

# 光で操るマイクロ・ナノマシン

丸尾 昭二

〈横浜国立大学大学院工学研究院システムの創生部門(生産工学科) 240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5

e-mail: maruo@ynu.ac.jp〉

光の放射圧でマイクロな物体を自在に操る技術は、「光トラッピング」あるいは「光ピンセット」と呼ばれ、生物学、物理学、化学、機械工学などあらゆる分野で広く活用されている。我々は、この光トラッピングによって遠隔駆動するマイクロマシンの開発を行っている。このマイクロマシンは、光硬化性樹脂を用いた「2光子吸収マイクロ光造形法」という3次元微細加工技術によって作製される。すでに、マイクロタービンやナノピンセットなどを開発し、レーザー光による遠隔駆動に成功している。これら光駆動マイクロ・ナノマシンは、バイオ研究用ナノツールや高性能バイオチップなど多方面への応用が期待される。本稿では、光駆動マイクロマシンについて、作製法、駆動原理、そして将来の応用展開について解説する。

## 1. はじめに

光が物体の表面で反射や屈折すると、物体に力が作用するという現象は、マクスウェルの光の電磁理論によって証明されており、光の放射圧と呼ばれている。<sup>1)</sup> この光の放射圧は、比較的強度の強いレーザー光をレンズで絞り込んだ状態でもピコニュートン・オーダーという非常に微小な力であるため、通常のマクロな世界では到底感じることはない。しかし、ミクロ世界ではどうだろう。慣性力は体積の3乗に比例して小さくなり、粘性力も表面積に比例して小さくなる。もちろん、光の放射圧も物体の大きさや形状に依存するが、数ミクロンから数十ミクロン程度の大きさの物体に働く放射圧は、慣性力や粘性力よりも十分大きな値となる。つまり、光の放射圧によって、微小な物体を非接触で動かすことができるのである。

1970年、米国ベル研究所のアシュキン(A. Ashkin)らは、対向する2本のレーザー光をレンズで集光させて形成した焦点部分に、誘電体微粒子を捕まえる実験に成功した。<sup>2)</sup> さらに、アシュキンらは、単一のレーザー光を開口数の高い対物レンズで集光させた焦点に誘電体微粒子を捕まえることにも成功した。<sup>3)</sup> その後、この単一レーザー光によって微小物体を捕まえる技術が、光トラッピングあるいは光ピンセットと呼ばれ、微小な試料を捕まえて自在に操作する手段として発展し、化学、<sup>4,5)</sup> 物理、<sup>6)</sup> 生物学、<sup>7,8)</sup> 生物物理学<sup>9)</sup>など幅広い分野で利用されるようになった。

最近では、細胞などの生体試料や球形の微粒子だけでなく、複屈折性をもつ微小物体<sup>11)</sup>や形状の異方性を有する物体<sup>12)</sup>を光トラップし、捕捉した物体にトルクを発生させて、微小物体を回転させる研究が数多く報告されている。さらに、このような光による回転運動をマイクロマシンの駆動源に応用する目的で、微細加工技術を利用して、さまざまな形状に加工されたマイクロ構造体を光回転させる研究も進められている。例えば、リソグラフィ技術によって作製された形状異方性を有する回転子<sup>13-15)</sup>やマイクロ攪拌子<sup>16)</sup>などが作製されている。また、これらの回転子の駆動に関しては、光線追跡法などを利用した数値解析も多数行われている。<sup>17,18)</sup> さらに、光トラッピングされた複数の高

分子微粒子を光重合反応によって接着させて微小構造体を作製し、それを回転させるなどの研究も行われている。<sup>19,20)</sup>

これら従来の光回転子は、液体中に浮遊する微小物体を回転させるタイプがほとんどである。このため、実験では多数の回転子を液体中に分散させて、その中の1つを捕まえるという手段をとらなければならない。また、レーザー光を照射し続けなければ、回転子をその場にとどめておくことが困難である。したがって、浮遊タイプの回転子は、マイクロマシンに内蔵させるのが難しく、応用範囲が限定されるという課題がある。

一方、我々は、浮遊タイプではなく、拘束されたマイクロ可動機構を作製し、それらをレーザー光で駆動する新しい光駆動マイクロマシンを提案・開発している。<sup>21)</sup> このマイクロ可動機構は、独自開発の2光子マイクロ光造形法<sup>22)</sup>で作製される。2光子マイクロ光造形法は、近赤外フェムト秒パルスレーザー光を用いて光硬化性樹脂を硬化させ、任意の3次元マイクロ構造を形成する技術である。我々は、本手法を用いて可動機構を作製するプロセスを提案し、マイクロタービン<sup>23)</sup>やナノピンセット<sup>24)</sup>などの作製に成功している。これら光駆動型のマイクロ可動機構は、従来の浮遊タイプに比べて、多くの長があり、バイオ研究用ツールやバイオチップなど幅広く応用できる。本稿では、我々が開発中の光駆動マイクロ・ナノマシンについて詳しく紹介する。

## 2. 2光子マイクロ光造形法

光造形法とは、光硬化性樹脂を用いて任意の立体形状を造形する技術である。具体的には、光硬化性樹脂の表面に紫外レーザー光を集光させ、所望の3次元形状の断面スライス形状に従ってレーザー光を走査し、断面形状を順次硬化・積層させることで、任意の立体を形成する。この積層法に基づく手法では、積層させる樹脂層の厚みを50 μm程度以下にするのが困難であるため、造形装置や造形条件の最適化を行ったとしても、ミクロンオーダーの加工分解能を得ることはできなかった。ところが、2光子マイクロ

光造形法は、光造形法の加工分解能を一気に 100 nm に迫るところまで向上させたのである。以下では、2 光子マイクロ光造形法の誕生から造形原理、造形例を紹介する。

## 2.1 2 光子マイクロ光造形法の誕生

2 光子マイクロ光造形法の誕生は、ナノフォトニクス研究者である大阪大学の河田と、マイクロマシン・医療ロボットの研究者である名古屋大学の生田との共同研究に端を発する。当時、生田らは従来の積層型光造形法を駆使して、世界で初めて数  $\mu\text{m}$  の加工分解能を実現し、マイクロコイルなどの試作に成功していた。<sup>25)</sup> 一方、河田らは、感光性高分子の内部にレーザー光を集光させ、3次元空間にビット情報を記録する3次元光メモリーの研究を行っていた。<sup>26)</sup> この3次元メモリーの原理を利用して、光造形法においても樹脂内部の焦点部のみ硬化させることができれば、積層させる樹脂の厚みの制限を受けることなく、光の回折限界まで分解能を向上できる。ただし、従来の紫外光を樹脂内部に集光した場合、吸収が大きくなり、樹脂表面で光が吸収されて減衰してしまい、樹脂内部に光強度の高い領域を形成できない。そこで、河田は2光子吸収という非線形光学現象を利用することを提案した。2光子吸収を利用すれば、次節で述べるように、光強度の高い焦点部のみで吸収が生じるため、焦点近傍の樹脂のみを選択的に硬化させることができる。この2光子吸収による3次元造形は、1997年に実証された後、<sup>22)</sup> 次世代光デバイスであるフォトニック結晶の作製などさまざまな分野で応用研究が進められている。<sup>27-29)</sup> また、加工分解能についても詳細な調査がなされており、120 nm の面内分解能が達成されている。<sup>30)</sup>

## 2.2 2 光子マイクロ光造形法の原理

一般に光硬化性樹脂は、光重合開始剤、モノマー、オリゴマーなどから構成される液状樹脂である。光硬化性樹脂に光が照射されると、まず光重合開始剤が光を吸収して反応性の高いラジカルを生成し、モノマーと連鎖的に反応して3次元的に架橋されたポリマー(固体)が形成される。ほとんどの光重合開始剤は、紫外光に感度があるため、従来のマイクロ光造形法では紫外レーザー光が用いられてきた。

一方、2光子吸収では、図1に示すように、光重合開始剤に近赤外光子を2つ同時に吸収させて、紫外光子を1つ照射した場合と同等の効果を引き起こす。<sup>22, 31)</sup> つまり、紫外光の2倍の波長をもつ近赤外光を用いて光硬化性樹脂を硬化させることができる。ただし、2光子吸収の起こる確率は非常に小さい。一般に、1光子吸収の吸収断面積は  $10^{-16} \text{ cm}^2$  程度であるが、2光子吸収の吸収断面積は  $10^{-50} \text{ cm}^4$  程度しかない。<sup>32)</sup> そこで、フェムト秒パルス光を用いて瞬間的に光強度を高め、さらに高開口数レンズで空間的にも高密度に光を閉じ込めて、2光子吸収を誘起する。このとき、2光子吸収の起こる確率が光強度の2乗に比例するため、光強度の高い焦点近傍に光吸収のピークが生じる。その結果、集光点近傍の樹脂のみを選択的に硬化させることができ、サブミクロンの加工分解能を達成できる。

2光子造形法の造形手順は、従来の積層法に基づく光造形法とは大きく異なる。従来法では、3次元CADデータをスライスした断面形状に応じて、樹脂の液面でレーザー光を走査させて各断面を硬化させ、新しい樹脂層を順次形成しながら所望の立体を造形する。一方、2光子造形法では、3次元空間の1点のみを選択的に硬化させることができるため、光硬化性樹脂の内部に集光させたレーザー光を、ガルバノミラースキャナーや精密ステージを用いて樹脂中で3次元的に走査するだけで所望の立体形状を硬化させることができる。最終的には、レーザー照射後に未硬化の光硬化性樹脂を取り除けば、レーザースポットの軌跡として、任意の3次元構造を得ることができる。

2光子吸収マイクロ光造形法には、サブミクロン分解能に加えて、多くの特長がある。近赤外光が光硬化性樹脂に対して透明であるため、光硬化性樹脂の奥深くレーザー光を集光させた場合でも、集光スポットの乱れが極めて小さい。また、近赤外域では、硬化前と硬化後の樹脂の屈折率差が小さいので、樹脂内部に造形物が形成されても、レーザー光が乱されることが少ない。したがって、アスペクト比の高い構造や複雑な形状の造形も高精度かつ高分解能で造形することができる。さらに、レーザー光を樹脂内部で3次元的に走査させるだけで、マイクロ可動部品を組立工程なしで高速作製できる。以下では、マイクロ可動部品の高速作製法について詳しく述べる。

## 2.3 マイクロ可動機構の高速作製

一般に、物体の長さが1 mmより小さくなると、慣性力と粘性力の比を表すレイノルズ数が1より小さくなり、慣性力よりも粘性力が支配的になる。<sup>33)</sup> 我々が提案・実証したマイクロ可動機構の高速作製法も、この特徴を利用している。図2に、マ

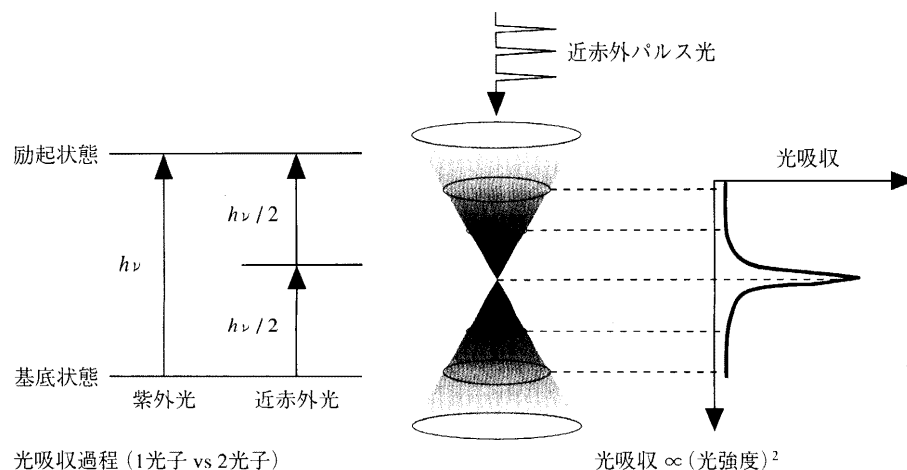


図1 2光子マイクロ光造形法の原理。

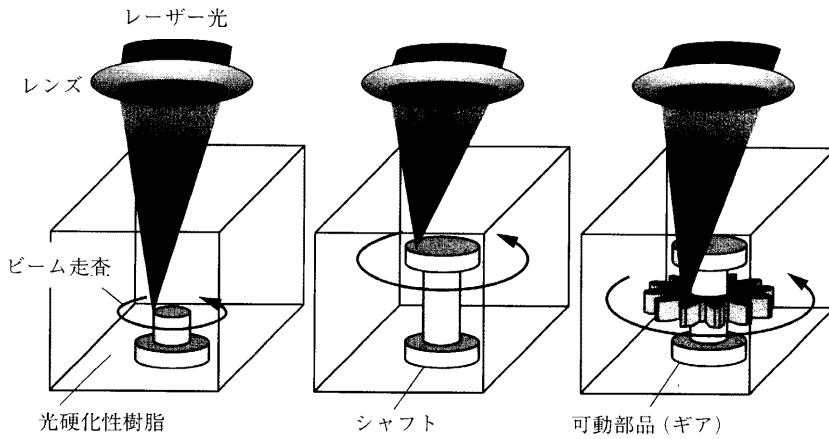


図2 マイクロ可動機構の高速作製法。

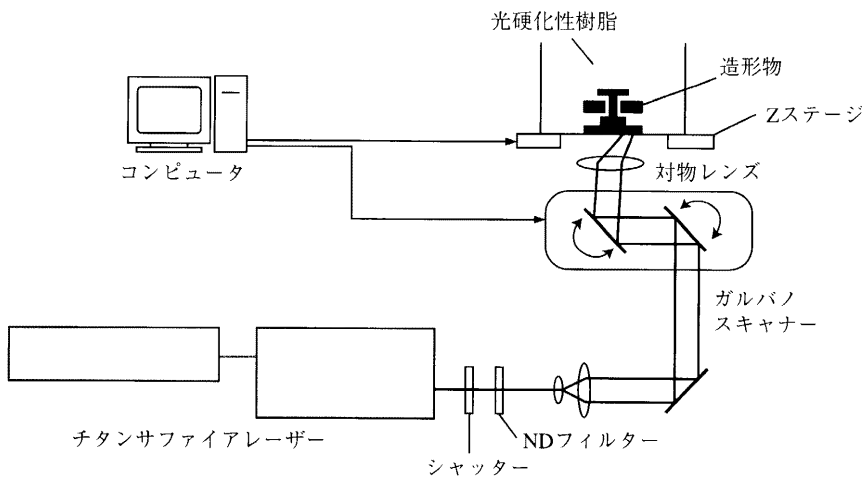


図3 2光子マイクロ光造形装置。

マイクロギアの作製過程を例にして、マイクロ可動機構の作製プロセスを示す。まず、樹脂内部でレーザー光を走査し、可動部を固定するシャフトとストッパー部分を造形したのち、可動部を作製する位置まで焦点面を移動させる。そして、可動部であるギアの形状に沿って、再びレーザー光を走査させれば、シャフトに拘束された可動部品を作製できる。造形中、ギアには支持構造が何も付けられていないが、樹脂の粘性によってギアは安定に浮遊する。

この原理はもともと、我々が1光子吸収を用いた内部硬化型マイクロ光造形法を用いて原理を提案し、その有効性を実証したものである。<sup>34,35)</sup> 従来のマイクロマシン作製技術に比べて、非常に簡便かつ高速に可動部品を作製できるため、欧米でも注目を集めている。

#### 2.4 造形装置

2光子マイクロ光造形システムの例として、我々が開発した造形

装置を図3に示す。<sup>21,23)</sup> 本装置では、光源にTi:sapphireレーザー(中心波長: 763 nm, パルス幅: 80 fs, 繰返し周波数: 82 MHz)を用いている。レーザー光は、コリメータで拡大した後、ガルバノスキャナーを通し、対物レンズ(開口数: 1.3)で樹脂中に集光される。造形時には、3次元CADデータの断面スライスデータに従って、レーザー光を面内走査させ、断面形状を硬化させる。Zステージを等間隔で下げることで、各断面形状を順次硬化させ、立体形状を造形する。樹脂中に形成された構造物は、未硬化樹脂をエタノールなどで除去することによって取り出される。

#### 2.5 マイクロ可動機構の試作

図2に示した作製プロセスを利用して、マイクロタービンを作製している過程を図4に示す。まず、シャフトおよびストッパー部分を0.25 μm間隔で積層させながら造形する。そして、可動部であるタービンを造形する位置に焦点面を移動させ、レーザー光をタービンの形状に沿って走査させて、タービンを造形する。図4より、可動部分は支持構造なしでも安定に浮遊している様子がわかる。

本手法によって作製されたマイクロ可動機構の例を図5に示す。<sup>23)</sup> マイクロタービン(直径: 14 μm)や歯数の違うギアが組み合わされたギア列(各ギアの直径: 8.3 μm, 6.3 μm)が精度良く造形されている。マイクロギア列の造形時間は、わずか6分である。さらに最近では、図6に示すような、サブミクロンのプロップを有するピンセットやニードルも作製されてい

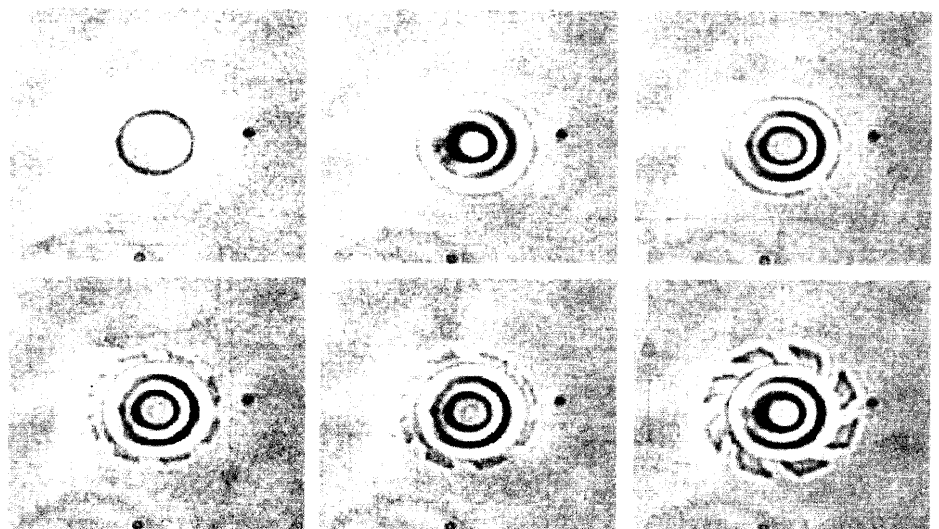
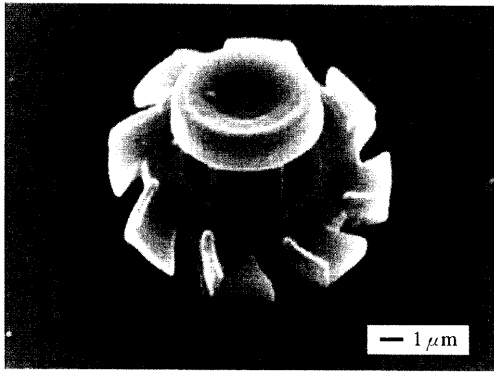
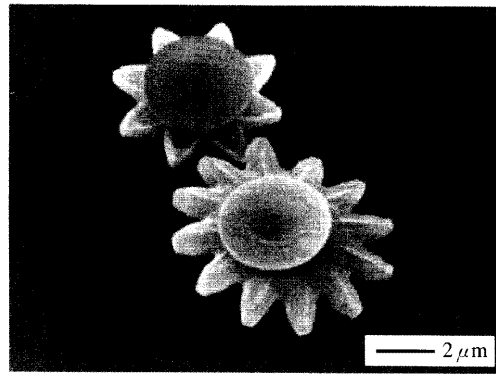


図4 マイクロ可動機構の作製過程。

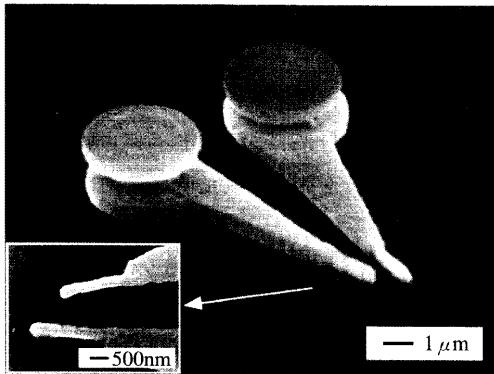


(a)

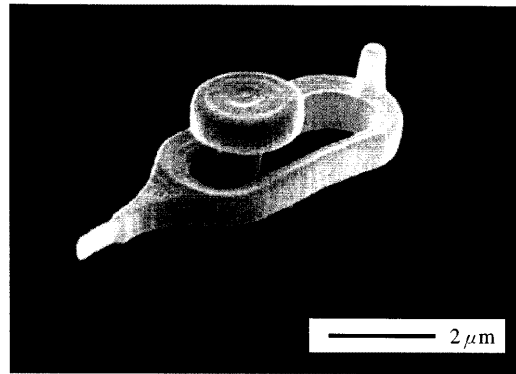


(b)

図5 マイクロ可動機構の試作例. (a) マイクロタービン, (b) マイクロギア列.



(a)

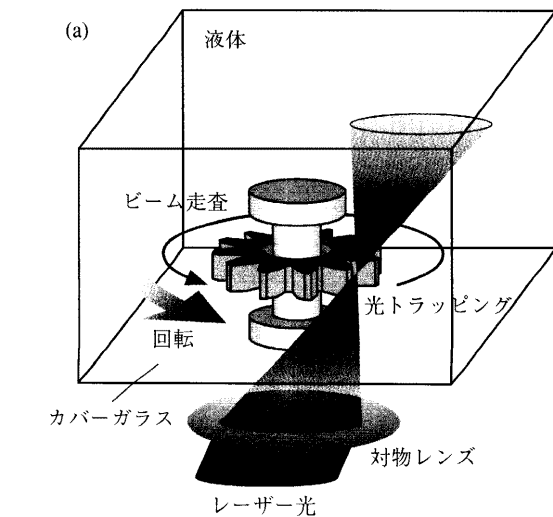


(b)

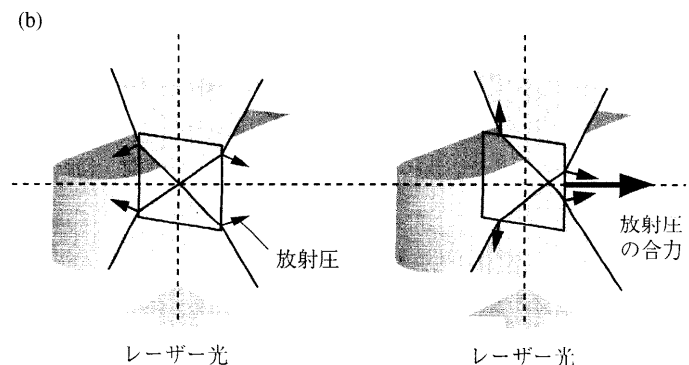
図6 サブミクロン・プローブを有するマニピュレータの試作例. (a) ナノピンセット, (b) ナノニードル.

る.<sup>24)</sup> これらナノマニピュレータのプローブ径は、250 nm である。このように、ギアのような回転対称形状だけでなく、アームのような非対称形状、さらにはサブミクロンの微細プローブも歪むことなく造形できることがわかる。

2光子造形の加工分解能は、光硬化性樹脂の感度や露光条件によって決まるため、今後さらなる樹脂の改良や露光条件の最適化により、100 nm 以下のプローブを有するナノ



(a)



(b)

図7 レーザー走査法によるマイクロマシンの駆動法. (a) マイクロギアの回転, (b) レーザー走査による可動部品の駆動原理.

ピンセットの作製も可能となると考えている。

また、これらのマイクロ可動機構は、光硬化性樹脂が可視光に対して透明であるため、光トラッピング技術によって非接触駆動させることが可能である。以下では、これらマイクロ可動機構をレーザー光で遠隔駆動する手法について述べる。

### 3. 光駆動マイクロマシン

#### 3.1 レーザー走査法によるマイクロマシンの駆動制御

従来の光回転子は、液体中に自由に分散している回転子にレーザー光を集光させて、焦点位置で回転子を回転させる方式であった。

このため、動きが回転運動に限定され、マイクロマシンへの応用には自由度が不足していた。

一方、我々は、2光子マイクロ光造形法によって作製したさまざまな拘束機構を自在に駆動・制御し、回転だけでなく並進や旋回など各種動作を実現する方法を採用した。本手法では、可動部分の一部にレーザー光を集光させて可動部品を捕捉し、レーザー光を走査することにより、その軌跡に沿って可動部品を自在に操る。一例として、図7 (a) に、マイクロギアの回転駆動法の概念図を示す。本手法では、まず、図7 (b) に示すように、可動部であるギアの歯にレーザー光を集光させて、ギアの歯の表面でレーザ

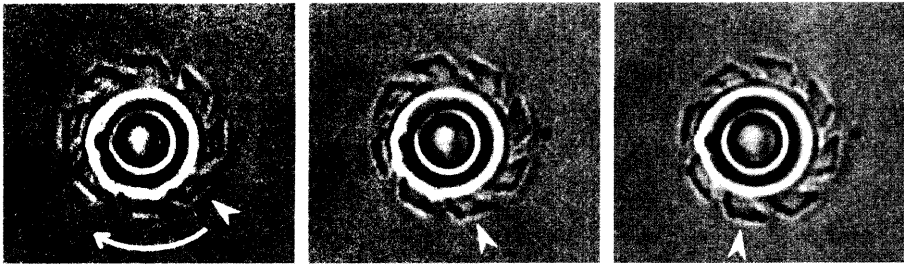


図8 マイクロギアの光回転。

一光が屈折する際に生じる光の放射圧の合力によって、可動部を焦点位置に捕捉する。次に、レーザー光の焦点を少し右側にずらすと、光の放射圧によって可動部は焦点に引き寄せられるように移動する。この操作を連続的に行えば、可動部分はレーザー光の焦点の軌跡に沿って追従するので、可動部分を自在に操作することができる。

このレーザー走査法を用いて、マイクロギアを回転させた様子を図8に示す。光トラッピングによる遠隔操作によって、このタービンは、シャフトに接触することなく、スムーズに回転することが示されている。<sup>23)</sup> 回転速度は、レーザー光の走査速度と一致するが、速度が増すと、液体の粘性力が大きくなるため、最大回転速度はレーザー光の強度に依存する。

図9に、ナノピンセットの開閉駆動の例を示す。ナノピンセットの開閉駆動は、液中でアーム部を光捕捉し、レーザー光を円弧状に走査することにより実現される。この例では、左側アームはあらかじめシャフト部に固定されて造形されており、右側アームのみ光捕捉して、開閉駆動の実証が行われている。<sup>24)</sup>

このようなマニピュレータの駆動では、マニピュレータの発生力を、フェムト・ニュートン (fN) ・オーダーで制御することも可能である。我々は、光捕捉する位置をアームに沿って変化させ、4~15 fN の範囲でアーム先端の発生力を制御できることを実証した。<sup>23)</sup> 浮遊タイプの回転子では、レーザー光の強度を変えな

れば回転数を変化させることができなかったが、マイクロ可動機構を利用すれば、光トラップする位置を変化させるだけで、力制御を実現できる。

### 3.2 マイクロマシンの多自由度駆動

レーザー走査によるマイクロマシンの遠隔駆動の特長は、多様な動作を簡単に実現できる点である。

我々は単一レーザー光によって、より効率的に多自由度の駆動を行うために、可動部分に「光トラップポイント」と呼ぶ微小突起を付加することを提案した。<sup>24)</sup> 図10(a)に、光トラップポイントを利用したナノニードル (図6(b)) の駆動法を示す。本手法では、この突起部にレーザー光を集光し、可動部を操ることで、マイクロマシンを自由に操縦することができる。もしも、光トラップポイントがない場合には、スロット状のアーム部を直接光トラップすること

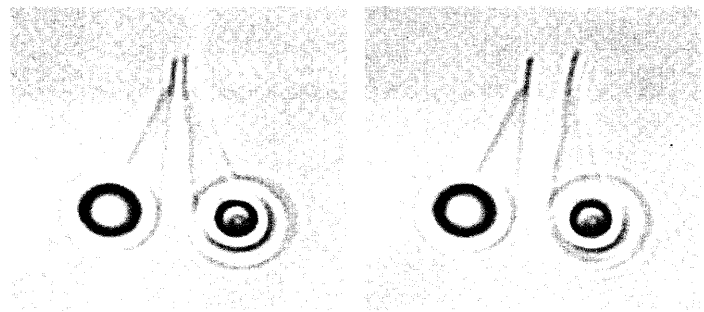


図9 ナノピンセットの開閉駆動。

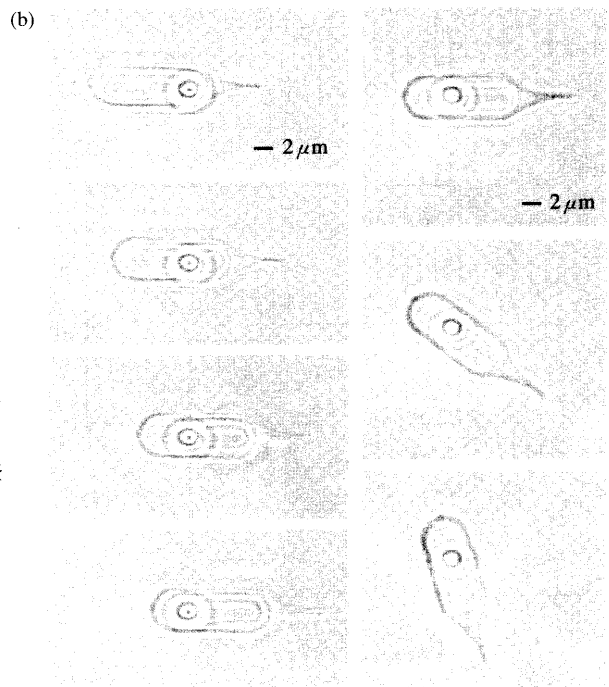
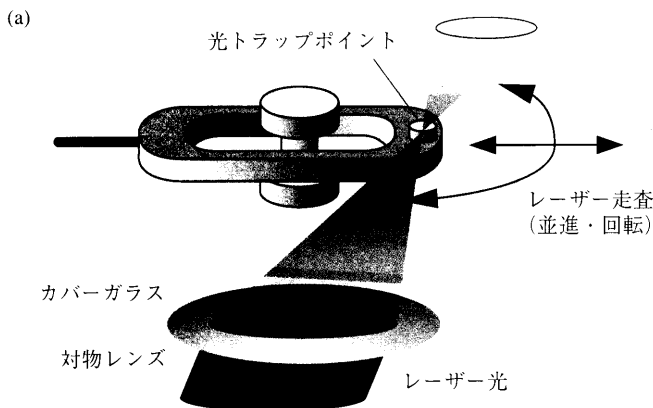


図10 ナノニードルの多自由度駆動。(a) 光トラップポイントを利用した単一レーザー多自由度駆動法。(b) ナノニードルの並進・回転駆動。

になるが、アームの輪郭部分で光トラップ力が最大となるため、運動方向によって、光トラップする部分が異なってしまう、トラップ力の大きさや向きが変化してしまう。一方、微小な円柱形状の光トラップポイントを用いて、光トラップする位置を一定にすれば、運動方向によらず発生力や応答性をほぼ均一にすることができる。よって、スムーズな多自由度駆動が可能になる。

図10(b)は、ナノマニピュレータの並進および回転駆動の様子である。単一のレーザー光によって精度良く駆動が行えていることがわかる。今後、駆動アームとシャフト部のクリアランスを1 $\mu\text{m}$ 以下まで小さくすることで、より高精度な運動制御が可能になると考えている。

このような液中駆動可能なナノマニピュレータは、従来の静電駆動タイプのナノピンセット(例えばカーボンナノチューブ・ナノピンセット<sup>36,37)</sup>などと異なり、原理的に液中作業に適している。また、AFMなどのプローブ顕微鏡が不要であるため、ナノマニピュレーション装置の低コスト化やマニピュレータ部の使い捨て使用などが実現できる。今後、バイオナノテクノロジーに幅広く応用可能なナノマニピュレーション・ツールと考えている。

#### 4. 今後の展望

2光子マイクロ光造形法は、100 nmに迫る加工分解能で、透明ポリマー製の立体構造を高速作製できる技術として、今後ますます注目を集め、広く応用される技術に発展するものと考えている。注目すべき応用展開としては、3次元マイクロ・ナノマシン応用や、フォトニック結晶などの次世代光デバイス応用、さらにはナノインプリントやコンタクトプリンティングなどのナノ転写技術用のナノ金型作製などが挙げられる。

特に、本稿で紹介した光駆動マイクロ・ナノマシンは、従来のバイオ研究用ツールにはない特長があるため、次世代バイオテクノロジーのキーデバイスとして発展するものと期待している。例えば、光による遠隔駆動のため、アクチュエータが不要であり、すべて安価な光硬化性樹脂で形成されている。よって、マイクロ・ナノマシンの使い捨ても可能になると思われる。この特長は、近年盛んに研究されているバイオチップテクノロジーにおいて、バイオハザードへの対応やオーダーメイド医療応用に向けて極めて重要な要素である。つまり、光駆動型のマイクロポンプやバルブなどを使い捨てバイオチップに内蔵させて高機能なディスプレイ・バイオチップを実現できる。すでに、このような光制御バイオチップに関する基礎研究が欧米でも進められている。例えば、バイオ研究者による2光子造形を用いた光駆動部品の作製<sup>38,39)</sup>や、バイオチップ内部に分散させた浮遊タイプの微小構造体を用いた光駆動型マイクロポンプやバルブの開発などが行われている。<sup>40)</sup> 今後、我々は、独自のマイクロ可動機構の作製法を駆使して、各種マイクロ可動部品を内蔵させた光制御型バイオチップを

開発し、マイクロ流体の高精度アクティブ制御や、細胞・DNAなどの生体試料の微細操作が可能なバイオチップを実現したいと考えている。

本研究は、名古屋大学大学院工学研究科マイクロ・ナノシステム工学専攻の生田幸士教授の研究室で行われたものである。ご指導頂いた生田幸士教授ならびに生田研究室の学生諸君に深く感謝いたします。また、本研究は、日本学術振興会・未来開拓推進事業および科学研究費補助金(基盤研究(A)、若手研究(B))の助成を受けて行われたものである。

現在は、横浜国立大学において、科学研究費補助金(若手研究(A)、萌芽研究)および財団法人三豊科学技術振興協会、中谷電子計測技術振興財団、島津科学技術振興財団、メカトロニクス技術高度化財団、財団法人安藤研究所、高橋産業経済研究財団などの助成を受けて、さらなる応用研究に取り組んでいる。

#### 参考文献

- 1) P. Mulser: *J. Opt. Soc. Am. B* **2** (1985) 1814.
- 2) A. Ashkin: *Phys. Rev. Lett.* **24** (1970) 156.
- 3) A. Ashkin, *et al.*: *Opt. Lett.* **11** (1986) 288.
- 4) P. Borowicz, *et al.*: *J. Phys. Chem. B* **102** (1998) 1896.
- 5) S. Juodkazis, *et al.*: *Nature* **408** (2000) 178.
- 6) S. Chu: *Science* **253** (1991) 861.
- 7) A. Ashkin, *et al.*: *Nature* **330** (1987) 769.
- 8) M. S. Z. Kellermayer, *et al.*: *Science* **276** (1997) 1112.
- 9) A. D. Mehta, *et al.*: *Science* **283** (1999) 1689.
- 10) S. Juodkazis, *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **74** (1999) 3627.
- 11) M. E. J. Friese, *et al.*: *Nature* **394** (1998) 348.
- 12) T. Harada, *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **81** (2002) 4850.
- 13) E. Higurashi, *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **64** (1994) 2209.
- 14) R. C. Gauthier: *Appl. Opt.* **40** (2001) 930.
- 15) M. E. J. Friese, *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **78** (2001) 547.
- 16) H. Ukita, *et al.*: *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **8** (2002) 111.
- 17) R. C. Gauthier: *Appl. Phys. Lett.* **67** (1995) 2269.
- 18) R. C. Gauthier: *Appl. Phys. Lett.* **69** (1996) 2015.
- 19) H. Misawa, *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **60** (1992) 310.
- 20) H. Misawa, *et al.*: *Macromolecules* **26** (1993) 282.
- 21) S. Maruo, *et al.*: *Proc. of 10th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers 99)* (1999) p. 1232.
- 22) S. Maruo, *et al.*: *Opt. Lett.* **22** (1997) 132.
- 23) S. Maruo, *et al.*: *J. Microelectromech. Syst.* **12** (2003) 533.
- 24) S. Maruo, *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **82** (2003) 133.
- 25) K. Ikuta, *et al.*: *Proc. of IEEE Int. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 93* (1993) p. 42.
- 26) 河田 聡, 他: *オプトロニクス* **165** (1995) 120.
- 27) S. Kawata, *et al.*: *Nature* **412** (2001) 697.
- 28) H.-B. Sun, *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **74** (1999) 786.
- 29) B. H. Cumpston, *et al.*: *Nature* **398** (1999) 51.
- 30) H.-B. Sun, *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **80** (2002) 3673.
- 31) S. Maruo, *et al.*: *J. Microelectromech. Syst.* **7** (1998) 411.
- 32) M. Tormen, *et al.*: *Microelectronic Engineering* **73-74** (2004) 535.
- 33) 林 輝: *日本機械学会誌* **92** (1989) 1024.
- 34) K. Ikuta, *et al.*: *Proc. of MEMS 98* (1998) p. 290.
- 35) S. Maruo, *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **76** (2000) 2656.
- 36) P. Kim, *et al.*: *Science* **286** (1999) 2148.
- 37) S. Akita, *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **79** (2001) 1691.
- 38) P. Galajda, *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **78** (2001) 249.
- 39) P. Galajda, *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **80** (2002) 4653.
- 40) A. Terray, *et al.*: *Science* **296** (2002) 1841.

### 非会員著者の紹介

丸尾昭二氏：大阪大学工学部応用物理学科卒，名古屋大学工学部助手を経て現在，横浜国立大学工学研究院助教授。専門は，マイクロマシン工学。特に，光工学を基礎とした新しいマイクロマシン技術の開発を進めている。

(2004年7月28日原稿受付)

### Optically-Driven Micro/Nano Machines Produced by Two-Photon Microstereolithography

Shoji Maruo

abstract: Radiation pressure from a tightly focused laser beam can

be used as optical tweezers to confine, position, and transport microparticles. This technique is widely applied in studies on biological cells, DNA molecules, and microchemistry with microdroplets and beads. We intend to apply an optical trapping technique to drive micromachines. The micromachines are produced by two-photon microstereolithography with photocurable resin. Optically-driven microturbine and nanotweezers have been already developed. Such optically-driven micro/nano machines can be widely used in new tools in bio-nanotechnology and biochip technology.

## 日本物理学会誌 第60巻 第4号 (2005年4月号) 予定目次

### 2005世界物理年によせて—世界物理年における広義の教育

活動—……………鈴木康夫

シリーズ「日本の物理学 100年とこれから」

原子核物理学の曙と発展……………土岐 博

原子や分子の物理学—古くて新しいミクロの世界の仲間達—  
……………市川行和

### 解説

Ia型超新星の新しい進化経路……………蜂巢 泉

ガンマ線バースト—現代宇宙物理学での最大の謎—  
……………中村卓史, 山崎 了

### 最近の研究から

ゲージ理論におけるドメインウォールとヒッグス相のソリトン  
……………五十棲洋一, 大橋圭介, 坂井典佑, 新田宗士

ノイズに支配される非平衡パターン形成—IR(111)表面上での  
CO酸化反応—……………早瀬友美乃

液晶性単分子膜の光誘起配向波—非平衡ソフトマターにおける  
時空間構造—……………奥菌 透, 多辺由佳, 横山 浩

シリーズ「物理教育は今」

大学生の力学基礎概念……………塚本浩司, 樋口幸江, 加納 誠

学生による授業評価—改善と説明責任—……………松下佳代

新著紹介

## 『大学の物理教育』誌定期購読のすすめ

『大学の物理教育』は，年3回(3月，7月，11月)発行で年間購読料(個人)は1,000円です。購読ご希望の方は，Fax (03-3432-0997)宛にご連絡下さい。購読料は，会費請求時に一緒(会員のみに)に請求いたします。

『大学の物理教育』編集委員会

## Vol. 11-1 (3月15日発行) 予定目次

### 巻頭言

大学理工教育制度の抜本改革を……………久保謙一

### 2005世界物理年特集

光の速さは一定か?……………霜田光一

光速不変の原理—ローレンツ-ポアンカレ理論とアインシュ  
タイン理論の本質的相違……………安孫子誠也

なぜ自然が理解可能であるのか……………金子 務

原子気体のボーズ・アインシュタイン凝縮—自然現象をどう理解  
するのかという観点から……………久我隆弘

アインシュタインの教育論……………江沢 洋

### 講義室

アドバンス物理学を読んで基礎物理教育を考える……………原 康夫

E×Bドリフト運動についての一考察……………竹内 智

文理融合の物理教育論……………国府田隆夫

### 教育実践

電子教材の作成と利用; 分野が異なると手法も異なるのか?  
……………及川義道

### 教育報告

第129回 American Association of Physics Teachers (AAPT)  
学会に参加して……………石本美智

### 海外の動向

私が学んだ中国における「自然」教育および理科教育  
……………宋 成軍

### 一言

西向く士……………青野 修

### 開催情報

### 編集後記