

研究

輪帯偏光ビームによる光軸方向のレーザー・トラップ力増強

杉浦 忠男*・河田 聰

大阪大学工学部応用物理学科 〒565 吹田市山田丘 2-1

(1994年6月25日受付, 1995年4月24日受理)

Enhancement of Axial Trapping Force through the Use of a Polarized Annular Beam

Tadao SUGIURA* and Satoshi KAWATA

Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Osaka University,
2-1, Yamadaoka, Suita 565

(Received June 25, 1994; Accepted April 24, 1995)

We show two possible methods for enhancing the axial force in a single beam laser trap. Improvement is obtained either through the use of an annular beam with uniform intensity distribution, or through the use of a beam that is radially polarized in the transverse plane. Both methods allow the optical trapping of microparticles in three dimensions—a task that is impossible to achieve using conventional techniques. Particle trapping either in air or vacuum can also be done using the two methods. Using geometrical optics to analyze the force characteristics, we found that the annular beam method is effective when the relative index of the particle to the surrounding medium is less than 1.13. On the other hand, the use of the radially-polarized beam becomes effective for relative indexes greater than 1.7.

1. はじめに

まわりの媒質と屈折率の異なる微粒子に光を照射すると光は散乱され、粒子には光の放射圧が発生する。顕微鏡対物レンズなどで集光したレーザー光を微粒子に照射すると光の放射圧によって粒子をレーザー光のスポット付近に捕まえることができる。この現象は1986年にAT & T Bell研のAshkinによって見いだされたもので、レーザートラッピングと呼ばれている¹⁾。この現象を用いると顕微鏡下の粒子を非接触に捕まえて3次元操作できることから、サブミクロンから数十μm程度の大きさをもつ誘電体粒子を操作する手法として注目されている。特に生物学や化学の分野では細胞操作や細胞融合²⁻⁵⁾、微粒子の位置制御・配列⁶⁾などの応用研究が活発に行われており、光ビンセットとも呼ばれている。

レーザートラッピングでは通常1本のレーザービームで粒子の捕捉を行っており、そのため粒子を光軸方向に移動させるときと光軸に垂直な方向に移動させるときとでは粒子に発生するトラップ力の大きさが異なる。一般に光軸方向に粒子を移動させるほうがトラップ力は小さくなり、特に粒子を光源側に引き上げる方向のトラップ力が弱い。これは光の進行方向とは逆向きに力を働かせなければならないためである。特に、レーザー光を上方から入射して粒子をトラップする場合、粒子を重力に逆らって吊り上げる必要がある。このような場合、粒子のトラッピングが可能かどうかは粒子を光源側に引き上げる力の大きさによって決まる。

光源側に引き上げる力を増強できれば、通常のレーザートラッピングよりも小さなレーザーパワーで粒子をトラップすることが可能となるので、トラップの効率がよく、また粒子に対するダメージも少なくできるようになる。また、これまでのトラッピングの実験例では比較的

* Present address: Max-Planck-Institute fuer Polymerforschung, Ackermannweg 10, D-55021, Mainz, Germany

大きな開口数 (NA) の対物レンズ (NA ~1.2, 油浸あるいは水浸) で光を集光する必要があったが、小さい NA の対物レンズで集光した光でトラッピングが実現できれば微小物体の遠隔操作ができるなど、これまでの粒子操作の可能性を拡げることが期待できる。さらに、比屈折率の高い粒子のトラッピングが実現できれば空気中や真空中で重い粒子をトラップして操作することも可能になる。

本論文では、光源側に引き上げるトラップ力を増強する手法を提案し、光線追跡法を用いた解析によって有効性を示す。

2. レーザートラッピングの原理

屈折率 n_1 の媒質中を伝播する強度 I のレーザー光は、単位時間当り $\langle p \rangle = n_1 I / c$ で定義される運動量をもっている⁷⁾。ここで c は真空中の光速である。この光が屈折率の異なる媒質 (屈折率 n_2) に入射すると、境界面で反射と屈折が生じて光の進行方向が変化し、運動量が変化する。このとき境界面に放射圧が発生する。光の入射角を ϕ 、屈折角を ϕ' 、Fresnel の反射率を R とすると境界面に生じる力は運動量保存則より、

$$f = \frac{1}{c} \{n_2(1-R)\cos\phi' - n_1(1+R)\cos\phi\} \quad (1)$$

で与えられる。粒子に光が入射すると境界面で反射と屈折を繰り返して散乱されるが、粒子全体に発生する力は各光線が境界面で反射・屈折するときに発生する力を足し合わせたものとなる。

レーザートラッピングでは、レーザー光を対物レンズなどを用いて強く集光して粒子に照射することによって力を発生させる。光を集め粒子に照射すると、Fig. 1 に示す光線 a のように光軸に対して角度 θ をなして入

射する光が存在する。この光軸と角度をもって粒子に入射する光がレーザートラッピングに重要なはたらきをする。

粒子の屈折率がまわりの媒質の屈折率より高く、粒子がレーザー光のスポットより下側にあったとすると、光線 a によって発生する力は図中 f_a のようになる。 f_a は粒子を光源側に引き上げるような力の成分 f_z と、粒子を光軸の方へ引き込む成分 f_x をもっている。これらの力によって、粒子は光源側に引き上げられると同時に光軸の方へ引き込まれる。粒子全体に発生する力は粒子に照射されるすべての光線で発生する力を足し合わせたものとなり、この合成力でもって粒子はスポット付近に引き込まれる。

逆に粒子がレーザー光のスポットより上側にあったとすると、粒子にはレーザー光の進行方向へ押し下げる力が発生する。また、粒子表面で反射した光によって発生する力はほとんどが粒子を押し下げるようにはたらく。このため、まわりの媒質との比屈折率が高い粒子は表面での反射率が高くなるので、粒子を押し下げる力の方が大きくなり、粒子のトラッピングは一般に困難であるといわれている。トラッピングされた粒子は必ず光軸上でビーム集光点の下方にトラップされることになる (図中破線)。

3. トラップ力増強の原理と実現方法

粒子を光源側に引き上げる力を増強する手法として、1) リング状の強度分布をもつビーム (輪帯ビーム) を用いた手法と、2) ビームの半径方向に偏光したビーム (ラジアル偏光ビーム) を用いた手法を提案する。

3.1 輪帯ビームによるトラップ力増強法

Fig. 1において、光軸となす角 θ が大きいほど粒子を光源側に引き上げる力が大きくなり、ある角度 θ 以下では粒子を押し下げる力に転ずる。そこで、 θ が小さい入射光成分を少なくすることができれば、光の強度が同じでも光源側に粒子を引き上げる効率が高くなるはずである。そこで Fig. 2 に示すような光学系を考案した。レーザー光は集光レンズの前側でリング状の強度分布をもち、これを対物レンズによって集光して粒子に照射する。このような輪帯ビームは $\theta > \theta_a$ なる入射光成分のみを有する。

しかしながら、Fig. 2 のように輪帯瞳をレーザービーム経路に設けると大部分のビームをカットすることになり、レーザーパワーの利用効率が悪くなる。レーザーパワーをロスすることなく入射ビームを輪帯ビームに変換

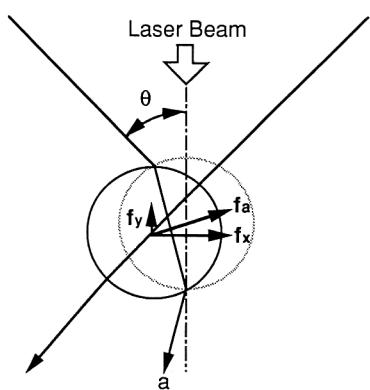


Fig. 1 Illustration of particle trapping by a laser beam.

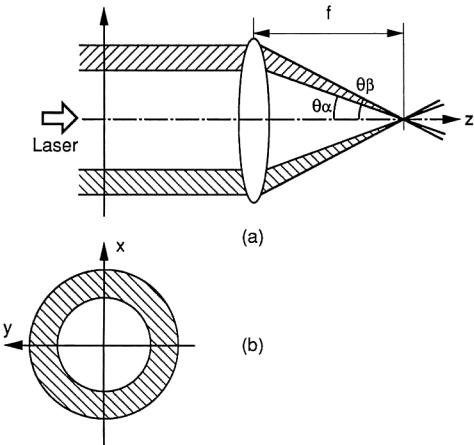


Fig. 2 Schematic diagram of the annular beam.
(a) beam distribution along the optical z -axis,
(b) beam cross section on the transverse x - y plane.

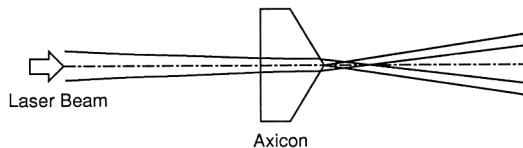


Fig. 3 Generation of the annular beam by an axicon.

するためには、円錐プリズムであるアキシコンを用いればよい^{8,9)}。Fig. 3にその光学系を示す。レーザー光はアキシコンに入射すると輪帶状の強度分布をもつ発散光に変換されて射出される。この光をリレーレンズ系などを用いて顕微鏡光学系に入射することによってFig. 2と等価な輪帶ビームを生成することができ、しかも入射レーザー光を100%利用することができる。

3.2 ラジアル偏光ビームによるトラップ力増強法

粒子表面で反射する光で生じる力は、光の進行方向に粒子を押すように働く。そこで表面で反射する光の成分を少なくできれば、光源側に粒子を引き上げる効率が高くなるはずである。境界面での光の反射率は光の偏光状態によって異なり、境界面に対してP偏光状態で入射する光の方がS偏光の光よりも反射率は小さい¹⁰⁾。この性質を利用して粒子の境界面に対してP偏光状態で入射するような光で粒子をトラッピングすれば、光源側へ引き上げる力を増すことができるはずである。

このような光を実現するものとして、Fig. 4に示すようなビームの半径方向に偏光したビームを考案した。こ

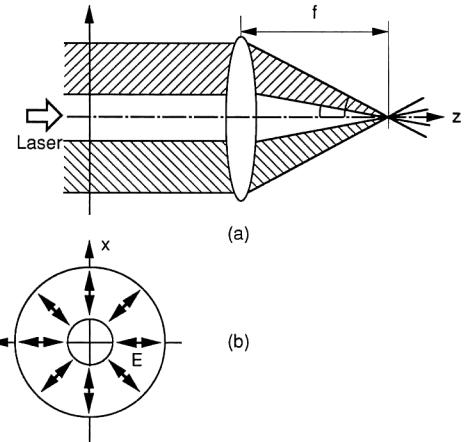


Fig. 4 Schematic diagram of radially polarized beam.
(a) beam distribution along the optical z -axis,
(b) beam cross section on the transverse x - y plane.

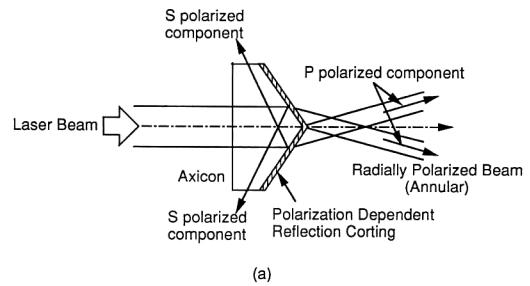


Fig. 5 Details regarding the production of a radially-polarized beam using axicon devices.
(a) generation of a radially polarized annular beam,
(b) generation of a radially polarized circular beam.

のようなビームをラジアル偏光ビームと呼ぶことにする。このようなビームを集光して粒子に照射すれば、粒子の表面に対してP偏光状態で入射させることができると。

また、ラジアル偏光ビームは輪帶状にして用いることができる。すると反射率を低減させる効果と同時に輪帶ビームによるメリットを使うことができ、いずれか単独

で用いるよりもトラップ力を高めることができると考えられる。本論文では、輪帯状のラジアル偏光ビームの場合を主に議論することにする。

Fig. 5 にラジアル偏光ビームを得るために考案したデバイスを示す。図(a)では、アキシコンの円錐面をプリュスター角にするか多層膜をコートすることによって出力光をラジアル偏光状態にし、同時に円錐面で屈折させることによって入射光を輪帯ビームに変換する。一方、図(b)に示すように、アキシコンと、それと相補的な形状をもつプリズムとを重ねることによって、輪帯状にせずにラジアル偏光状態を得ることもできる。

いずれの場合も入射光には円偏光を用い、時間積分することによって Fig. 4 のような偏光状態を実現する。

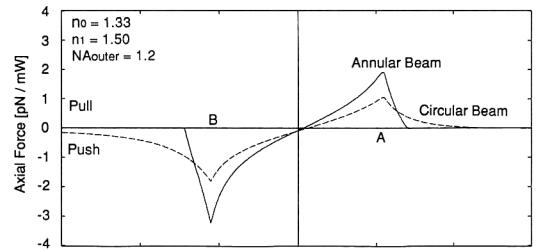
4. 光線追跡法を用いた解析による トラップ力の評価

粒子に発生する放射圧は、Mie 散乱の角度分布¹¹⁾、あるいはその表面場^{12,13)}から解析的に求められる。しかし、粒子の大きさが波長に比べて十分に大きいときは、より簡単に光線追跡法からもトラップ力を求めることが可能である¹⁴⁻¹⁶⁾。ここでは、提案した輪帯・ラジアル偏光ビームによる粒子のトラップ力を光線追跡法を用いて求めた。

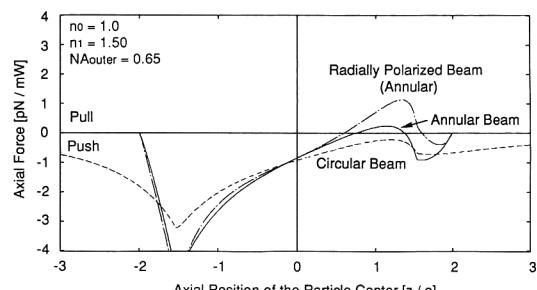
光線追跡法によるトラップ力解析では、粒子に入射するレーザー光を光線の集合とみなしてそれらを追跡し、境界面での反射や屈折で生じた力を合計して粒子に発生する力を求める。このとき、粒子は球形で、粒径はレーザー光の波長と比べて十分大きいと仮定する。粒子による散乱で生じる回折波による影響や散乱波どうしの干渉による影響は無視できると仮定する。

粒子に入射するレーザー光は従来の手法^{15,16)}ではガウシアンビームを仮定しているが、本論文では、瞳面において一様な強度分布をもつ光を仮定した。これは、実際のレーザートラッピングではガウシアンビームを顕微鏡の瞳の拡がり以上に拡げて顕微鏡光学系に入射しているので、集光スポットがガウシアンになっていないことが多いためである。ここで、レーザー光は収差なしで一点に集束とした。また、瞳上の強度分布や偏光状態を変えることで、輪帯ビームやラジアル偏光ビームの状態を表した。

これらの仮定を行うと、粒子に発生する力の大きさは粒子の大きさに依存せず、レーザー光の集光角と粒子とまわりの媒質の屈折率で決定される。以下の解析では水中および空気中にある粒子をトラップする場合について



(a)



(b)

Fig. 6 Profiles of the trapping force exerted by an annular beam and a circular beam respectively, as a function of the particle position on the optical axis. (a) particle trapping in water ($n_0=1.33$) with NA=1.2, (b) particle trapping in air ($n_0=1.0$) with NA=0.65.

考え、それぞれの結果を示す。

4.1 輪帯偏光ビームにおけるトラップ力の解析

Fig. 6 に、通常のトラッピングで用いられる円形開口からのビーム（円形開口ビーム）と輪帯ビームによる軸方向のトラップ力を計算した結果を示す。縦軸はレーザー光強度 1 mW 当りに粒子に発生するトラップ力を表し、その正の値は粒子を光源側に引き上げる力 (pull)，負の値は粒子を押し下げる力 (push) が生じることを示す。横軸はレーザー光の集光点を原点としたときの光軸上での粒子の位置を示し、正の値は粒子がスポットより下側に存在することを示している。その値は粒子の半径で規格化している。

Fig. 6(a)は、水中 ($n_0=1.33$) のガラス粒子 ($n_1=1.50$) を NA=1.20 の対物レンズで集光したレーザー光でトラップする場合の結果である。実線は輪帯ビーム（輪帯の外径と内径の NA 比 = 0.77）のトラップ力を示し、破線は円形開口ビームのトラップ力を表す。

粒子が集光点より下側 (+側) にあるときは粒子を光源側に引き上げる力 (引力) が発生し、いずれの場合

も、粒子がちょうどその半径分だけ集光点より下側(A)にあるとき($z/a=1$)に引力は最大($f=1.0 \text{ pN}$)となっている。一方、粒子が集光点より上方にあると粒子には押し下げる力(push)が発生する。粒子がちょうどその半径分だけ集光点より上側(B)にあるときにその力は最大となる。実際には、粒子はレーザー光によって光軸方向に働く力と粒子に働く重力が釣り合う位置でトラップされる。

図(a)において、輪帶ビームの引力の最大値は 2.0 pN ($z/a=1$)であり、円形開口ビームの2倍になっていることがわかる。

(b)に示す計算結果は、(a)の場合と同じ屈折率の粒子を空気中($n_0=1.0$)において、NAが1.2ではなく0.65の場合の結果である。図中破線で示す円形開口ビームによるトラップ力は常に負の値をとっており、このような空気中という条件ではいかにしても円形開口ビームでは引き上げることはできないことになる。一方、実線に示す輪帶ビームの結果では、 $z/a=0.7 \sim 1.4$ 程度で正値をとっており、わずかながら粒子を引き上げる力(最大 $f=0.25 \text{ pN}$, $z/a=1.2$)を有していることを示している。

Fig. 6(b)の一点鎖線は輪帶状(NA比=0.77)でかつラジアル偏光のビームによるトラップ力の計算結果である。先の結果と比較すると、ラジアル偏光ビームは最大 1.1 pN ($z/a=1.3$)の引力が発生しており、偏光を利用しない場合(輪帶ビーム)の4.4倍に力が増強されている。

4.2 各パラメータに対するトラップ力の依存性

レーザー光の集光角(集光レンズのNA)や粒子の屈折率が変わるとトラップ力は変化する。また、トラップ力は輪帶の幅に対しても依存すると考えられる。そこで各パラメータに対するトラップ力の依存性を調べた。その評価には粒子を光源側に引き上げる力(引力)の最大値を用いた。

4.2.1 集光レンズのNAに対する依存性

レーザー光の集光に用いる対物レンズのNAに対するトラップ力の依存性を調べた。結果の一例をFig. 7(a)に示す。横軸に対物レンズのNA、縦軸には引力の最大値を示している。粒子の屈折率は1.5、媒質は水($n_1=1.33$)を想定した。対物レンズのNAが大きくなると、円形開口、輪帶、輪帶状のラジアル偏光いずれのビームにおいてもトラップ力は単調に増加している。またその大きさは、いかなるNAの値に対しても、円形開口ビーム、輪帶ビーム、輪帶状のラジアル偏光ビーム

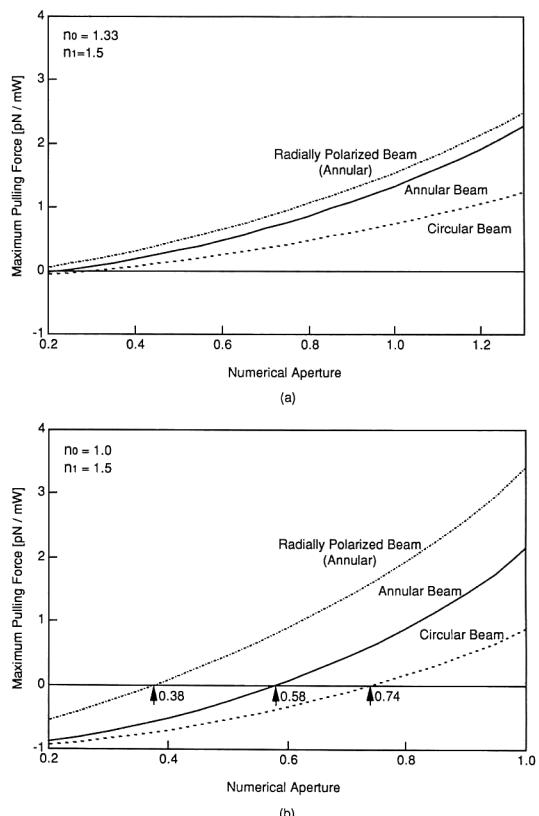


Fig. 7 Numerical aperture (NA) dependence of maximum pulling forces generated by our proposed methods. (a) water as surrounding medium ($n_0=1.33$), (b) air as surrounding medium ($n_0=1.0$).

の順に大きくなっている。

Fig. 7(b)は、媒質が空気($n_0=1.0$)である以外、パラメータは(a)の結果例と同じである。この場合も(a)の結果と同様に、対物レンズのNAが大きくなるとトラップ力は単調に大きくなる。トラップするのに必要なNAの値は、円形開口ビームではNA=0.74、輪帶ビームではNA=0.58、輪帶状のラジアル偏光ビームではNA=0.38となっている。

以上のことから、いかなるNAのレンズを用いた場合でも、あるいは異なる媒質においても、常に輪帶状のラジアル偏光ビームが最大の力をもつことがわかった。

4.2.2 NA比に対する依存性

輪帶内径と外径の比(NA比=NA_{inner}/NA_{outer})の違いによって、粒子に発生する力の大きさが異なるかどうかについても検討した。Fig. 8(a)に、水中($n_0=1.33$)のガラス粒子($n_1=1.50$)を開口数0.65の対物レンズで輪帶ビームを集光する際のトラップ力の最大値の

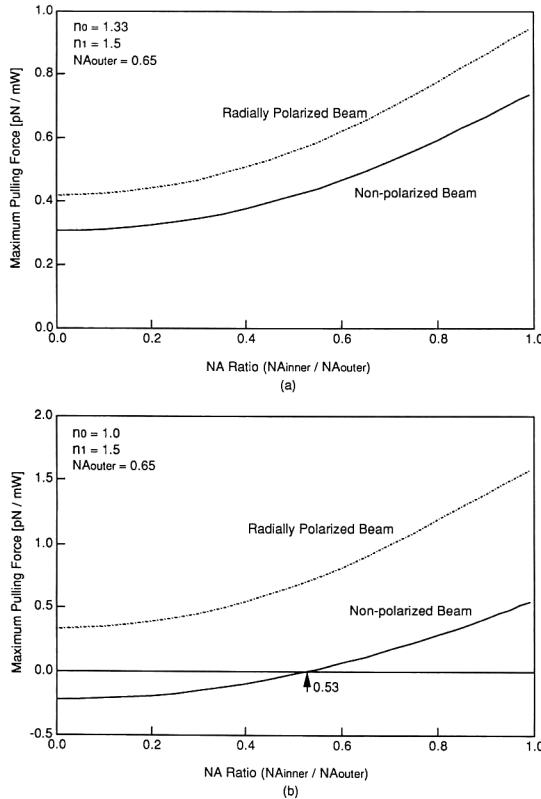


Fig. 8 Dependence of maximum pulling force with NA for both non-polarized and radially-polarized beams. (a) water as surrounding medium ($n_0=1.33$), (b) air as surrounding medium ($n_0=1.0$).

計算結果を示す。横軸は NA 比である。実線はラジアル偏光、一点鎖線は無偏光の場合である。いずれの場合も NA 比を大きくしていく（輪帯の幅が小さくなる）とトラップ力は増大しており、NA 比 = 0.99 の場合の輪帯ビームのトラップ力 ($f=0.74$ pN) は、NA 比 = 0 (すなわち円形開口ビーム) の場合 ($f=0.31$ pN) の 2.4 倍となっていた。また、輪帯状のラジアル偏光ビームの場合、NA 比 = 0.99 におけるトラップ力 ($f=0.94$ pN) は円形開口ビームの場合の 3.0 倍となっていた。

一方、Fig. 8(b) は媒質を空気 ($n_0=1.0$) とした場合の結果である。図中実線はラジアル偏光ビームの結果で、破線は無偏光の結果である。このように粒子の媒質に対する比屈折率が大きいときは、無偏光状態の輪帯ビームは、その NA 比が 0.53 以下では、引力は負の値を取り、すなわち粒子をトラップできず、むしろ集光点から押し下げてしまう。しかし一方、ラジアル偏光ビームにすれば、NA 比がゼロ (すなわち円形開口ビーム) であ

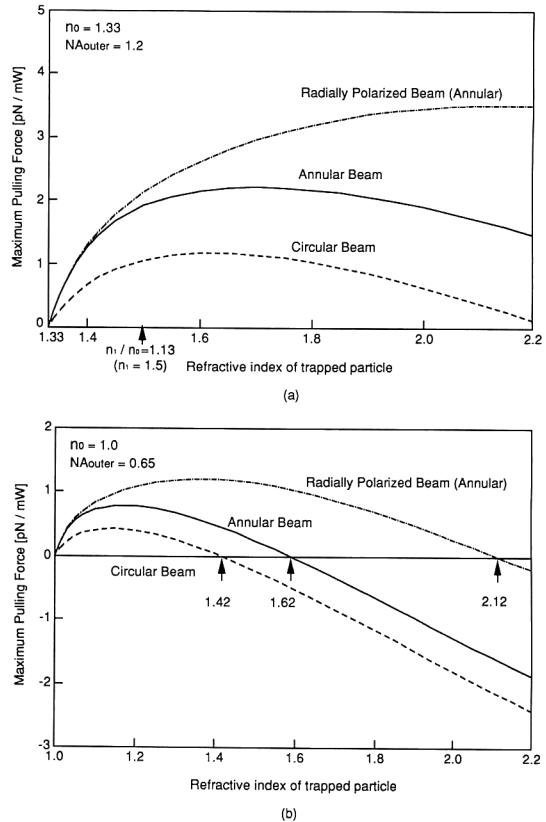


Fig. 9 Particle index dependence of the maximum pulling forces generated by our proposed methods. (a) water as surrounding medium ($n_0=1.33$), (b) air as surrounding medium ($n_0=1.0$).

っても正の引力が発生し、トラップが可能になる。また、どちらの場合も NA 比を大きくするほうがトラップ力は大きくなる。

4.2.3 粒子の屈折率に対する依存性

Fig. 9(a) は、水中 ($n_0=1.33$) に存在する粒子 (屈折率 n_1) を NA が 1.2 の対物レンズで集光したレーザー光でトラップする場合の結果である。円形開口ビームと輪帯ビームの結果では、粒子の屈折率が 1.7 度程度までは屈折率が上昇するにつれて力が大きくなるが、それ以上になると力は徐々に減少する。輪帯状のラジアル偏光ビームを用いると、 $n_1=1.7$ を越えても屈折率が大きくなるほどトラップ力が増加しており、他と比較して粒子の屈折率が高いほどトラップ力増強の効果が大きいことがわかる。

Fig. 9(b) は、空气中 ($n_0=1.0$) でトラップする場合の結果である。この場合は、粒子の屈折率がある値を越えて大きくなると引力は負となり、粒子はトラップできな

い。引力がゼロとなる値は、円形開口ビーム、輪帶、輪帶偏光ビームに対して、それぞれ $n_1=1.42$, $n_1=1.62$, $n_1=2.12$ であり、輪帶状のラジアル偏光ビームが、やはり比較的大きい比屈折率の粒子に対してもトラップが行えることを示している。

以上から、溶液中のガラスやポリメチルメタクリレートなど ($n_1/n_0 \sim 1.13$) は、輪帶ビームを用いることによって（偏光はいずれでもよい）トラップ力増強が効果的であるが、空気中のガラス粒子や水中におけるきわめて屈折率の高い粒子 ($n_1 \sim 1.7$) に対しては、輪帶ビームにラジアル偏光ビームを組み合わせることが必要である。

5. おわりに

本論文では、レーザートラッピングにおける光軸方向のトラップ力を増強する方法として、1) 輪帶ビームを用いた方法、2) ラジアル偏光ビームを用いた方法を提案した。これらの手法を用いることで、比較的低い NA (NA ~ 0.4) の対物レンズで集光した光でもトラッピングが行えるようになり、また粒子と媒質の比屈折率が大きくなる場合 ($n_1/n_0 \sim 2.0$) でもレーザートラップ可能であることを示した。筆者らはこの解析結果を検証する実験を行い、結果について別に報告している¹⁷⁾。

また、本論文における解析はすべて幾何光学近似が成り立つものとし、粒子の直径はレーザー光の波長の20倍以上として、ビームの回折拡がりは無視して行った。しかし、輪帶ビームでは NA 比が大きく (0.9 以上) なると入射光の角度拡がりが小さくなり、集光スポットの深度が増大する¹⁸⁾。そのため、輪帶ビームにおける NA 比は集光スポットの深度が粒子の半径を越えない程度にする必要がある。本解析はその範囲で有効である。

以上の結果から、本論文で提案した手法を用いれば、粒子を空气中やあるいは真空中でレーザートラップして操作することも可能になると考える。ただし、真空中でレーザートラップした場合、摩擦によるダンピングを受けないため粒子がトラップ中で振動する可能性がある。これを避けるために、粒子の振動に応じてレーザー光を on/off するなどのダンピング機構が必要になると見える。空气中や真空中での粒子操作は、微小機械の組立てなどに応用できると考えられ、今後の研究が期待される。

文 献

- 1) A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm and S. Chu : "Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles," Opt. Lett., **11** (1986) 288-290.
- 2) A. Ashkin, J. M. Dziedzic and T. Yamane : "Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams," Nature, **330** (1987) 769-771.
- 3) S. Block, L. S. B. Goldstein and B. J. Schnapp : "Bead movement by single kinesin molecules studied with optical tweezers," Nature, **348** (1990) 348-352.
- 4) Y. Tadir, T. Ord, W. H. Wright, R. H. Asch, O. Vafa and M. W. Berns : "Force generated by human sperm correlated to velocity and determined using a laser generated optical trap," Fertil. Steril., **53** (1990) 944-947.
- 5) 佐藤俊一, 稲場文男 : "レーザーピンセットによる微粒子、微生物操作", 光学, **19** (1990) 513-514.
- 6) K. Sasaki, M. Koshioka, H. Misawa, N. Kitamura and H. Masuhara : "Pattern formation and flow control of fine particles by laser-scanning micromanipulation," Opt. Lett., **16** (1991) 1463-1465.
- 7) H. C. Van de Hulst : *Light Scattering by Small Particles* (Dover, New York, 1957, 1981) Chap. 2-3.
- 8) L. M. Soroko : "Axiicons and Meso-optical imaging devices," *Progress in Optics XXVII*, ed. E. Wolf (Elsevier, Amsterdam, 1989).
- 9) R. Arimoto, C. Saloma, T. Tanaka and S. Kawata : "Imaging properties of axicon in a scanning optical system," Appl. Opt., **31** (1992) 6653-6657.
- 10) 例えば, M. Born and E. Wolf : *Principles of Optics* (Pergamon, New York, 1980) Chap. 1.5.
- 11) M. Kerker : *The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation* (Academic, New York, 1969) Chap. 3. 11.
- 12) G. Gousbet, G. Grehan and B. Maheu : "Scattering of a Gaussian beam by a Mie scatter center using a Bromwich formalism," J. Opt. (Paris), **16** (1985) 83-93; G. Gousbet, B. Matheu and G. Grehan : "The order of approximation in a theory of the scattering of a Gaussian beam by a Mie scatter center," J. Opt. (Paris), **16** (1985) 239-247.
- 13) J. S. Kim and S. S. Lee : "Scattering of laser beams and the optical potential well for a homogeneous sphere," J. Opt. Soc. Am., **73** (1983) 303-312.
- 14) G. Roosen and C. Imbert : "Optical levitation by means of two horizontal laser beams: a theoretical and experimental study," Phys. Lett., **59A** (1976) 6-8.
- 15) W. H. Wright, G. J. Sonek, Y. Tadir and M. W. Berns : "Laser trapping in cell biology," IEEE J. Quantum Electron., **QE-26** (1990) 2148-2157.
- 16) R. Gussgard, T. Lindmo and I. Brevik : "Calculation of the trapping force in a strongly focused laser beam," J. Opt. Soc. Am., **9** (1992) 1922-1930.
- 17) 杉浦忠男, 河田聰, 南茂夫 : "アキシコンプリズム照明系を用いたレーザー顕微トランピング", 第39回応用物理関係連合講演会予稿集 (1992) p. 787.
- 18) E. H. Linfoot and E. Wolf : "Diffraction images in systems with an annular aperture," Proc. Phys. Soc. LXVI, I-B (1953) 145-149.