レーザ光線を用いた微粒子の配列法に関する研究*

(第 1 報, 水中における複数粒子の配列と運動制御)

池 野 順 一^{*1}, 澤 木 大 輔^{*2}森 幸 博^{*2}, 堀 内 宰^{*1}Study on New Arrangement Technique of Fine Particles by Laser Beam
(1st Report, Arrangement and Motion Control of Fine Particles in the Water)Junichi IKENO^{*3}, Daisuke SAWAKI,
Yukihiro MORI and Osamu HORIUCHI^{*3} Toyohashi University of Technology, Dept. of Production Systems Engineering,
Hibarigaoka 1-1, Tenpakuchō, Toyohashi, Aichi, 441-8580 Japan

The fine particle manipulation using optical radiation force has already been investigated in former research. Based upon that, the manufacturing method of the micro parts made up of some fine particles has been developed. However, when the micro parts consist of a lot of fine particles, the manipulation and assembly procedures become time consuming with low work efficiency because of the one by one operation. To solve this problem, a new arrangement method with a single laser beam was realized and proposed in the study, which is able to conduct the assembly procedures efficiently and practically. In detail, the method is to arrange particles by stopping the scanning of a YAG laser beam for a short interval at some appointed positions along the scanning locus to give out a larger amount of input laser energy so that fine particles can be trapped in priority at those stop positions. Therefore it becomes realizable to trap several fine particles at the appointed locations. Furthermore, if the stop positions of the laser scanning are arranged at the same time, the plural trapped fine particles can be manipulated simultaneously. This idea has also been experimentally realized.

Key Words: Laser, Optical Radiation Force, Fine particle, Manipulation, Ultra-precision Machining, Arrangement

1. 緒言

光放射圧による微粒子の捕捉は, 1970 年米国の Ashkin によって実現されている¹⁾. 筆者らは, この原理に基づく微粒子操作を新たなマイクロマシニング法の開発に適用することを検討している. 今までに空中における微粒子の 3 次元操作法を考案し, 3 次元微小構造物の組立技術を開発してきた²⁾. 本組立技術を利用して, 各種微粒子を部品形状設計, 素材設計に従って 3 次元的に配列させれば, 部品形状と素材の同時創成が可能な新しいマイクロマシニング法が構築できる. これによって, 所定箇所に所定機能を持たせた微小部品の製作が可能となり, 微小部品の飛躍的な高機能化と省スペース化が期待できる. 今後益々重要とされるマイクロマシーン技術において, 本技術は大変有望な加工法になると考えられる.

現在, 1 本の YAG レーザ光を用いて微粒子を一個ずつ操作し組立作業を行っている. そのため, 複雑な構造物や比較的大きな構造物は, 微粒子を無数に組み上げなければならず, 作業効率は低いと言わざるを得ない. そこで, 本研究では作業効率を向上させるための微粒子配列法の開発を試みた. 本報では, その基礎

研究として, 水中における微粒子の高効率で高精度な 2 次元配列法を検討したので報告する.

2. 微粒子の捕捉原理と実験装置

2.1 捕捉原理 本研究では微粒子の捕捉に YAG レーザ光 ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$) を用いる. また, 捕捉する微粒子は, 粒径 $6 \mu\text{m} \sim 40 \mu\text{m}$ までの SiO_2 , もしくは高分子である. このように微粒子径がレーザ光の波長よりも大きい場合, 光放射圧による微粒子の捕捉原理は幾何光学的に説明できる³⁾. 微粒子を透過する光によって生じる放射圧の概略を図 1 に示す. 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

Fig.1 Qualitative view of trapping of dielectric sphere

* 原稿受付 1998 年 9 月 16 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} 学生員, 豊橋技術科学大学大学院.

E-mail: ikeno@tutpsc.tut.ac.jp

Fig.2 Experimental setup for manipulation of particles

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 においても同様に光放射圧 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、ほぼ微粒子の中心とレーザの焦点が引き合う方向に光放射圧が発生するため、光による微粒子の捕捉が可能となる。ただし、これら微粒子は YAG レーザに対して透明であり、界面における反射率が数%と低いため、捕捉における反射の影響は無視できるものと考えられる。一方、捕捉力 F はレーザの照射出力が高いほど、あるいはレンズの開口数が多いほど大きくなることが知られている。

2.2 実験装置 上記の原理を基に微粒子を捕捉し、操作するための実験装置を構築した。装置の概略を図2に示す。装置は①レーザ発振部、②ビーム走査制御部、③集光部の3要素からなり、除振台の光学定盤上に設置した。以下、これらについて述べる。

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 TEM₀₀ である。なお、Qスイッチは必要に応じて周波数 35kHz にて使用した。一方、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：ビーム走査制御部には、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コンピュータ制御可能な2枚のガルバノミラーを設置した。また、常に対物レンズの瞳内にレーザが入射されるようにリレーレンズを設けた。これにより、YAG レーザ光は最高分解能 $0.17 \mu\text{m}$ ($\times 100$ 対物レンズ使用時)、最高走査速度 2m/s ($\times 5$ 対物レンズ使用時) で走査することが可能である。

③：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) を用いた。YAG レーザ光は落射

Table 1 Experimental conditions for laser trapping of a particle

Irradiated power : 1.5W	Objective : $\times 20$ (NA=0.46)
Base : Glass	Particle : SiO_2 ($\phi 40 \mu\text{m}$)
Environment : Water

Fig.3 Manipulation of a particle by a YAG laser beam

照明光の軸と一致するように顕微鏡内に入射させた。なお、対物レンズには明視野用対物レンズ (ニコン製, CF IC EPI Plan) を用いた。

3. 単一微粒子の捕捉・操作

3.1 単一微粒子の捕捉実験 本研究では、前述したように微粒子を効率よく正確に配列することを目指している。ここでは、まず1個の微粒子を捕捉し、その操作性について検討を行った。ソーダガラス基板上に SiO_2 微粒子 ($\phi 40 \mu\text{m}$) を含む蒸留水を約 $100 \mu\text{m}$ の膜厚になるよう滴下し、上方から YAG レーザ光を照射して水中の SiO_2 微粒子を捕捉した。その後、ガルバノミラーによって長方形の輪郭形状にレーザ光を走査し、微粒子操作を行った。ガルバノミラーの操作は、予めコンピュータの4つのキーにレーザ光の走査方向 ($\pm X, \pm Y$) を割り当て、キー操作により行った。実験条件を表1に示す。また、微粒子を時計回りに操作した実験の様子を連続写真で図3①～④の順に示す⁴⁾。なお、①～④の各図中央には操作確認を容易にするため、基板上に固定された微粒子を示した。これにより、光放射圧を用いて単一微粒子の捕捉、操作が可能であることを確認した。

3.2 微粒子の追従性 組立を行う場合、微粒子をできるだけ高速に操作することが望まれる。しかし、水中では式(1)に示すように水の抵抗を受けるため、微粒子操作速度には限界が存在する。

$$F_v = 6 \pi \eta r v \quad \dots (1)$$

F_v : 微粒子の媒質から受ける粘性抵抗, r : 粒子径
 η : 媒質の粘性率, v : 微粒子の操作速度

Table 2 Experimental conditions

Irradiated power : 0.5W ~ 2.5W	Objective : $\times 50$ (NA=0.8)
Base : Glass	Environment : Water
Particle : SiO ₂ (ϕ 10 μ m, ϕ 20 μ m, ϕ 32 μ m)

Fig.4 Relation between maximum following speed of a particle and irradiated power

Table 3 Experimental conditions for arrangement

Irradiated power : 1.5W	Q-switch repetition rate : 35kHz
Base : Glass	Objective : $\times 50$ (NA=0.8)
Environment : Water	Particle : Hard plastic (ϕ 6 μ m)

Fig.5 Arrangement of 20 particles by YAG laser beam

表2に示す実験条件で、 ϕ 110 μ mの円周上にレーザ光を走査させて、SiO₂微粒子の操作限界を確認した。各照射出力で微粒子の捕捉状態が解除された時の走査速度を記録し、微粒子追従限界速度として図4にまとめた。これにより、照射出力の増大にともない追従限界速度は大きくなることが分かった。これは照射出力の増大により光放射圧も増大したためと考えられる。一方、粒子径の増大にともない追従限界速度は小さくなった。これは、式(1)で示したように粒子径の増大により粘性抵抗が増加したためと考えられる。今回の実験範囲では、 ϕ 10 μ mのSiO₂微粒子が照射出力2.5Wで約6.5mm/sまで追従することを確認した⁴⁾。

3.3 手動制御による個別配列 3.2で得た追従限界速度は、 ϕ 110 μ mの円形走査軌跡上を1,100rpm

Fig.6 Histogram of a positioning accuracy

Table 4 Experimental conditions for laser trapping of some particles

Irradiated power : 1.5W	Objective : $\times 50$ (NA=0.8)
Base : Glass	Particle : SiO ₂ (ϕ 6 ~ ϕ 12 μ m)
Environment : Water	Scanning speed : 6.6mm/s

Fig.7 Trapped particles by YAG laser beam

以上で回転する速度に相当する。したがって、個々の微粒子を高速に配列できる可能性を有している。そこで3.1で述べたキー操作により、1個ずつ微粒子を配列させる手動制御実験を行った。ここでは、観察視野内に散在している微粒子20個を選び、37 μ m間隔の5行4列の配列を形成した。この配列時にはCCDカメラを用いて、1380倍に拡大したTVモニターを見ながら、目測により配列位置を定めた。一方、複数の微粒子がどれも同一条件で捕捉されるよう、できるだけ粒径と形状の揃った微粒子を使用することにした。そのため、液晶パネルでスペーサとして使用されている硬質プラスチック（積水ファインセラミックス製、ミクロパール SP-206）を用いた。さらに、捕捉が容易なQスイッチを用いることにした。実験条件を表3に示す。また、図5に5行4列に配列させた微粒子の様子を示す。3回の手動制御実験の結果、配列作業に平均402秒を要した。一方、位置決め誤差のヒストグラムを図6①に示す。図5からも分かるように多少乱れた配列となり、誤差は4 μ mをピークに7 μ mまでの範囲に及んでいることが分かった。誤差発生の主原因は、レーザが基板や水に吸収されて生じる局所対流が、すでに配列している微粒子を動かしてしまうためであることが実験から明らかになった。したがって、

Fig.8 Principle of the new arrangement method by YAG laser beam

Fig.9 Scanning loci of YAG laser beam for arrangement

配列を高精度に行うには、個々の微粒子を同時に定点配列させることが不可欠であることが分かった。

4. 複数微粒子の同時・定点配列法

個々の微粒子を同時に所定箇所へ配列させるには、複数本のレーザ光を同時制御する手法が挙げられる。しかし、これでは装置が高価となるばかりで、賢明な手法とは言えない。そこで本研究では、1本のYAGレーザ光を用いて微粒子を同時・定点配列させる手法について検討を行った。

4.1 複数微粒子の捕捉実験 まず、複数の微粒子を同時に捕捉する基礎実験を行った。このような捕捉法については、既に笹木の研究が報告されている³⁾。この複数微粒子の捕捉原理は以下の通りである。すなわち、追従限界速度以上でレーザ光を繰り返し走査する時、3.2で示したように光の軌跡上にある微粒子は追従できない。ところが、断続的ではあるが捕捉力が

Table 5 Experimental conditions for arrangement of some particles
Irradiated power : 1.5W Q-switch repetition rate : 35kHz
Base : Glass Objective : $\times 50$ (NA=0.8)
Environment : Water Scanning frequency : 17Hz
Particle : Hard plastic ($\phi 6 \mu\text{m}$)

Fig.10 Arrangement process of 20 particles by single laser beam

かかるため、この軌跡から逃れられない。このようにして、軌跡上にある複数の微粒子は全て捕捉されることになる。ここでは図4の結果を基に、表4の実験条件を定め確認実験を行った。実験では $\phi 110 \mu\text{m}$ の円周上で反時計回りにレーザ光を走査し、微粒子の挙動を観察した。観察結果を連続写真で図7①②の順に示す。図中、方向性を明確にするため基板上に固定された微粒子も同様に撮影した。これにより、レーザ走査軌跡上には約20個の微粒子が捕捉されていることを確認できた。しかし①と②を比較して明らかなように、微粒子A, B, Cの配列順は維持するものの、数珠つなぎになって軌跡上を走査方向に移動してしまうことが分かった。したがって、本捕捉法は複数の微粒子を同時に捕捉可能であるが、各微粒子を定点配列させることは困難であることが分かった。

4.2 同時・定点配列法の考案 次に、微粒子の同時・定点配列法の具体的検討を行った。4.1で述べた複数微粒子の同時捕捉法と、3.3で述べた個別にレーザエネルギーを投入する配列法を総合すれば、複数微粒子を同時に、しかも定点で配列できるものと考えられた。すなわち、図8に示すように、レーザ光を追従限界速度以上で繰り返し走査させ、微粒子を捕捉したい箇所(図中矢印A)では、走査を短時間一時停止させる。これによって、投入エネルギー分布が局所で高まり、その位置で優先的に微粒子が捕捉されることになる。複数の所定箇所でのYAGレーザの走査を一時停止すれば、複数の微粒子を高精度で、しかも短時間

Fig.11 Arrangement conversion by single laser beam

に同時・定点配列できるものと期待される。

4.3 配列のアルゴリズム 以下、配列プログラムのアルゴリズムを示す⁹⁾。

①：配列パターンを X-Y 平面上に作成するため、微粒子の配列座標を入力する。次に、観察視野内で散在している微粒子から配列させるものを選択し、それらの位置座標をコンピュータに入力する。このポイント教示は、3.1 で示したガルバノミラーの操作によって行った。

②：図 9 に示すように、配列パターン上の座標と散在している各微粒子の座標から各微粒子の最短移動軌跡 (A) を算出する。さらに、これらの軌跡を等分割して各軌跡上の n 番目同士の分割点を結び、分割数分のレーザ走査軌跡を作成する。

③：各分割点で一時的に停止するように、YAG レーザを繰り返し高速走査させる。全ての微粒子が捕捉状態になったことを確認した後、図 9 中の矢印 (B) に従って配列パターンに近づくように、レーザ走査軌跡を順次切り替えていく。以上によって、所望の配列が完成できると考えられる。

4.4 配列実験 上記の配列アルゴリズムを用いて、20 個の微粒子を $37\ \mu\text{m}$ の間隔で 5 行 4 列に配列する実験を試みた。実験条件を表 5 に示す。実験結果は連続写真で図 10 ①～④の順に示す。図中、微粒子間に示した線は、YAG レーザ光の走査軌跡である。まず、①では散在する 20 個の微粒子を結ぶように繰り返しレーザ光を走査させた。この時の繰り返し数

Fig.12 Arrangement transformation by single laser beam

Fig.13 Motion control of some particles by single laser beam

は 17Hz であり、微粒子位置での停止時間は 1ms である。②～③では配列パターンに近づくように走査軌跡を順次切り替えた様子を示す。④は複数の微粒子を所定位置に配列させた様子を示す。これにより、本配列法で複数の微粒子を同時に定点配列可能であることが明らかになった⁷⁾。なお、配列に要した時間は 115 秒であった。その内訳は、散在する微粒子の座標入力に 110 秒を要し、図中①～④のプログラム実行には 5 秒を要した。配列終了時の位置決め誤差のヒストグラムを図 6 ②に示す。これにより、位置決め誤差は $1\ \mu\text{m}$ 以下であることが分かった。したがって、本研究で考案した同時・定点配列法は、手動制御時に比べて約 1/3 の所要時間で、より正確に配列可能になったことが分かった。

5. 微粒子の配列修正及び運動制御

微粒子配列による微小部品の組立では、配列姿勢や配列パターンの修正など柔軟な対応が求められる。そこで、まずこれらの配列修正の可能性について検討を行った。次に本配列法の自由度を知るために、個々の微粒子の運動制御性を調査した。

5.1 姿勢修正 まず、5 行 4 列の配列パターンを維持したまま、90°の姿勢修正を試みた。実験条件は

照射出力 0.96W, 走査繰り返し数 5.25Hz, 一時停止時間 1ms, その他の条件は表5に従った. 実験結果を連続写真で図11①~④の順に示す. これによって, 配列パターンを崩すことなく姿勢修正可能であることが分かった.

5.2 パターン修正 次に, 5行4列の配列パターンを☆形の配列パターンに修正することを試みた. このアルゴリズムは, 4.3の配列アルゴリズムからポイント教示による座標入力を省いたものを適用した. 実験条件は, 走査繰り返し数を 17.75Hz, 一時停止時間を 1ms とし, その他は表5に従った. 実験結果を図12①~④の順に示す. 修正に要した時間は9秒であり, 速やかにパターン修正できることが分かった⁷⁾.

5.3 運動制御性の調査 37 μm 間隔に並べた3個の微粒子(①~③)に対し, ①は正三角形(一辺 29 μm), ②は円形(直径 28 μm), ③は正方形(一辺 28 μm)の輪郭上をそれぞれ同時に運動させる実験を行った. 実験条件は, 輪郭上を一周するのに要する時間をどれも 2.63 秒とし, 一時停止時間を 1ms とした. その他の条件は表5に従った. 運動制御した様子を 133ms 毎に撮影した連続写真で図13に示す. 図中の矢印は各微粒子の運動方向を示している. これにより, 各微粒子は指示された形状通りに運動していることが明らかになった. 以上より, 本配列法は極めて高い自由度を有していることが分かった⁷⁾. さらに, 微細組立技術への応用に留まらず, マイクロメカニズムへの応用としても興味深いものであると考えられる.

6. 結言

以上, 光放射圧を用いて水中における複数微粒子の同時・定点配列を試みた. その結果, 比較的高速で高精度, かつ高い自由度を有する新しい2次元配列法が開発できた. 以下, 本研究で得られた結果をまとめる.

- 1) 光放射圧で捕捉された1個の微粒子は, ガルバノミラーによってレーザ光を長方形の輪郭形状に走査した時, 追従して操作されることを確認した.
- 2) 照射出力 2.5W で ϕ 10 μm のガラスビーズを捕捉した場合, 6.5mm/s のレーザ走査に追従して操作可能であることが分かった.
- 3) 微粒子の追従限界速度以上でレーザ光を繰り返し走査する時, 走査軌跡上に複数の微粒子が捕捉されることを確認した. ただし, 微粒子は数珠つなぎになって軌跡上を移動した.
- 4) 本研究で考案した配列法によって, 20 個の微粒子からなる5行4列の同時配列が可能となった.
- 5) その所要時間は115秒であり, その内訳は, 散在す

る微粒子の座標入力に110秒を要し, プログラムの実行には5秒を要した. これは, 同様の配列パターン形状に1個ずつ微粒子を配列させた場合に要する時間の約1/3であり, 短時間で配列可能であることが判明した.

- 6) 考案した配列法の位置決め誤差は, 1 μm 以下であった. 手動制御による配列位置決め誤差は, 4 μm をピークに7 μm までの範囲でばらつきがあった. これにより, 本配列法は手動制御時に比べ, 高精度に配列可能であることが明らかになった.
- 7) 5行4列の配列を維持したまま, 配列姿勢を90°修正することが可能であった.
- 8) 5行4列の配列パターンを☆形の配列パターンに修正することが可能であった. 所要時間は9秒であり, パターン修正は容易にかつ速やかに実行可能であることが分かった.
- 9) 3個の微粒子に対し, 各々異なった輪郭形状上を同時に運動制御することができた. よって, 本配列法は高い自由度を有することが分かった.

今後は, 観察視野内で散在する微粒子を画像処理により自動認識させ, 配列に要する時間のさらなる短縮を目指したい. また, 3次元微小構造物を組み立てる際, 本配列法が適用できるように空中での3次元配列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 小林昭先生, 本学 星鐵太郎教授, 埼玉大学 河西敏雄先生に感謝いたします. なお, 本研究の一部は平成9年度文部省科学研究費補助金「基盤研究 B2 08555035」によって行われたことを付記する.

文 献

- (1) A.Ashkin, Physical Review Letters, 24-4 (1970), 156.
- (2) 澤木大輔, 池野順一, 森幸博, 堀内宰, レーザ光線による微粒子の操作とその応用に関する研究 (第5報), 1996年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1996-9), 479-480.
- (3) A.Ashkin, Biophysical Journal, Vol.16 (1992), 569-582.
- (4) 池野順一, 澤木大輔, 堀内宰, 永峰浩, レーザ光線による微粒子の操作とその応用に関する研究 (第1報), 1995年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1995-9), 493-494.
- (5) 増原極微変換プロジェクト編, マイクロ化学, (1993-9), 化学同人, 76.
- (6) 池野, 光放射圧を利用した3次元微小構造物の組立技術に関する研究, 平成9年度科学研究費補助金 (基盤研究 B2) 研究成果報告書 (1998-3), 32.
- (7) 澤木大輔, 池野順一, 森幸博, 堀内宰, レーザ光線による微粒子の操作とその応用に関する研究 (第8報), 1997年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1997-3), 1125-1126.