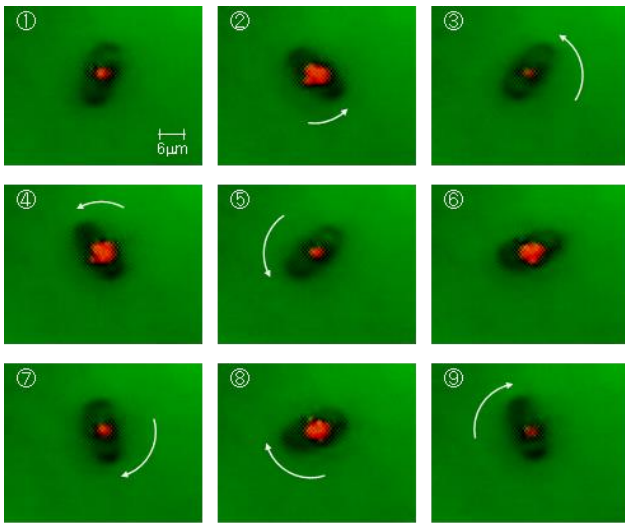


Fig.5 CCD camera images showing the rotation of a particle.

そこで、円偏光レーザによって生ずる回転トルクを測定した。トルク T は、流体中で球状粒子が角速度 ω で回転するときに受ける粘性トルク

$$T = 8\pi\eta r^3\omega \quad (1)$$

を用いて計算した。ここで、 η は流体の粘性率、 r は粒子の半径、 $\omega=2\pi n$ [rad/s]、 n は回転速度である。実験条件より、 η は 0.89×10^{-3} Ns/m²(水: 25℃)を用いた。半径 r は、測定に用いたラテックス粒子は楕円球状のため、長軸と短軸の平均値を用いた。なお、粒子の回転速度は、Fig.6に示すようにビデオエディタを利用し、画像をコマ送りにして測定した。



Fig.6 Video images.

Fig.7は、レーザパワーを変化させて、円偏光レーザによって生ずる回転トルクを測定した結果で、(a)は右回り円偏光、(b)は左回り円偏光の結果である。測定値は4個の粒子の測定値の平均である。同図の右の縦軸には回転トルクに対応する回転速度の値が目盛っている。

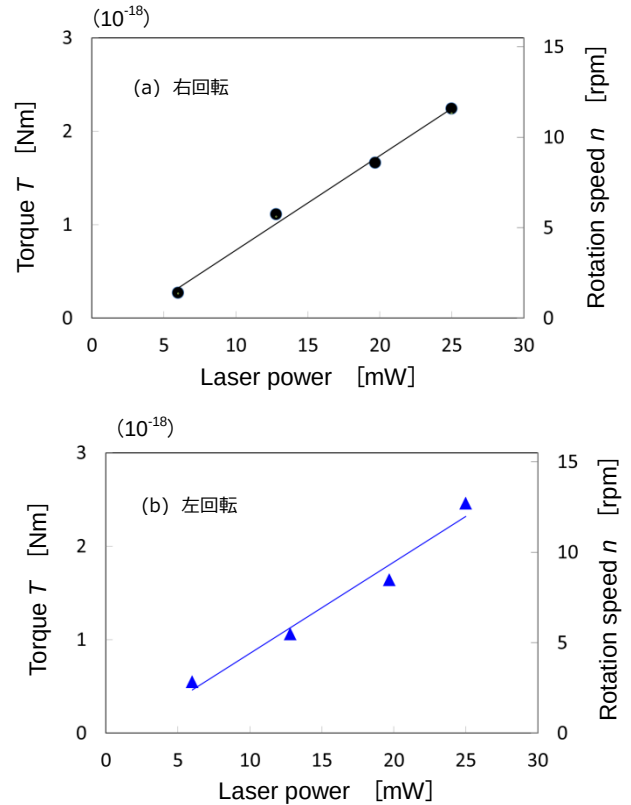


Fig.7 Relation between the torque and the laser power.

この結果から、左右いずれの円偏光の場合もトルクはレーザパワーに比例して直線的に増加し、回転方向によるトルクの違いは見られなかった。なお、本実験条件で得られたトルクは1mWあたり 10^{-19} Nmのオーダーであった。

ところで、円偏光のフォトン角運動量 $\hbar (= h/2\pi)$ を有し、出力 P のとき単位時間あたりに通過するフォトンの個数 $N = P/h\nu$ であるから、円偏光レーザの角運動量 L は次式で与えられる。

$$L = \hbar N = \frac{P}{2\pi\nu} = \frac{\lambda P}{2\pi c} \quad (2)$$

ここで、 c は光速である。この角運動量による粒子の回転トルク Γ は次式で表される。

$$\Gamma = Q_r L = Q_r \frac{\lambda P}{2\pi c} \quad (3)$$

Q_r はレーザの角運動量が粒子の回転トルクに変換される効率である。

He-Neレーザ($\lambda = 632.8$ nm)で出力 P が20mWのときの

角運動量 L は(2)式より $9.5 \times 10^{-18} \text{Nm}$ と求められる。このとき実験で得られた回転トルク Γ は、右回りと左回り円偏光の場合 $2.2 \times 10^{-18} \text{Nm}$ および $2.4 \times 10^{-18} \text{Nm}$ であり、変換効率 Q_r は23%と25%となる。Fig.7の全測定結果の平均の変換効率 Q_r は22%であった。この結果から粒子は円偏光による全トルクの約20%を受け取ったことになる。

直線偏光による回転

直線偏光の場合は物体の形状異方性によって生ずる運動量変化を利用して粒子を回転させる。このため、球状の粒子は回転しないので、予め回転トルクを生ずるように加工した微小物体が用いられる¹²⁾。しかし、我々はこのようなマイクロ加工技術を有していないため、変形ラテックス粒子にレーザを集光して回転する粒子を確認した後、回転トルクを測定した。

Fig.8は、右回転と左回転の粒子について、レーザパワーを変化させてトルクを測定した結果である。トルクはレーザパワーとともに増加するが、左回転の方が右回転に比べて大きなトルクが生じている。この原因の1つとして、左右の回転トルクは異なる粒子で測定しているため、左回転の粒子の方がより回転しやすい形状であることが考えられる。

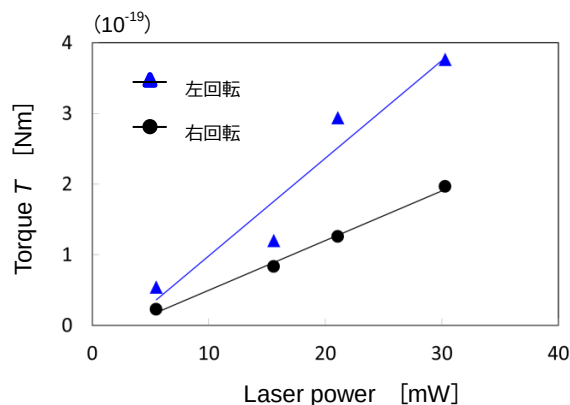


Fig.8 Relation between the torque and the laser power.

本実験中で、回転している粒子の位置をレーザの光軸方向で変化させると回転が止まり、粒子によっては逆回転する現象が観察された。これは、Fig.9に示すように試料ステージを上げていくと、回転粒子はレーザの焦点でトラップされて静止し、ステージをさらに上げるとレーザの粒子への入射角度が変わり、逆回りのトルクを生じるためと考えられる。この結果から、直線偏光のレーザで形状異方性の粒子を回転させる場合、粒子をレーザの焦点位置から上下にずらすことにより回転方向を変えられることが分かった。

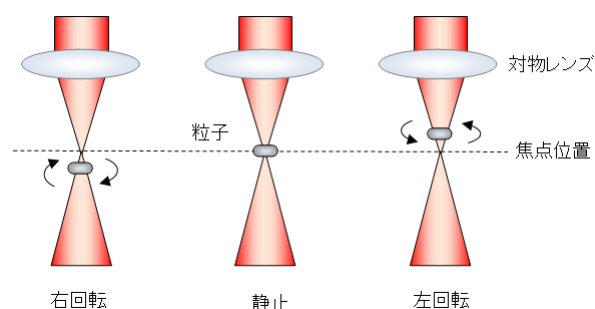


Fig.9 Controlling the direction of rotation by changing the position the particle with respect to the focal plane of the laser beam.

4. 結 言

円偏光レーザを用いて粒子の回転実験を行った。その結果、粒子は円偏光の角運動量によって回転し、回転方向は円偏光の向きによって変えられることが確認できた。このとき生成される回転トルクは約 10^{-18}Nm オーダーとなり、レーザパワーに比例して直線的に増加することがわかった。なお、形状異方性を利用した粒子の回転では、粒子をレーザ光軸に沿って移動することにより回転を制御できることも分かった。

参 考 文 献

- 1) A.Ashkin : Phy.Rev.Lett., **24**, 156 (1970).
- 2) A.Ashkin : Science, **210**, 1081 (1980).
- 3) A.Ashkin, J.M.Dziedzic, and T.Yamane : Nature, **330**, 769 (1987).
- 4) 橘彰一, 浮田宏生 : 光学, **27**, 524 (1998).
- 5) 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.
- 6) Z Ulanowski and I K Ludlow : Meas. Sci. Technol., **11**, 1778, (2000).
- 7) 高比良裕之, 山崎真司, 上村明子 : 日本機械学会論文集, **67**, 436, (2001).
- 8) P.Galajda, and P.Oroms : Appl.Phys.Lett., **78**, 249, (2001).
- 9) 田中卓夫, 葛谷幹夫 : 中部大学工学部紀要, **38**, 61, (2002).
- 10) 田中卓夫, 武居悟, 葛谷幹夫 : 中部大学工学部紀要, **39**, 65 (2003).
- 11) 武居悟, 石川直幸, 葛谷幹夫 : 中部大学工学部紀要, **41**, 59 (2005).
- 12) 日暮栄治 : レーザ研究, **24**, No.11, 1169 (1996).