

集光効率の低いレーザ光線を経路とした微小球体の浮揚駆動

香川 直己* 橋本 信亮** 高橋 悟*

Microsphere Driving on The Levitated Optical Rails Constructed by Low-Focused Laser Beams

Naoki KAGAWA*, Shinsuke HASHIMOTO**, Satoru TAKAHASHI*

ABSTRACT

Micron-sized particles have been accelerated and trapped using only the force of radiation pressure from a continuous laser. Especially, the light pressure of low focused laser beam acts on the particle both for the direction of the center in the cross section of the beam and the radiating direction. We guess that these forces apply particle to move along the beam-network and we setup a simple triangle system with three low focused laser beams from tapered hemispherical lensed optical fibers to confirm the expected result. In this report, we estimate the condition to drive the particle along the beam smoothly.

キーワード：光ファイバ，光圧，光マニピュレータ，微小球体，運動制御

Keywords: Optical Fiber, Radiation Pressure, Optical Manipulation, Micro spheres, Motion Control

1. まえがき

周囲と屈折率の異なる透明物体に光を照射すると、光の屈折により pN/mW 程度の力が働く[1]。この力は、極めて小さいが、空間のスケールが小さくなれば、その空間に存在する物体が受ける粘性抵抗や重力は必然的に小さくなる。たとえば物体のスケールが3桁小さくなれば、粘性抵抗は3桁、重力は9桁に減少する。したがって、僅かな光の圧力で微小物体を動かすことが可能となり、特に、集光特性に優れるレーザビームを光源とした場合、エネルギーの集中が容易となるため、一条のレーザ光線を高いNA (Numerical Aperture: 開口数) を持つ光学系で回折限界まで集光することで微小物体を非接触で捕捉し、三次元的に移動させることが可能となる[2]。この原理を利用した装置を光マニピュレーターといい、赤血球、ウイルス、バクテリア、リンパ球、培養細胞、染色体、ミトコンドリアなどへの適用も多く報告されるなど、生物学の分野でも応用されつつある[3, 4]。また、微小領域における力学計測や分光測定[5, 6]、マイクロマシンの組み立ておよび駆動制御[7, 8]などの研究も行なわれている。

一方で、既存の光マニピュレーションにおいて

は、高NAを得るために使用する光学系が重厚となるため、対象の操作には高度な技術が必要とされる。そのため、レンズ付あるいはレンズ形状に形成した光ファイバを放射端として光マニピュレーションを行う試みも行われている。

光ファイバを用いる利点として、

- (1) 装置構成が簡単であり、安価である。
- (2) 光捕捉・操作に対する自由度が大きい。
- (3) 光源の変更が容易である。

ことが挙げられるが、欠点としては、高いNAが得られず、十分に光を集中させることができないため、単一ビームでの三次元捕捉が困難であることである。従って、ファイバからの放射光を用いて対象を捕捉する場合は、支持物からの抗力[9]や、別の光ビームによる光圧を用いるなど[10]外部からの力の補助が必要となる。従って、対象を移動させる場合、前者では、支持物との摩擦が障害となり、後者では高NA光学系を用いた方式と同様に機械的な稼動システムが不可欠となる。尤も、光ファイバを用いる方式においても、曲率が極めて小さい先端光ファイバを用いることや[11]、複数のコアを持つバンドル状のファイバを用いることで単一ファイバでの捕捉を行う努力がなされているが、前者の場合、捕捉対象がファイバ先端に接

* 電子・電気工学科 ** 大学院工学研究科 (現日本国土開発株式会社)

触してしまう問題があり、また、後者では特殊な形状のファイバを製作する必要が生じる。

そこで我々は、通常使用される先球光ファイバのような低いNAの光学系から放射されるレーザービームを用いても微小球体を運動制御する手法を提案する。これは、低集光度のレーザービームの放射力と勾配力を効率よく利用することで微小球体のある地点から別の地点までレーザービームが形成する経路に沿って移動させるというものである。この方法であれば、固定された光学系によってレーザービーム網を形成しそのビームの出力制御をすることで対象物体を目的地点まで移動させることができるため、移動のための光学系の可動機構が不要となる。また、完全な浮揚状態を作ることができるため、支持物などからの摩擦の影響も受けないという利点がある。本稿では以上のような運動系の考察と実験結果について報告する。

2. レーザビームの光圧特性

2.1 先球テーパファイバから放射されるレーザー光の光圧特性

本研究で使用した光ファイバの先端形状は図1に示すようになっていて、クラッド直径125 μm 、コア直径10 $[\mu\text{m}]$ の光ファイバ端部を開き角度30度のテーパ状にし、更に先端部を曲率半径3 $[\mu\text{m}]$ に研磨することで先球テーパを形成している。この形状のレンズ効果により放射光の広がりを抑圧しているが、物理的形状の制約と水中での使用であることから、理論的なNA値は0.148に留

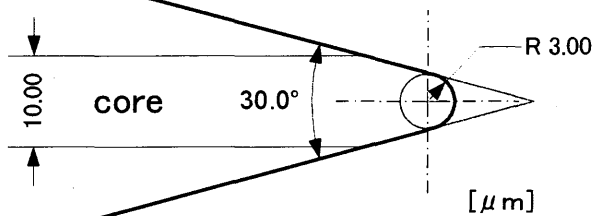


図1 先球光ファイバの先端形状

Fig.1 Schematic diagram of a tapered hemispherical lensed optical fiber.

まる。これは液浸対物レンズを用いる場合の十分の一程度しかなく、十分な集光は不可能である。このように緩やかに集光されたレーザービームが水中(屈折率1.33)に置かれたポリスチレン(屈折率1.59)製の微小球体に与える光圧分布を計算すると図2に示すようになる。図において作用する力の強さを色分布でまた、力の作用方向を矢印で示している。この図より、微小球体にはビーム断面内に保持する力とビーム放射方向に向かう力が働くことが判る。これらをそれぞれ、勾配力、散乱力と呼ぶ。これより、ファイバからの一条の光だけでは微小物体を光軸方向に保持することはできないが、強く光軸内に留める力が働くことから、ビームの伝播方向に沿って微小物体を移動させることに適するといえる。さらに複数のレーザービームを用いて、これら二つの力の関係を効率よく利用することにより、微小物体の停留も可能となる。

2.2 複数のレーザービームによる停留特性

そこで、二本のレーザービームを用いた微小球体の停留特性を調べた。

実験は図1に示した先球光ファイバを2本用いて行った。光源は波長1.48 $[\mu\text{m}]$ のピッグテールつき半導体レーザーであり、これをCW駆動し、SCコネクタにより先端の曲率半径が3 $[\mu\text{m}]$ の先球光ファイバに結合した。

各先球光ファイバは各々別の油圧式マニピュレータに取り付けられており、数百ナノメートルオーダーで3軸方向にファイバの位置を移動させることが可能である。

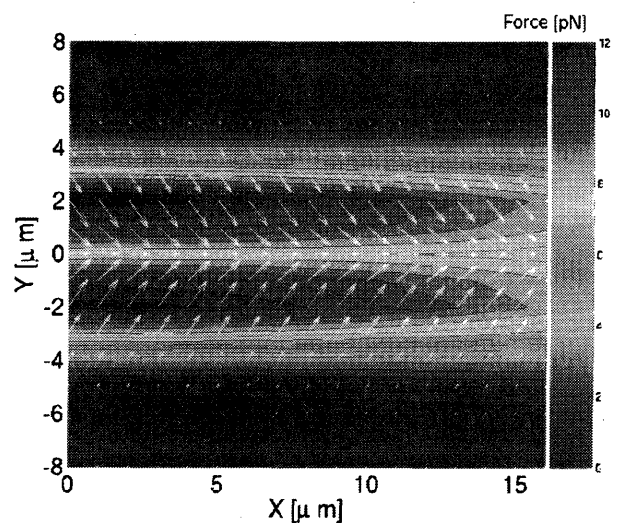


図2 ファイバ先端部の光圧特性の計算結果

Fig.2 Calculated radiation pressure from the hemispherical tapered optical fiber.

二本の先球光ファイバの先端は顕微鏡下に置かれたシャーレの底面から数 μm 上方の水平面内に配置した。実験に使用した微小球体は屈折率1.59直径5 $[\mu\text{m}]$ のポリエスチレン球であり、シャーレ内に満たした媒質(水道水:屈折率1.33)内に分散させた。

2.2.1 レーザビームの交差角度の寄与

まず、二本のレーザビームの交差角度と微小球体に働く力の関係を調べた。

図3に示すように、二本のレーザビームを対向させた場合、微小球体に対してビーム断面の中心に向かって働く力とビーム放射方向に働く力が釣り合い、微小球体は捕捉状態となり静止する。この状態を起点とし、レーザビームの交差角度を180度から10度ずつ狭めてゆき、捕捉限界の交差角度を調べた。

その結果、レーザビームの60度までの交差角度において微小球体が捕捉可能であることが確認できた。このことから、レーザビームの交差角度が広がることで微小球体に働く捕捉力は強まっていくといえる。

2.2.2 レーザビームの交差位置の寄与

次に交差位置とファイバ端面との距離の依存性の有無を調べた。

図4に示すように、2本の先球光ファイバの配置角度を90度に固定し、そこに微小球を捕捉させた。この状態において一方の光ファイバ(Fiber2)を他方(Fiber1)の光軸に平行に移動させる。この状態において微小球に双方の光ファイバからレーザビームの光圧が十分に働いている範囲内では移動させる光ファイバ(Fiber2)の移動に合わ

せて、Fiber1からの光軸に沿って微小球は移動する。Fiber1からの放射光の放射方向に働く力による微小球の捕捉力のため光圧の均衡が崩れた地点からビーム放射方向に働く力の影響力を調べた。実験の結果、二本のレーザパワを等しく14.26[mW]とした場合、Fiber1の先端から微小球体までの距離が13.2 $[\mu\text{m}]$ の位置まで微小球を捕捉することができた。次に、双方のレーザパワを3.8[mW]とした場合においても、同じ位置で捕捉不可能となった。

これらの結果から、微小球体に対してビーム放射方向に働く力はファイバの先端からの距離に依存しないことがわかった。即ち、レーザパワを変えても微小球が捕捉できる距離に差異が無いことから、直径3 $[\mu\text{m}]$ の先球光ファイバを用いた場合、先端からの距離が13.2 $[\mu\text{m}]$ までは微小球体とレーザビームの光圧特性[1]が成り立ち、2本のファイバの先端から微小球体までの距離がこの範囲内であれば微小球体を安定に運動制御できるといえる。

次に、双方のレーザパワに差異を設けることにより、ビーム放射方向に働く放射力とビーム断面内に保持する力である勾配力の比率を調べた。

双方のレーザパワを等しく14.26[mW]とした上で、相互の配置角度を90度とした。この状態で微小球体を捕捉し、一方のレーザパワを次第に低下させていくことで微小球体が捕捉できなくなる相互のレーザパワの差を求めた。

実験の結果、レーザパワを7.23[mW]まで低下させた時、微小球体の捕捉が不可能となった。このことから、ビームの放射力に対してビーム断面内

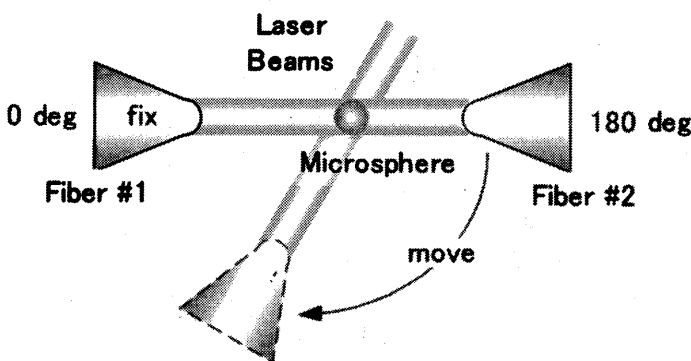


図3 ビーム交差角度による微小物体の停留特性の測定状況の上面図。

Fig.3 Top view of measurement situation of stopping characteristic of a microsphere by beam intersection angle.

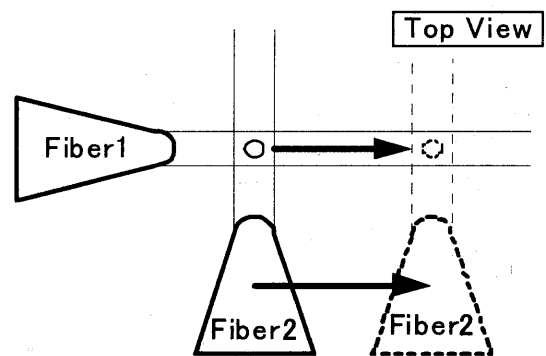


図4 ビーム交差位置による微小物体の停留特性の測定状況の上面図。

Fig.4 Top view of measurement situation of stopping characteristic of a microsphere by beam intersection position.

に働く勾配力は約2倍の強さがあるといえる。即ち、二本のレーザーパワーに若干の相違が生じて、十分な捕捉力があるといえる。

2.3 微小球体の運動特性

2.3.1 浮揚状態における運動効率

次に、微小物体を浮揚状態で運動させることの優位性を確かめるために、対向するレーザー光により、浮遊捕捉された状態での微小球の移動効率と、斜め上方からの放射光により支持台に押し付け捕捉された微小球の移動効率を比較した。前者は散乱力だけの作用であり、後者は放射力と勾配力の合力による作用となり微小物体にかかる力は大きくなるが、支持台からの摩擦を受けることになる。浮揚状態における運動特性の評価においては、図5に示すように透明微小球体を二本の対向する先球ファイバから放射される8[mW]のレーザー光で浮揚状態となるように捕捉し、その後、一方のファイバからの放射光を4[mW]に減少させ、微小球体の変位を測定した。一方、支持台に押し付けた微小球体の移動特性については、図6に示すようにレーザーを微小球体の斜め上方約30度の位置から照射するように配置し、4[mW]のレーザーを放射しその変位を測定した。

変位の測定結果及び、それらのフィッティング関数から算出した速度、加速度の時間変化及び位置変化の計算結果を図7に示す。これらの結果より、速度、加速度共に浮揚状態における移動の方が、押し付け状態の場合に比べて大きく、また、移動距離も長いことがわかる。このことより、微小物体の移動を目的とした場合、浮揚状態で行うことが有利であることが確認できた。

2.3.2 ビームに沿った往復運動制御

対向するレーザービームにより捕捉された微小球

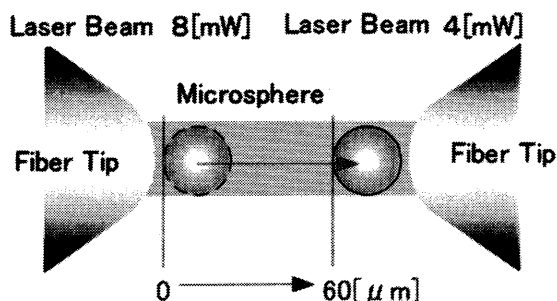


図5 浮遊状態における微小物体の運動特性の測定状況。
Fig.5 Measurement situation of movement characteristic of a microsphere in suspended condition.

体が交互に切り替えられたレーザービームによって補足を維持したまま運動できるを調べた。

図8は0.4[s]の周期にてレーザーパワーで切り替えた場合の微小球体の変位を測定した結果である。左右の放射を交互に切り替え、出力時の各々のレーザーパワーは14.26[mW]であり、変移の中心はファイバ間の中心である。最終的に片方のファイバに微小球体が接触してしましたが、安定した往復運動が認められる。特に、レーザービームの切り替わりの過渡時間においても、微小球体をビーム断面内に捕らえ、レーザービームに沿って移動させることが可能であることが確認できた。

以上のことから、レーザーを瞬間的に切り換えても微小球体に対してビーム断面内に保持する力とビーム放射方向に働く力が加わるといえ、レーザービームを切り換えることで、レーザービームに沿って微小球体を連続的に運動させることができると判断した。

3. 微小球体の連続的な巡回運動実験

前章で述べたレーザービームの微小球体に対する光圧特性から、ビームの交差角度を60度以上、ファイバの先端から微小球体の距離を13.2[μm]以内とし、レーザービームを切り換えることで、複数のレーザー網に沿って微小球体を安定に運動制御させることが可能になると予測される。そこで、これを実験により検証した。

3.1 微小球体を巡回させるための光学系

巡回運動の経路として、図9に示すように独立の光源をもつ三本の先球光ファイバからの放射光により正三角形を構成した。これらのファイバから放射されるレーザービームは120度で交差することから、2.2節で示した条件を満たすことになる。ま

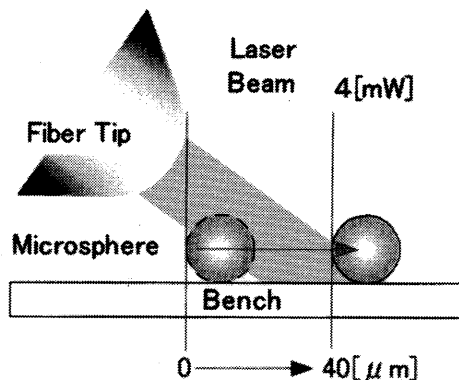


図6 押し付けにおける微小物体の運動特性の測定状況。
Fig.6 Measurement situation of movement characteristic of a microsphere in pressed condition.

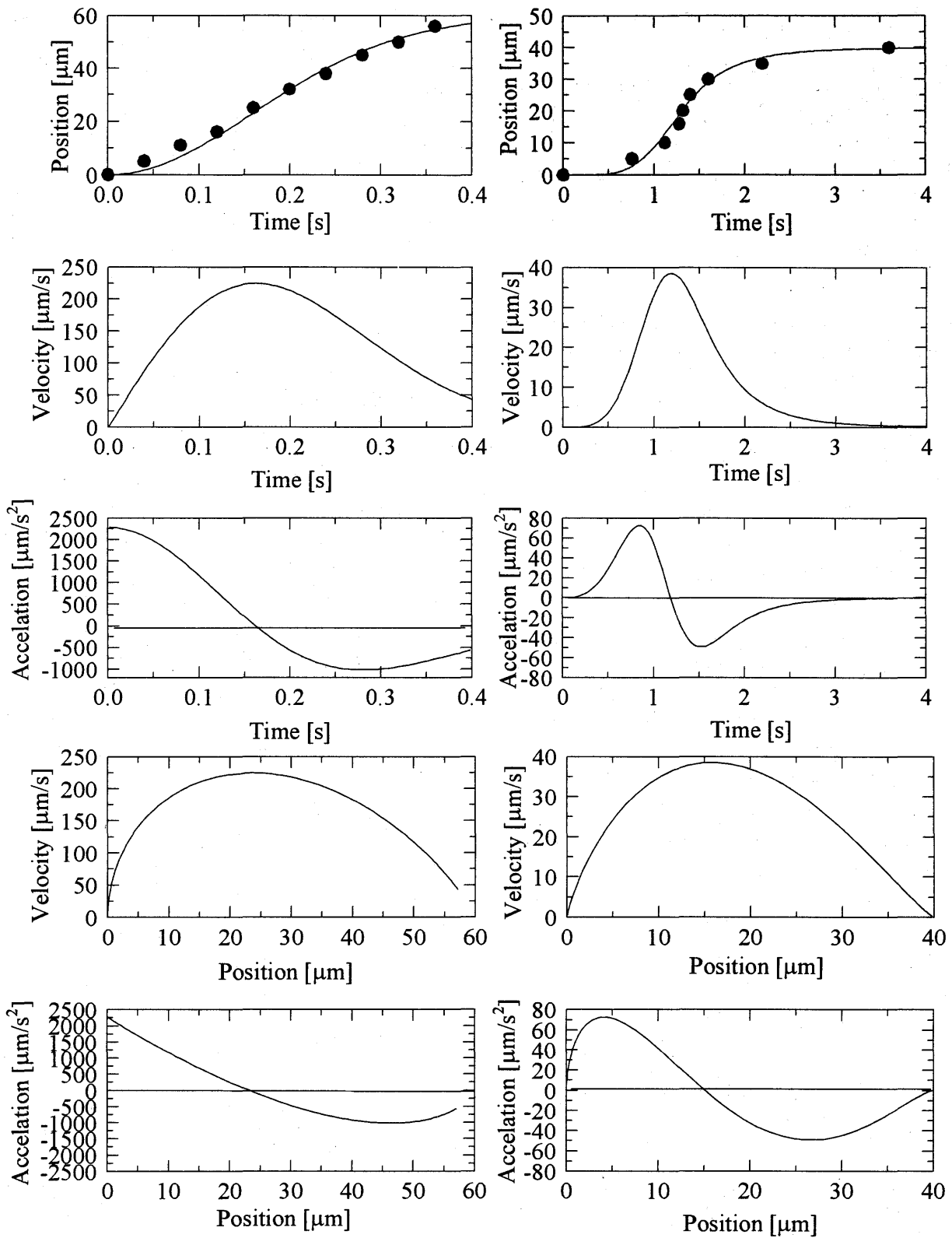


図7 浮遊状態(左列)と押し付け状態(右列)における微小球体の運動特性の測定結果及び計算結果.
 Fig.7 Measurement result and calculation results of the movement characteristics of a microsphere in the suspended condition (left) and in the pressed condition (right).

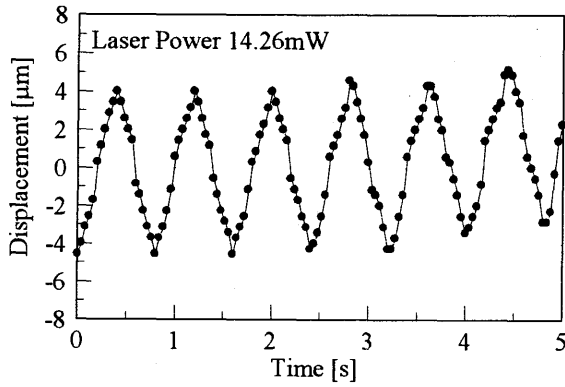


図8 往復運動する微小球体の変位の測定結果
Fig.8 Measurement result of displacement of a reciprocating microsphere.

た、移動経路の一边の長さは9.5[μm]とした。各レーザ素子に供給する電流はコンピュータで調整し、点滅の周期とレーザパワを制御する。その他の条件は2.1節のものと同様である。

3.2 微小球体の正三角形軌道上の巡回

レーザ照射の切り替えは、微小球体が入ると同時に行うのが理想的であるが、微小球体の移動速度がレーザパワに依存するために、移動し始める時刻とレーザビームの切り換え時刻を厳密に同期させることは容易でない。また、2.3.2節の検証結果より運動の安定性の観点からも妥当ではないといえる。そこで、図10に示すように、各レーザの点滅をデューティ比50%の任意の周期で設定し、3つのレーザ相互の切り替えを1/3周期移相させ、2つのレーザが同時に点灯する時間帯と1つだけが点灯する時間帯が

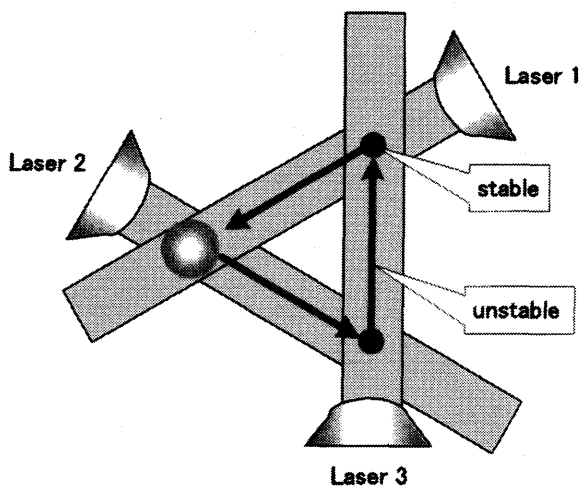


図9 レーザビームで構成した三角形経路の概略
Fig.9 Outline of triangular route that composes of laser beams.

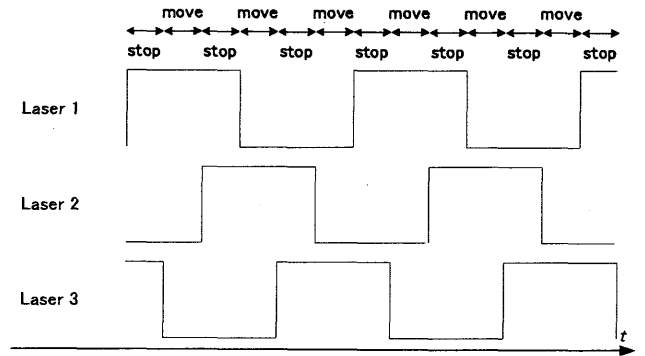


図10 三角形経路を巡回させるためのレーザ制御のタイミングチャート

Fig.10 Timing chart of laser control to make it go round triangular route.

交互になるように設定した。これにより、微小球体にレーザビームの放射方向に働く力だけが作用する期間とこの力とビーム断面内に働く力との合力が作用する期間を設けることとなる。合力が作用する期間の初期においては二つの力の合力は微小球体の移動を担うが最終的には2.2.1節、2.2.2節で述べたように微小球体を補足することになり、運動系の安定度が向上することが期待できる。

一方で捕捉時間は巡回運動の連続性や円滑さに寄与し、かつレーザパワとの相関関係も無視できない。そこで、3本のレーザパワを一律に14.26[mW]とした場合と、同じく8.57[mW]とした場合について各レーザの点滅周期を先に述べた移相関係を維持しつつ徐々に短縮させ、それぞれのレーザパワに対して円滑に巡回運動を行うための切り替え条件を調べた。

レーザパワ14.26[mW]の条件における最適な微小球体の巡回運動の様子を図11に示す。このときの巡回運動は1分間以上継続した。一方、レーザの切り替えタイミングが不適切である場合は、最長でも30[s]程度しか巡回させることができなかった。

微小球体が正三角形上の経路を継続的に円滑に巡回した場合、一边を移動するのに要した時間は、レーザパワ14.26[mW]の条件では0.125[s]、8.57[mW]においては0.2[s]であった。

これら二つの条件下の結果より、レーザパワ P [mW]と一边を移動するのに掛かる時間 T [s]の関係を定式化すると

$$T = \frac{1.7}{P} \dots \dots \dots (1)$$

となる。図12にこの関係を示す。ただし、3.82[mW]

より低いレーザパワでは微小球体への捕捉力が弱く安定に巡回運動させることができなかつた。

式(1)の妥当性を検証するために、レーザパワを11.45, 6.63, 3.82[mW]とした各々の場合について、一辺の移動時間を測定した結果、(1)式あるいは図6から予測される速さと一致した。このことから、(1)式の妥当性が確認できた。

4. むすび

本稿では微小球体をレーザビームに沿って連続的に駆動させる条件について実験的に考察した。先球光ファイバから放射されるレーザビームの微小球体に対する光圧特性から、ビーム交差角度を60度以上、ファイバの先端から捕捉位置までの距離を13.2[μm]以内とする条件下で、レーザビームの切り換え操作により複数の光軸に沿って微小球体を移動させることが可能であるという結果を得た。

最適なレーザの切り替えタイミングである場合、運動系が大きな外乱の影響を受けない限り円滑な巡回運動を維持させることができた。このことから安定した微小球体の巡回条件としては、微小球体の動きを完全に停止させない程度に微小球体を瞬時に捕捉するタイミングで交差する二本のレー

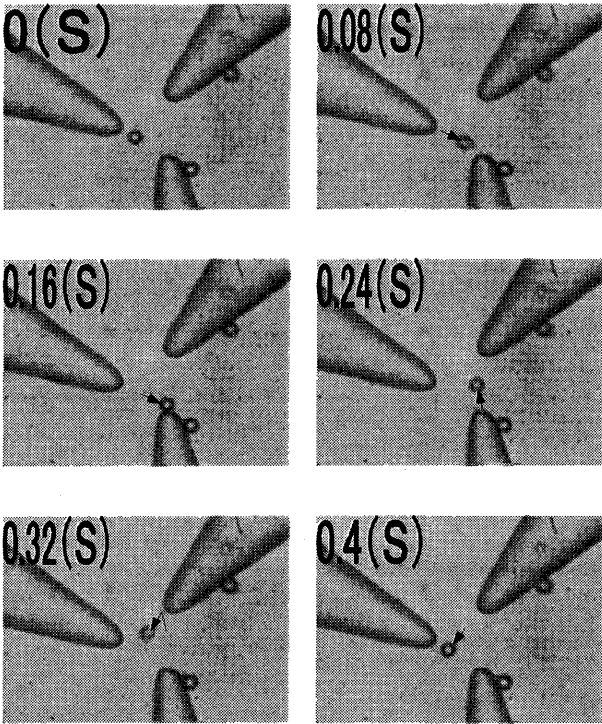


図11 三角形経路を巡回する微小球体の観測結果
Fig.11 Observation result of a microsphere in moving on the triangular route.

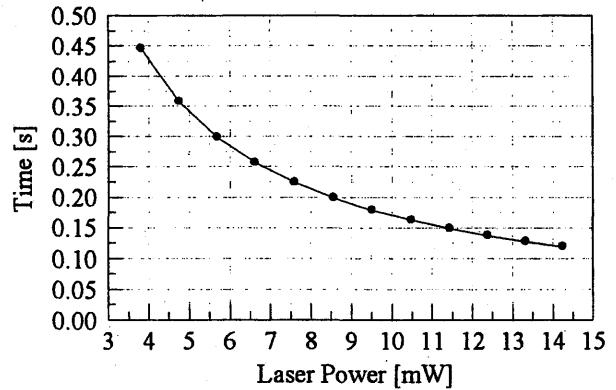


図12 安定巡回をするために要する一辺の移動時間とレーザパワの関係
Fig.12 Relation between the travel time for one side and laser power for stable rounding.

ザビームを切り換えることで安定な巡回運動が可能となるといえる。

今後は、安定した微小球体の巡回条件として、レーザの切り換えるタイミングと微小球体の大きさ、巡回距離の関係を明らかにする。

文 献

- [1] A. Ashkin, "Acceleration and trapping of particles by radiation pressure," *Phys. Rev. Lett.*, **24**, pp.156-159(1970)
- [2] A. Ashkin, J.M. Dziejic, J.E. Bjorkholm and S. Chu, "Observation of a single beam gradient force optical trap for dielectric particles," *Opt. Lett.*, **11**, pp.288-290(1986)
- [3] A. Ashkin, J.M. Dziejic, T. Yamene, "Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams," *Nature*, **330**, pp.769-771(1987).
- [4] A. Ashkin, J.M. Dziejic, "Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria," *Science*, **235**, pp.1517-1520(1987)
- [5] S.M. Block, D.F. Blair and H.C. Berg, "Compliance of bacterial flagella measured with optical tweezers," *Nature*, **338**, pp.514-518(1989)
- [6] J.T. Finan, R.M. Simmons and J.A. Spudich, "Single myosin molecule mechanics : pico-newton forces and nanometre steps," *Nature*, **368**, pp.113-118(1994)
- [7] E. Higurashi, H. Ukita, H. Tanaka, and O. Ohguchi, "Optically induced rotation of micro-objects fabricated by surface micromachining," *Appl. Phys. Lett.*, **64**, pp.2209-2210(1994)
- [8] H. Ukita, K. Nagatomi, "Theoretical demonstration of a newly designed micro-rotator driven by optical pressure on a light incident surface," *Opt. Rev.*, **4**, pp.447-449(1997)
- [9] K. Taguchi, H. Ueno, T. Hiramatus and M. Ikeda, "Optical trapping of dielectric particle and biological cell using optical fiber," *Electron. Lett.*, **33**, pp.413-414(1997)
- [10] K. Taguchi, K. Atsuta, T. Nakata and M. Ikeda, "Levitation of a microscopic object using plural optical fibers," *Opt. Commun.*, **176**, pp.43-47(2000)
- [11] Z. Liu, C. Guo, J. Yang and L. Yuan, "Tapered fiber optical tweezers for microscopic particle trapping: fabrication and application," *Optics Express*, **14**, pp.12510-12516(2006)
- [12] C. Liberale, P. Minzioni, F. Bragheri, F.D. Angelis, E.D. Fabrizio and I. Cristiani, "Miniaturized all-fibre probe for three-dimensional optical trapping and manipulation," *Nature Photonics*, **1**, pp.723-727(2007)