

光によるマイクロマシンの造形と操作

丸尾 昭二

Micromachines Produced and Manipulated by Light

Shoji MARUO

Recently, two-photon microfabrication has been widely used in many fields such as photonic, biology and lab-on-a-chip because of its unique properties such as submicron resolution and ability of three-dimensional fabrication. By using this technique, we have developed optically-driven micromachines containing rotary mechanisms. Multiple movable microparts can be simultaneously driven by a time-shared optical trapping technique using a single focused laser beam. The synchronized optical trapping allows us to develop optically driven micropumps and manipulators. Evanescent wave was also used for driving microrotors. The evanescent-wave driven micromachines is useful for integrated optically-driven microsystems using optical circuits. In addition, we employed light-induced dielectrophoresis to drive micromachines with a low-power laser beam. The optoelectronic micromachines can provide compact, low-cost optically controlled lab-on-a-chip devices. We have also developed a membrane-assisted transfer molding process to reproduce movable micromachines. This molding technique will make possible the mass-production of optically driven micromachines.

Key words: two-photon microfabrication, optical trapping, micromachine, lab-on-a-chip

最も身近なマイクロマシン（マイクロ電気機械システム [microelectromechanical systems: MEMS] とよばれる）は、スマートフォンに内蔵されている加速度センサーや、プロジェクターに利用されているデジタル・マイクロミラーデバイスなどであろう。これらのマイクロマシンでは、微小な片持ち梁で支えられた構造をたわませて、加速度を検出したり、ミラーの方向を変化させている¹⁾。したがって、マクロな機械システムで多く利用されている歯車などの回転機構は使われていない。その理由のひとつは、ミクロな世界では慣性力よりも摩擦力が支配的となるため、軸受けをもつ回転機構は摩擦によって摩擦するため寿命が短く、実用化が困難だからである。

ところがレーザー光を利用すると、回転機構を使ったマイクロマシンの容易に実現できる。レーザー光を透明な微小物体に集光させると、光の放射圧によって微小物体を焦点に捕まえることができる。この方法は、「光トラッピング（あるいは光ピンセット）」^{2,3)}とよばれており、細胞や微粒子などを遠隔操作する方法として広く活用されてい

る。この光トラッピングによってマイクロマシンを操れば、接触摩擦の影響をほとんど受けることなく、回転、並進運動など多様な動作が可能である。よって、レーザー光を使えば、液体中で遠隔駆動できるマイクロピンセット^{4,5)}やマイクロポンプ⁶⁻⁸⁾などの光駆動マイクロマシンの創製できる。

光で操るマイクロマシンの材質は、レーザー光の吸収がない透明な物質が望ましい。しかし、従来のマイクロマシン作製法ではおもにシリコンなどの半導体材料が使用されており、不透明な材料がほとんどである。そこで筆者らは、光硬化性樹脂を用いて任意の三次元マイクロ構造体を作製することができる「二光子マイクロ光造形法」^{9,10)}を用いている。光硬化性樹脂は紫外光に対して吸収をもつが、可視光や近赤外光など光トラッピングに用いる波長に対しては透明であり、光で操るマイクロマシンの材料に適している。さらに、二光子マイクロ光造形法ではフェムト秒パルスレーザー光を光硬化性樹脂中に集光させて、二光子光重合反応によって焦点近傍の樹脂のみを選択的に硬化

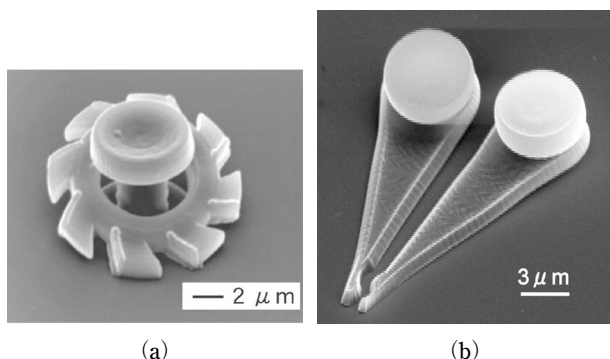


図1 二光子マイクロ光造形によるマイクロマシンの一体造形。(a) マイクロタービン, (b) マイクロピンセット。

させるため、シャフトとギアなどの可動機構を一体造形することができる⁴⁾。したがって、レーザー光を用いれば、光で作って動かすマイクロマシンを構築できる。本稿では、光駆動マイクロマシンの作製方法と、マイクロポンプなどラボオンチップへの応用研究について紹介する。また、マイクロマシンを量産する手法や、光誘起誘電泳動によって駆動する新しいマイクロマシンについても述べる。

1. 二光子マイクロ光造形によるマイクロマシンの作製

二光子マイクロ光造形法は、チタンサファイアレーザー(波長 750~800 nm)などのフェムト秒パルスレーザー光による二光子重合反応の非線形特性によって光の回折限界を超えた約 100 nm の加工線幅を達成でき、任意の三次元マイクロ・ナノ構造を自在に形成できる。このため、フォトニック結晶^{11,12)}、バイオスキャフォールド^{13,14)}、マイクロマシン^{4,5,15)}、ラボオンチップ^{6-8,16)}などさまざまな分野に応用されている。特にマイクロマシンへの応用では、シャフトに拘束された可動部品を、支持構造なしで一体造形できる利点がある⁴⁾。図1に、筆者らが作製したマイクロ可動機構の例を示す。マイクロタービン(直径 14 μm)やマイクロピンセットを、わずか数分で作製することができる。これら可動部品のシャフトと可動部のクリアランスは、約 1 μm 程度まで小さくすることができる。しかし、さらにクリアランスを小さくした場合には、造形時にシャフトと可動部が接着してしまう。このことはマイクロ可動機構の微小化・高精度化の障害となるが、光トラッピングによって軌道を制御するので、クリアランスは 1 μm 程度で十分であることが多い。

2. 光トラッピングによるマイクロマシンの駆動

光ピンセットを用いて微小物体を操作する最も単純な方法は、1本のレーザー光で可動部品を捕捉し、そのレー

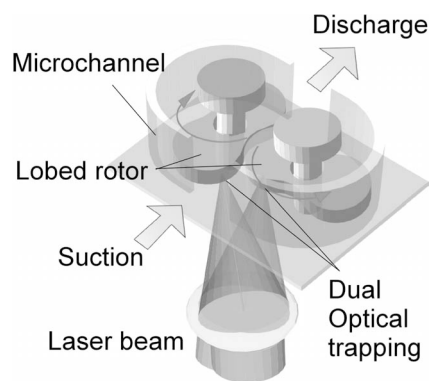


図2 光駆動ローブ型マイクロポンプ。

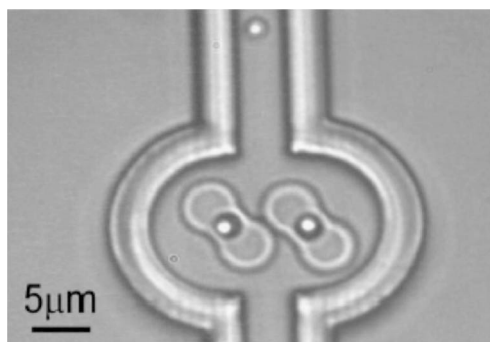


図3 ローブ型マイクロポンプの光駆動。

ザー光を所望の軌跡に走査してマイクロマシンを駆動する方法である。この方法は原理的な新しさはないが、多様な動作を容易に実現できる。また、レーザー光の時間分割高速操作を利用すると仮想的に焦点を複数同時に形成することができるので、複数のマイクロマシンを協調駆動することができる¹⁷⁾。

図2は二光子マイクロ光造形によって作製したローブ型マイクロポンプの概略図である⁶⁾。このポンプでは1本のレーザー光を時間分割して、2つのローターを同時駆動させることで、液体を輸送する。図3にマイクロポンプを駆動している様子を示す。トレーサー微粒子の動きから、毎分 1 pL 以下の超微小流量が達成できていることを確認した。ただし、このポンプではマイクロ流路とローターのクリアランスが 1 μm 程度あり、ローターの直径に対して非常に大きな値となっている。このため、容積変化を利用したポンプではなく、ローターの周囲に働く粘性力が支配的となっていることが実験的にわかった。

そこで筆者らは、ローターに働く粘性力を積極的に活用したマイクロポンプとして、高速回転するスパイラルローターを用いた粘性型マイクロポンプを考案した⁸⁾。図4に、スパイラルローターを用いた粘性型マイクロポンプの概略図を示す。このポンプはU字型流路が採用されてお

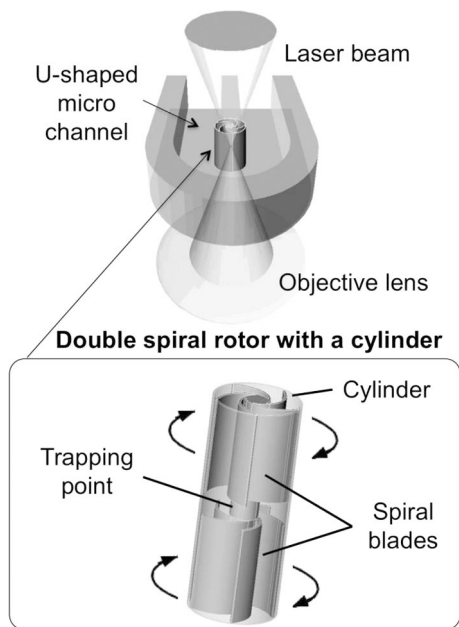


図4 スパイラルローターを用いた粘性型マイクロポンプ.

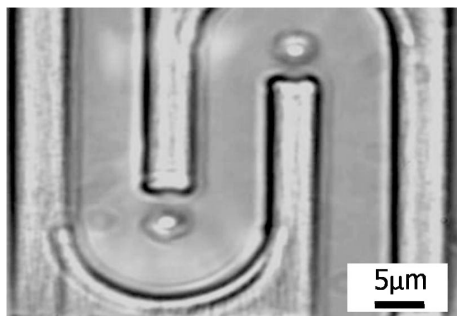


図5 タンデム型マイクロポンプの光駆動.

り、流路の湾曲部にローターが1つ内蔵されている。回転するローターの側面に働く粘性力によって液体を一方に輸送できるように、マイクロ流体解析によって流路幅が最適化されている^{7,8)}。ローターの内部には、光軸方向に2つのらせん状の羽根が作りこまれている。それぞれのらせんの向きは反対回りとなっており、レーザー光を集光させたときに、上部と下部の羽根がそれぞれ同一方向のトルクを発生するように設計されている。このようにらせん状の羽根に光を集光した場合にローターが高速回転する現象は、Galadjaらによって最初に報告されている¹⁸⁾。このスパイラルローターは、彼らの研究をヒントにして、反対向きのらせん羽根を組み合わせると回転効率を向上させたものである。実験では、2つの羽根をもつダブルスパイラルローターは、1つの羽根のシングルスパイラルローターに比べて2倍以上高速に回転することを確認しており、チタンサファイアレーザーからの連続光（波長 752 nm, 出力 50 mW）で 500 rpm 以上の高速回転を実証している⁸⁾。

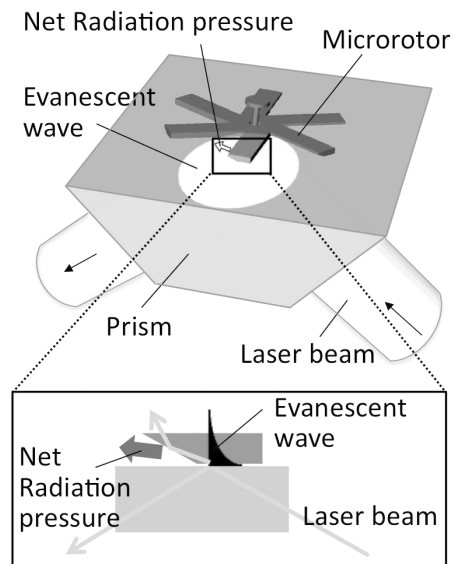


図6 エバネセント波駆動マイクロモーター.

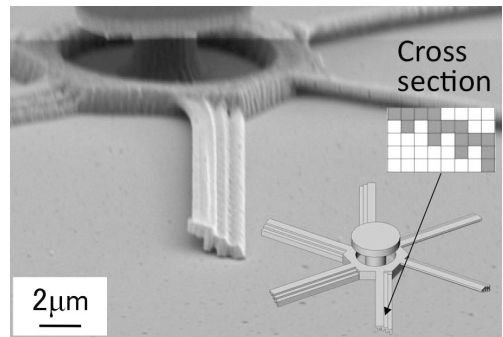


図7 エバネセント波駆動マイクロモーターの試作.

さらに、このスパイラルローターを2つ流路に内蔵させたタンデム型マイクロポンプも試作した⁸⁾。図5はタンデム型マイクロポンプの駆動の様子である。この実験ではローターの回転が高速であるため、時間分割型の光トラッピングでは2つのローターの同時回転が困難であった。そこで、空間光変調素子（浜松ホトニクス, PPM-X8267）を用いて、2つの焦点を同時に形成して、高速回転させた。

集束レーザー光だけでなく、全反射によって生じるエバネセント波を用いても、マイクロマシンを駆動できる。河田らは、エバネセント波によって微粒子を駆動できることを実証した¹⁹⁾。さらに、光導波路から浸み出すエバネセント波を用いた微粒子の運搬にも成功している²⁰⁾。最近、筆者らは、エバネセント波によって駆動可能なマイクロモーターを開発した²¹⁾。図6に、エバネセント波駆動マイクロモーターの概略図を示す。プリズム表面に作製されたローターの羽根に生じる放射圧によって、トルクが与えられる。まず、有限要素法に基づく電磁場解析（COMSOL ver. 3.5 a を使用）によって、羽根断面の形状を変化させなが

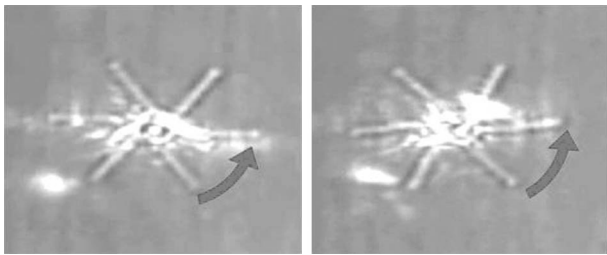


図8 エバネセント波によるマイクロモーターの駆動.

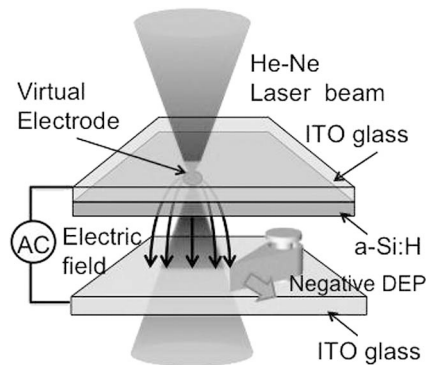


図9 光誘起誘電泳動を利用した光电駆動マイクロマシン.

ら、羽根に生じる放射圧を計算した。その結果、羽根の断面形状を矩形ではなく階段状にすることで、水平方向の放射圧を約5倍増強できることがわかった。図7に、計算モデルで用いた羽根断面形状と、二光子マイクロ光造形によって作製したローター（羽根枚数6枚）の電子顕微鏡写真を示す。このローターは高屈折率ガラス（SF10）製の基板上に造形されており、駆動時にはこのガラス基板を高屈折率プリズムに接着させる。図8に、実際に回転しているエバネセント波駆動マイクロモーターの様子を示す。この実験では、階段状の羽根をもつローターが2.5 rpmで回転した。この回転数は矩形断面の羽根をもつローターの回転数の2.5倍であり、回転速度の向上率が低かった。この原因はいくつか考えられる。まず、解析は二次元解析であるが、実際には複数の羽根に同時にエバネセント波が照射されているために、それらの合力を解析してトルクを比較する必要がある。さらに、回転するローターには粘性抵抗が働くが、形状や速度によって粘性抵抗の大きさが変化するため、流体抵抗も含めた形状の最適化が必要となる。また、計算モデルに忠実な羽根断面を有するローターを高精度に造形する必要もある。今後、どのような形状が最も回転効率が高くなるかを探索し、回転効率の向上をめざしたい。また、エバネセント波だけでなく表面プラズモンによる増強電場を使って回転するローターも興味深い^{22,23)}。

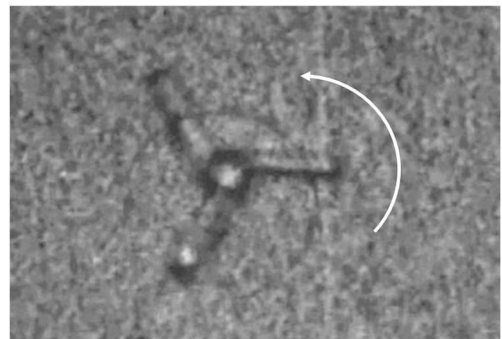


図10 マイクロローターの光电駆動.

3. 光誘起誘電泳動によるマイクロマシンの駆動

光トラッピングによって駆動するマイクロマシンは、液中での遠隔駆動が可能であり、複数のマイクロマシンを集積化した高度な機械システムを高精度に駆動することができるという特徴がある。しかしながら、複数のマイクロマシンを高速駆動するには、出力が1 W以上の高強度レーザーが必要不可欠となる。これに対して、光誘起誘電泳動を利用すれば、1 mW程度の微弱なレーザー光で、微粒子や細胞²⁴⁾、ナノチューブ²⁵⁾などさまざまな微小物体の操作が可能である。そこで筆者らは、光誘起誘電泳動を利用してマイクロマシンを駆動することを試みた²⁶⁾。

図9は、光誘起誘電泳動によって駆動するマイクロマシンの構成図である。ITO基板上にマイクロマシンが造形されており、対向電極となる光導電性基板に、微弱なレーザー光を照射してマイクロマシンを駆動する。このとき、誘電泳動力の作用する方向は、Clausius-Mossotti factor (CM) とよばれる係数の符号で決定され、物体の誘電率が周辺溶媒の誘電率よりも小さい場合には、この係数が負となるため、誘電泳動力は斥力となる²⁷⁾。光硬化性樹脂からなるマイクロマシンを純水中に配置した場合には、誘電泳動力が斥力となるため、光トラッピングによる駆動と異なり、焦点から遠ざかる方向に可動部品が移動する。

図10は、筆者らが試作したマイクロローター（直径60 μm ）の駆動の様子である。このとき使用したレーザーはHe-Neレーザー（出力0.1 mW）であり、電極間に印加した交流電圧は5 Vrms, 10 kHzであった。このように、光トラッピングに比べて3桁以上小さいレーザー光でも、マイクロマシンを遠隔駆動させることができた。また、誘電泳動力の大きさは、対象物体が微粒子の場合、その半径の3乗に比例し、nNオーダーであるため、比較的大きなマイクロマシンを駆動することができる。実際、筆者らは、直径が150 μm のローターの回転駆動も実証している。したがって、光誘起誘電泳動を利用すれば、低出力レーザー

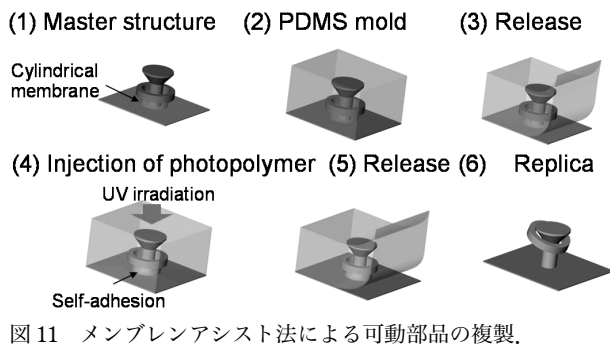
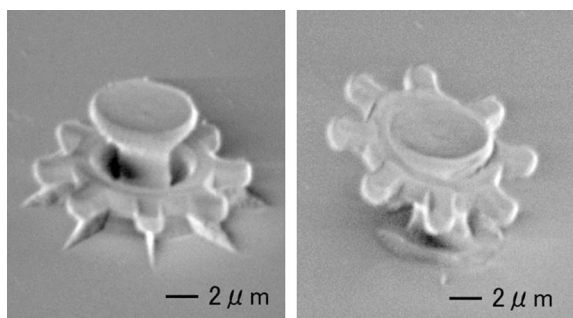
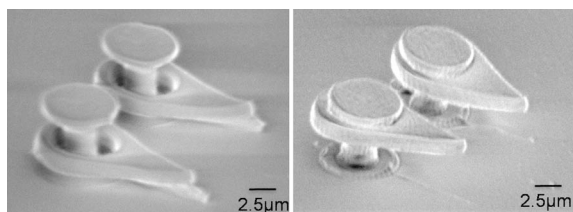


図 13 複製したマイクロピンセットの光駆動.



(a)



(b)

図 12 複製されたマイクロマシン. (a) マイクロギアの母型 (左) とレプリカ (右), (b) マイクロピンセットの母型 (左) とレプリカ (右).

で駆動が可能な、コンパクトかつ廉価なマイクロマシンを提供できる可能性がある。

4. マイクロマシンの複製技術

これまで筆者らがマイクロマシンの作製に用いてきた二光子マイクロ光造形法は、100 nm の加工線幅で三次元マイクロ構造体を自在形成できるすぐれた技術である。しかしながら、レーザー走査による直接描画であるため、生産性が低いという課題がある。そこで、二光子マイクロ光造形法によって母型を作製し、シリコン樹脂型でマイクロマシンを複製する技術を開発した²⁸⁾。この方法は、Fourkasらによって提案されたメンブレンアシスト法²⁹⁾を発展させた手法である。

図 11 に、マイクロリングの複製工程を例にした可動部品の複製プロセスを示す。まず、可動部を支える薄膜支持

構造が付与された母型を造形する。この薄膜は可動部がシリコン樹脂に包含されることを防ぐ役割があり、硬化後のシリコン樹脂型には可動部の底面で切れ目ができ、母型から剥離できる。この切れ目が入ったシリコン樹脂型をたわませて、空洞部に光硬化性樹脂を注入し、紫外ランプで硬化させる。そして、シリコン樹脂型を剥離することで、可動部品を複製することができる。この方法を用いて複製したマイクロギアとピンセットの例を図 12 に示す。近接した 2 本のアームや歯車が複製できており、シリコン樹脂型による簡便な複製方法が実証できた。さらに、複製したピンセットの光トラッピングによる協調駆動も実証している (図 13)。今後、このようなマイクロ可動部品の複製技術を活用すれば、マイクロマシンを内蔵した高性能なラボオンチップなどを量産できる可能性がある。

二光子マイクロ光造形法を用いて、マイクロ可動機構をもつさまざまなマイクロマシンを作製した。これらのマイクロマシンをレーザー光で駆動させることで、液体中での非接触・低摩擦駆動を実現し、光駆動マイクロポンプやピンセットなどを開発した。さらに、集束レーザー光を用いた光トラッピングだけでなく、エバネセント波によるマイクロマシンの駆動も実証し、新たな高集積化マイクロマシンの可能性を示した。また、従来の光トラッピングに比べて 3 桁以上小さいレーザー出力で駆動が可能な光電駆動マイクロマシンを開発した。これら光駆動および光電駆動マイクロマシンは液体中での遠隔駆動に適しており、高性能なラボオンチップや、細胞の微細操作ツールなどへの応用が期待される。また、独自のメンブレンアシスト法によるマイクロマシンの複製技術を開発し、マイクロマシンの量産手法を提案・実証した。今後、光操作技術のさらなる改良、オンチップ光源や光ファイバーによる集積化、さらにはマイクロマシンの形状最適化を駆使することにより、高度で高効率な光駆動マイクロマシンの開発が期待される。

文 献

- 1) 藤田博之: マイクロ・ナノマシン技術入門 (工業調査会, 2003).
- 2) 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.
- 3) D. G. Grier: "A revolution in optical manipulation," *Nature*, **424** (2003) 810-816.
- 4) S. Maruo, K. Ikuta and H. Korogi: "Force-controllable, optically driven micromachines fabricated by single-step two-photon microstereolithography," *J. Microelectromech. Syst.*, **12** (2003) 533-539.
- 5) S. Maruo, K. Ikuta and H. Korogi: "Submicron manipulation tools driven by light in a liquid," *Appl. Phys. Lett.*, **82** (2003) 133-135.
- 6) S. Maruo and H. Inoue: "Optically driven micropump produced by three-dimensional two-photon microfabrication," *Appl. Phys. Lett.*, **89** (2006) 144101.
- 7) S. Maruo and H. Inoue: "Optically driven viscous micropump using a rotating microdisk," *Appl. Phys. Lett.*, **91** (2007) 084101.
- 8) S. Maruo, A. Takaura and Y. Saito: "Optically driven micropump with a twin spiral microrotor," *Opt. Express*, **17** (2009) 18525-18532.
- 9) S. Maruo, O. Nakamura and S. Kawata: "Three-dimensional microfabrication with two-photon absorbed photopolymerization," *Opt. Lett.*, **22** (1997) 132-134.
- 10) S. Kawata, H.-B. Sun, T. Tanaka and K. Takada: "Finer features for functional microdevices," *Nature*, **412** (2001) 697-698.
- 11) B. H. Cumpston, S. P. Ananthavel, S. Barlow, D. L. Dyer, J. E. Ehrlich, L. L. Erskine, A. A. Heikal, S. M. Kuebler, I. Y. S. Lee, D. McCord-Maughon, J. Q. Qin, H. Rockel, M. Rumi, X. L. Wu, S. R. Marder and J. W. Perry: "Two-photon polymerization initiators for three-dimensional optical data storage and microfabrication," *Nature*, **398** (1999) 51-54.
- 12) K. K. Seet, V. Mizeikis, S. Juodkakis and H. Misawa: "Three-dimensional horizontal circular spiral photonic crystals with stop gaps below 1 μm ," *Appl. Phys. Lett.*, **88** (2006) 221101.
- 13) A. Ovsianikov, S. Schlie, A. Ngezhahayo, A. Haverich and B. N. Chichkov: "Two-photon polymerization technique for microfabrication of CAD-designed 3D scaffolds from commercially available photosensitive materials," *J. Tissue Eng. Regen. Med.*, **1** (2007) 443-449.
- 14) R. Schade, T. Weiss, A. Berg, M. Schnabelrauch and K. Liefeth: "Two-photon techniques in tissue engineering," *Int. J. Artif. Organs*, **33** (2010) 219-227.
- 15) Y. Tian, Y.-L. Zhang, J.-F. Ku, Yan He, B.-B. Xu, Q.-D. Chen, H. Xia and H.-B. Sun: "High performance magnetically controllable microturbines," *Lab Chip*, **10** (2010) 2902-2905.
- 16) G. Kumi, C. O. Yanez, K. D. Belfield and J. T. Fourkas: "High-speed multiphoton absorption polymerization: Fabrication of microfluidic channels with arbitrary cross-sections and high aspect ratios," *Lab Chip*, **10** (2010) 1057-1060.
- 17) S. Maruo: "Optically driven micromachines for biochip application," *Nano- and Micromaterials Series: Advances in Materials Research, Vol. 9*, eds. K. Ohno, M. Tanaka, J. Takeda, Y. Kawazoe (Springer, 2008) pp. 291-309.
- 18) P. Galajda and P. Ormos: "Rotors produced and driven in laser tweezers with reversed direction of rotation," *Appl. Phys. Lett.*, **80** (2002) 4653-4655.
- 19) S. Kawata and T. Sugiura: "Movement of micrometer-sized particles in the evanescent field of a laser beam," *Opt. Lett.*, **17** (1992) 772-774.
- 20) S. Kawata and T. Tani: "Optically driven Mie particles in an evanescent field along a channeled waveguide," *Opt. Lett.*, **21** (1996) 1768-1770.
- 21) S. Murakami, M. Ikegame, K. Okamori and S. Maruo: "Evanescent-wave-driven microrotors produced by two-photon microfabrication," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **50** (2011) 06GM16.
- 22) G. Volpe, R. Quidant, G. Badenes and D. Petrov: "Surface plasmon radiation forces," *Phys. Rev. Lett.*, **96** (2006) 238101.
- 23) M. Liu, T. Zentgraf, Y. Liu, G. Bartal and X. Zhang: "Light-driven nanoscale plasmonic motors," *Nat. Nanotechnol.*, **5** (2010) 570-573.
- 24) P. Y. Chiou, A. T. Ohta and M. C. Wu: "Massively parallel manipulation of single cells and microparticles using optical images," *Nature*, **436** (2005) 370-372.
- 25) A. Jamshidi, P. J. Pauzauskie, P. J. Schuck, A. T. Ohta, P.-Y. Chiou, J. Chou, P. Yang and M. C. Wu: "Dynamic manipulation and separation of individual semiconducting and metallic nanowires," *Nat. Photonics*, **2** (2008) 86-89.
- 26) S. Maruo and N. Yoshimura: "Polymeric micromachines driven by laser-induced negative dielectrophoresis," *Proc. IEEE Int. Symp. on Micro-NanoMechatronics and Human Science* (2011) pp. 327-332.
- 27) J. K. Valley, A. Jamshidi, A. T. Ohta, H.-Y. Hsu and M. C. Wu: "Operational regimes and physics present in optoelectronic tweezers," *J. Microelectromech. Syst.*, **17** (2008) 342-350.
- 28) S. Maruo, T. Hasegawa and N. Yoshimura: "Replication of three-dimensional rotary micromechanism by membrane-assisted transfer molding," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **48** (2009) 06FH05.
- 29) C. N. LaFratta, L. J. Li and J. T. Fourkas: "Soft-lithographic replication of 3D microstructures with closed loops," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **103** (2006) 8589-8594.

(2011年9月20日受理)