レーザ光線を利用した3次元微小構造物の組立技術に関する研究*

(第1報, 空中における微粒子の操作法と組立法の提案)

池野 順一^{*1}, 澤木 大輔^{*2}
森 幸博^{*3}, 堀内 宰^{*1}

New Assembly Technique of Three Dimensional Micro-structure by YAG laser beam (1st Report, Proposition of Fine Particle Manipulation and Assembly Technique in the Air)

Junichi IKENO, Daisuke SAWAKI,
Yukihiro MORI and Osamu HORIUCHI

The focus of this paper is concerned about a newly developed micro-assembly technique using YAG laser beam. When a silica fine particle is put on a soda glass plate and irradiated by a single laser beam from the above, we found it becomes levitated and trapped along the optical axis in the air. It is for the first time that this special phenomenon has ever discovered, and its mechanism is difficult to be explained only by the traditional optical radiation pressure theory, some other unknown factors may be also included in it. The trapped particle can be manipulated in fully three dimensional orientation by scanning the laser beam or lifting and pulling down the working stage. This new 3D-manipulation technique is expected to be an effective way to handle with micro-assemblies for micro-device or micro-machine in the future. In this paper, the fundamental assembling experiments were done. The vertical and horizontal assemblies of plural fine particles, furthermore, the assembly of a 3D micro-structure with a tetrahedron form by 10 fine particles were experimentally proved.

Key Words: Assembly, Laser, Ultra-Precision Machining, Fine Particle, Optical Radiation Force, Micro-Structure

1. 緒言

微小な機能要素を集積化したマイクロマシン、マイクロデバイスに対する期待が高まっている。これらの製作には微細で複雑な加工を必要とするため、一般には半導体微細加工技術や精密放電加工技術などが用いられている。しかし、これらの加工法では加工対象となる材料や創成できる形状に制約がある。よって近年、精密微細機械加工技術の開発が進みつつあるが¹⁾²⁾、従来の機械加工技術の延長では実現が困難である。そこで新たなコンセプトに基づく、より自由度の高い精密微細加工法の開発が望まれている。

もし、部品素材の創成と形状創成を同時に行う精密微細加工法があれば、微小部品の所定箇所に各種機能性材料が形成でき、部品の飛躍的な高機能化と省スペース化が期待できる。具体策としては、各種微粒子を部品形状設計、素材設計に従って3次的に配列させ、その後、焼結などを行って機能性材料を創成し、かつ構造の強化を図る手法が有効であると考えられる。ただし、この新しい精密微細加工法を実現するには微粒子を3次元操作することが必須である。

微粒子の操作法では、レーザ光線の光放射圧を用いた手法が1970年Ashkinによって実現されている³⁾。現在、この操作法はバイオテクノロジーの分野で光ピンセットとして実用化されている。光放射圧を用いれば、非接触操作であるため、以下の利点が見い出せる。

- ①細胞のような軟質微粒子でも形が崩れない。
- ②反応性微粒子でもその界面性能が変わらない。
- ③大気中ならば自由度の高い複雑な操作が安定してできる。
- ④振動のない高速操作ができる。
- ⑤一度に任意の複数粒子を操作できる
- ⑥操作アームと微粒子間に生じる表面張力や静電気力の問題が解消できる。

現在、液中にある微粒子(粒径:数 μm)に対し、1本のレーザ光を照射すれば光放射圧による3次元操作が可能である。しかし、大気中で基板上にある微粒子を上方から1本のレーザで捕捉し、3次元操作した例は見当たらない。微細加工を行う環境としては、高い自由度と安定性が必要であるため、大気中にある微粒子の操作が望ましい。

そこで本研究では、まず大気中の微粒子をレーザ光を用いて3次元操作することを試みた。次にこの操作法を用いて、微粒子からなる3次元微小構造物を組み立てる新たな微細加工法の開発を試みた。

* 原稿受付 1998年2月17日。

^{*1} 正員, 豊橋技術科学大学工学部(〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)。

^{*2} 豊橋技術科学大学大学院。

^{*3} 学生員, 豊橋技術科学大学大学院。

Fig.1 Qualitative view of a particle trapping

Table 1 Conditions for simulation

YAG laser power	~ 20mW
Polarization	Circularly polarized light
Objective	× 50 (NA= 0.8)
Particle	SiO ₂ (φ 8.0 μm)
Refractive index	n = 1.4
Environment	Air
Refractive index	n = 1.0

2. レーザ光線による微粒子の捕捉実験

2.1 光放射圧による捕捉原理 捕捉しようとする微粒子よりも、光の波長が小さい場合、光放射圧の発生は幾何光学的に説明できる⁴⁾。図1に微粒子を透過する光によって生じる放射圧の概略を示す。いま光 a が微粒子に入射する時、その界面と垂直方向に F_{at} という光放射圧が生じる。さらに、微粒子を通り抜ける際、界面で F_{ao} という光放射圧が生じ、この合力は F_a で表される。光 b においても同様で光放射圧 F_b が生じる。微粒子全体がレーザ光から受ける力は、これら合力の F である。よって、光放射圧はほぼ微粒子の中心とレーザの焦点が引き合う方向に発生する。

表1に示す条件で、YAG レーザ光がシリカ微粒子に及ぼす光放射圧を計算してみた⁴⁾。ここでは、シリカ微粒子は YAG レーザ光に対して透明であり、光軸上に置かれた微粒子の上方からレーザ照射するものとした。ただし、焦点位置は粒子上端近傍から下端近傍までの範囲にあるものとした。これによって、光放射圧の発生は図2のようになる。図中、Z 軸は焦点の位置 ($Z=r/R$) を示しており、+1.0 は微粒子上端、-1.0 は微粒子下端を示している。一方、X 軸は重力を考慮してシリカ微粒子に作用する力を示している。軸上負の値が下方へ作用する力を表し、正の値が上方に作用する力を表している。したがって、レーザ出力 0mW

Fig.2 Relation between axial force and focal point

Fig.3 Experimental apparatus for laser trapping in the air

では微粒子にかかる重力 5.2pN 分だけ下方に力が作用している。出力 14mW では焦点が微粒子上端にある場合、上方に作用する光放射圧と下方に作用する重力が釣り合うという計算結果を得た。さらに、20mW では焦点が粒子中心よりも約 3 μm 上方にあれば、光放射圧によってシリカ微粒子を空中に持ち上げることが可能であるという計算結果を得た。

2.2 捕捉実験装置 捕捉実験のための装置を構築した。装置の概略図を図3に示す。装置はレーザ発振部、集光部の2要素からなり、除振台上の光学定盤に設置した。以下、これらについて詳述する。

①レーザ発振器には Q-switched YAG レーザ (Lee laser 製 818TQ) を用いた。主な仕様は $\lambda=1.06 \mu\text{m}$ 、最大出力 18W、ビームモード TEM_{00} である。また、YAG レーザ光は目視では確認できないため、照射位置を示すガイド光に He-Ne レーザ ($\lambda=633\text{nm}$) を用いた。

②集光部には、無限遠補正光学系の金属顕微鏡 (ニコン製, X2-TI-EPI) を用い、落射照明光の軸と一致するように YAG レーザを顕微鏡内に入射させた。対物レンズには明視野用 (CF IC EPI Plan × 50) を用い、本レンズにおいて YAG レーザ光と可視光の収差が無くなるよう改造を施した。一方、ガイド光を観察対象

Table 2 Experimental conditions for laser trapping

Objective	× 50 (NA= 0.8)
Particles	SiO ₂ (φ 5 μm ~ φ 16 μm)
Base	Soda glass
Environment	Air

Fig.4 Experimental setup

Fig.5 Trapped silica particle in the air

に照射すると、対象物によっては散乱、透過によってガイド光が観察部に入射されないことが危惧された。そこで図中①に示すような対策をとった。すなわち、ダイクロイックミラーに対してガイド光である He-Ne レーザは透過させ、YAG レーザのみを対象物に照射する。ミラーを透過した He-Ne レーザは屈折によって光軸がずれているため、ガイド光調整器でこのズレを補正する。その後、ガイド光調整器から反射してきた He-Ne レーザをダイクロイックミラー裏面で YAG レーザの光軸と一致させ、観察部に入射させる。このようにして、対象物に無関係で常に同じ明るさのガイド光が YAG レーザの照射位置を指し示すようにした。

図中、上方からの観察には、CCD カメラを設置した。さらに水平方向からの観察も可能なように、CCD を付したビデオスコープ (× 50 超長作動距離対物レンズ使用) を設置し、3次元で微粒子の挙動が観察できるシステムを構築した。

Fig.6 Relation between irradiated power and diameter of trapped particle

Fig.7 Relation between Q-switch repetition rate and diameter of trapped particle

2.3 連続照射による捕捉実験 上記の実験装置を用いて、微粒子へのレーザ照射実験を行った。レーザ平均出力は連続発振で 3.3W までの範囲とした。その他の実験条件を表2に示す。また、実験方法を図4に示す。シリカ微粒子をソーダガラス基板上に乗せ、レーザ焦点を微粒子上端に合わせてレーザ照射を行った。その結果の一例を図5に示す。これにより、シリカ微粒子 (φ 12.5 μm) はレーザ出力 2.55W で約 4 μm 上方に浮上し、光軸上で捕捉されることが分かった。φ 5 μm ~ φ 16 μm までのシリカ微粒子において、捕捉可能であったレーザ平均出力を図6に示す。これにより、何れのシリカ微粒子においても捕捉可能な平均出力は、計算値に比べ2桁も大きいものの、大気中で浮上させ捕捉できることが分かった。

2.4 Q スイッチパルス照射による捕捉実験 計算値に対し、2桁も大きな平均出力にしなければ捕捉できなかった原因は、大気中の水分などによる基板と微粒子の吸着力であると考えられた。そこで、この吸着を瞬時に切り離すにはピーク出力を大きくすることが有効と考えられた。そこで、Q スイッチを用いた照射実験を行って捕捉可能であった微粒子径と Q スイッチ周波数の関係を求めた。実験条件は表2に従った。実験結果を図7に示す。これにより、Q スイッチパルス照射でも、微粒子を大気中に浮上させ光軸上に捕捉

Fig.8 Trapped silica particle in the air when laser beam focuses on surface of soda glass

Fig.9 Effect of base plate on trapping of particle

できることが分かった．さらに，本実験では平均出力が 120mW 以下であり，連続照射時の 4%～6%の平均出力で容易に捕捉可能であることが明らかになった．

2.5 浮上現象の観察⁵⁹⁾ 次に光放射圧理論を確認するために，連続照射，Q スイッチパルス照射ともに，焦点を微粒子上端から下端まで合わせて照射実験を行ってみた．その結果，基板表面に焦点を合わせた場合でも，図8(b)に示すように微粒子(ϕ 9.69 μ m)が約 1 μ m浮上する現象を観察した．さらに，50 倍対物レンズを用いて基板上で捕捉した微粒子は，何れも基板外に搬送しようとする時，図9(b)に示すように基板縁に落下してしまうことが分かった．

前述したように本装置は可視光と YAG レーザ光の収差を完全に排除している．さらに，微粒子中心よりも焦点が上方にあるとすれば，少なくとも基板上から上方に 5 μ m焦点がずれていることになる．50 倍対物レンズ使用時は，Z ステージを 1 μ m上下に動かせばピントがぼやけてしまう．したがって本装置において，レーザ焦点は実験者によって所定の位置に正確に合わせることが可能である．光放射圧の理論によれば，焦点がシリカ微粒子の中心よりも下方向にある時，シリカ微粒子は下方の基板に押しつけられるはずである．さらに，光放射圧の発生は基板の有無に無関係なはずである．

以上，大気中において基板上にある微粒子を捕捉できたが，微粒子にかかる力の作用方向(Z 方向)や基板の影響など光放射圧理論では説明困難な現象が含まれていることが明らかになった．現在，大気中で基板上の微粒子がこのように浮上する現象は報告されておら

Fig.10 Procedure of micro-assembly technique by laser trapping

ず，メカニズムは不明である．ここでは，微粒子の本現象を「浮上現象」と呼ぶことにした．

3. 微粒子の3次元組立法

基板上の微粒子は，浮上することによって基板との吸着力から解放され，自由になると考えられる．よって，その後の微粒子は浮上現象と相俟って光放射圧による3次元操作が可能と思われる．そこで，本操作法を使って微粒子からなる3次元微小構造物の組立法を新たに考案した．

3.1 組立法の原理⁷⁾ 図10に組立法の概略を示す．小さい平均出力でも容易に捕捉できる Q スイッチパルス照射で，まず図中(a)に示すように基板と微粒子を剥離させる．この時，上方からの観察では微粒子像がぼやけてしまう．そこで，目視による微粒子操作を容易にするため，あたためて焦点を微粒子に合わせる．微粒子は浮上現象と光放射圧によって捕捉できると考えられるので，(b)ではZ ステージを降下させて，組み立てる高さまで微粒子を浮上させる．(c)では組み立てる位置まで微粒子を水平移動させる．光放射圧はレーザ焦点と微粒子中心がほぼ一致する方向に作用するため，レーザ光の水平走査に追従して微粒子は水平移動すると期待できる．最後に，(d)のようにZ ステージを上昇させて組み立てを完了させる．

Fig.11 Experimental apparatus for micro-assembly

Table 3 Experimental conditions for assembly

YAG laser power	130mW
Q-sw repetition rate	35kHz
Objective	× 50 (NA= 0.8)
Particles	SiO ₂ (φ 5.6 ~ 8.0 μm)
Base	Soda glass
Environment	Air

Fig.12 Silica particles assembled vertically

以上の原理によって、微粒子からなる3次元微小構造物の組立が可能と思われる。

3.2 組立実験装置 図11に組立実験装置の概略を示す。組立装置は、捕捉実験装置にビーム走査部を付加したものである。この走査部には、光軸と直交するX-Y平面上でレーザを水平走査できるように2枚のガルバノミラーを設置した。これにより、対物レンズで収束されたレーザ光は、分解能0.17 μmで高速水平走査可能となった。

4. 微粒子の3次元組立実験

まず、垂直・水平方向に微粒子の組立が可能か調

Fig.13 Silica particles assembled horizontally

査した。次に、その結果を受けて3次元微小構造物の組立を試みることにした。なお、実験条件は表3に示す通りである。ただし、微粒子を捕捉する際は、基板から剥離し易くするため、Q-sw周波数を一時的に数kHzにした。

4.1 垂直方向の組立⁷⁾ 実験結果の一例を連続写真で図12(a)~(d)に示す。(a)は①のシリカ微粒子上に②のシリカ微粒子を組み上げるため、②のシリカ微粒子を空中に浮上させたところである。(b)はシリカ微粒子を組み上げた様子を示している。さらに、(c)は③のシリカ粒子を捕捉して、②のシリカ微粒子上に位置するよう浮上させたところである。(d)は③のシリカ微粒子を組み上げた様子を示している。これにより、垂直方向に複数の微粒子を組み上げられることが分かった。

4.2 水平方向の組立⁷⁾ 3次元微小構造物を組み立てる場合、水平方向にも微粒子を組み立てる必要がある。ミクロンオーダーの微粒子では寸法効果により、重力よりも表面張力に支配されることが知られている⁸⁾。したがって、微粒子同士を接触させれば表面張力によって水平方向にも組立が可能と考えられた。そこで、水平方向の組立実験を試みた。その結果の一例を図13(a)~(d)に示す。(a)は垂直に組まれた①のシリカ微粒子の側面に②のシリカ微粒子を組み立てるところである。(b)は②のシリカ微粒子を組み立て、さらに③のシリカ微粒子を組み立てるところである。同様にして(c)(d)によって、さらに④のシリカ微粒子を組み立てた。これにより、シリカ微粒子は表面張力で保持され、水平方向に複数の組立が可能であった。

4.3 3次元微小構造物の組立⁷⁾ 垂直、水平方向の基礎的な組立が可能であったことを受けて、次に3

Fig.14 Micro-structure "TUT" consisting of 17 silica particles

Fig.15 3D micro-structure with a tetrahedron form consisting of 10 silica particles

次元微小構造物の組立を試みた。まず、豊橋技術科学大学のイニシャルである「TUT」を組み立てることとした。Tは垂直方向にシリカ微粒子を3個組み立てた後、最上部のシリカ微粒子の両脇に1個ずつシリカ微粒子を組み立て、計5個のシリカ微粒子で構成した。Uは垂直方向にシリカ微粒子を3個組み立てたものを2列作り、これらをつなぐよう1個のシリカ微粒子を基板上に配して計7個のシリカ微粒子で構成した。合計17個の微粒子からなる「TUT」の組立例を図14に示す。このように、2次元の文字を基板上に組み立てることができた。

次に、底辺の一边が3個のシリカ微粒子からなる四面体を組み立てることとした。その組立例をSEM写真で図15に示す。これにより、確かに3次元微小構造物の組立が可能であることが分かった。

5. 結言

本研究では、まず大気中でレーザ光線による微粒子

の3次元操作法を見出した。さらに、本操作法を用いて、微粒子からなる3次元微小構造物の新たな組立法を見出した。以下、本研究で得られた結果をまとめる。

- 1) 大気中で基板上のシリカ微粒子 (ϕ 5 μ m ~ 16 μ m) 上端にレーザを連続照射した場合、平均出力 2 ~ 3.3W で浮上し、光軸上で捕捉できることが分かった。
- 2) Q スイッチを用いることで、平均出力 120mW でも容易にシリカ微粒子を捕捉できることが分かった。
- 3) 大気中において、50 倍対物レンズを用い基板表面に焦点を合わせてレーザ照射した場合、基板上のシリカ微粒子 (ϕ 9.69 μ m) が基板から約 1 μ m 浮上する現象を確認した。
- 4) 大気中において、50 倍対物レンズを用い基板上で捕捉したシリカ微粒子は基板上でのみ捕捉状態を保てた。3) と合わせて、大気中、基板上の微粒子捕捉には、従来の光放射圧理論で説明困難な現象が含まれていることが明らかになった。
- 5) 大気中で基板表面から剥離したシリカ微粒子は、浮上現象と光放射圧による非接触3次元操作が可能となった。
- 6) この新操作法を用いて、シリカ微粒子を垂直方向、水平方向に組み立てることができた。
- 7) さらに本操作法を用いて、四面体などの3次元微小構造物の組立が可能となった。

今後は、微粒子の浮上現象の解明を行うとともに、微小構造物の強度評価、増強対策についても検討する予定である。さらに、組立作業効率を考慮した組立手法についても開発を試みる予定である。

最後に、貴重なご助言を賜った HiMEP 研究所 小林昭所長、本学 星鐵太郎教授と、本研究を始めるにあたって貴重なご助言を賜った大阪大学 増原 宏教授に深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) 山形, 精密工学会誌, 61-10(1995), 1361-1364.
- (2) 和井田, 岡野, 精密工学会誌, 61-10(1995), 1365-1368.
- (3) A.Ashkin, Physical Review Letters, 24-4(1970), 156.
- (4) A.Ashkin, Biophysical Journal, Vol.16(1992), 569-582.
- (5) 池野, 澤木, 他2名, 精密講論(1996.3), 705-706.
- (6) 池野, 平成7年度科学研究費補助金(試験研究B) 研究成果報告書(1996.3), 23.
- (7) 澤木, 池野, 他2名, 精密講論(1996.9), 479.
- (8) R.L.Alley, Proc.IEEE Solid-state Sencer of Actuator Work Shop, (1992), 202-207.