

報告日 2011 年（平成 23 年）7 月 12 日

報告者 横浜国立大学 理工学部 准教授

丸尾 昭二

1. 研究概要

(和文)

(1)課題名（日本語）

空圧・光圧ハイブリッド駆動型マイクロ流体制御素子の開発

(2)研究者氏名

丸尾 昭二 横浜国立大学 工学部 准教授

(3)研究概要（日本文）

本研究では、マイクロ光造形法を用いて、光の放射圧によって駆動するマイクロポンプおよび空気圧力によって駆動するマイクロポンプを開発した。レーザー光を集光させるだけで光圧力によって高速回転するスパイラルローターを提案し、このローターを用いた粘性型マイクロポンプを試作した。駆動実験から毎分 1 pL 以下の超微量液体輸送を実証した。また、空気圧によって変形する円筒型チャンバーを直列配置した蠕動型マイクロポンプを提案・試作した。このポンプは、高圧力を必要とするラボオンチップに有用である。

(4)キーワード

マイクロ流体制御素子、マイクロ光造形、光圧力、空圧

(英文)

(1) Research title

Development of hybrid-type microfluidic devices driven by optical force and air pressure

(2) Name of researcher with title of position

Shoji Maruo, Associate Professor, Yokohama National University

(3) Summary

Micropumps driven by optical radiation pressure and air pressure were developed by microstereolithography. We proposed an optically driven viscous micropump using a spiral microrotor. It was demonstrated that the micropump provides ultra-low flow rate on the order of 1 pL/min. In addition, an air-pressure driven peristaltic micropump using cylindrical deformable microchambers were developed. The micropump is useful for lab-on-a-chip devices that need high pressure processes.

(4) Key Words

Microfluidic devices, Microstereolithography, Optical force, Air pressure

2. 本研究の意義・特色

近年、数 cm サイズの微小なマイクロ流体回路を用いて細胞分析や化学・生化学実験などを行う「ラボオンチップ」に関する研究開発が盛んに行われている。このような微小な流体回路を用いて精密かつ高度な流体制御を行うには、マイクロポンプやマイクロバルブなどのマイクロ流体制御素子が不可欠となる。しかしながら、現状技術では、実用に堪えうる流体制御の精度や再現性、耐久性、耐圧力などが不足している。このため、流体回路チップは微小であるが、流体制御素子としてはシリンジポンプなどの外部接続ポンプが利用されており、チップとポンプの接続の煩雑さや気泡の混入、液漏れなど課題が多い。

本研究では、ラボオンチップに利用可能な 2 種類のマイクロポンプを開発する。1 つは、レーザー光によって駆動する粘性型マイクロポンプである。これは、毎分数 10pL 程度の超微量液体輸送を実現できる。もう 1 つは、空気圧を利用した蠕動型マイクロポンプである。このポンプは、空気圧による高い圧力が得られるため、細胞の濃縮や粘性の高い液体の取り扱いが必要なラボオンチップに有用である。

3. 実施した研究の具体的内容、結果（本文）

本研究では、まず、光の放射圧と呼ばれる力を利用して遠隔操作が可能な光駆動マイクロポンプを開発した。光の放射圧は、光の運動量変化によって生じる力である。例えば、溶液中でレーザー光を微小物体（微小物体の屈折率は溶液の屈折率よりも大きい）に集光すると、微小物体の表面で光が反射あるいは屈折することによって、光の運動量が変わり、その結果、微小物体が、焦点に捕捉される。この原理を利用することによって微小物体を溶液中で遠隔操作することができる。この技術は、光ピンセットと呼ばれており、細胞や微粒子などの操作技術として広く利用されている。我々は、この光ピンセットの技術を利用して、微小なローターを回転させて液体を輸送するマイクロポンプを開発してきた。例えば、2 つのローブ型ローターをかみ合い駆動させて容積変化を引き起こすローブ型マイクロポンプ（Appl. Phys. Lett. 89, 144101 (2006)）や、1 つの円盤状ディスクを U 字型マイクロ流路内で回転させて、円盤に作用する粘性力によって液体を輸送する粘性型マイクロポンプなどを試作してきた（Appl. Phys. Lett. 91, 084101 (2007)）。

本研究では、粘性力を活用したシングルディスクマイクロポンプの発展系として、光を集光するだけで高速回転するスパイラルマイクロローターを考案し、この高速回転するローターを用いた粘性型マイクロポンプを開発した。図 1 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構成図を示す。スパイラルローターは、右巻きと左巻きの螺旋状羽根をもつローターが光軸方向に連結された形状をしている。このローターにレーザー光を集光させると、放射圧によって焦点に捕捉されると同時に、螺旋状羽根部に生じる放射圧によって、ローターが一方向に回転する。このような螺旋状ローターの

光回転現象は P. Galajda らによって最初に報告された (Appl. Phys. Lett. 78, 249 (2001))。我々は、彼らの実験をヒントにして、右巻き・左巻きの螺旋状羽根を 2 つ連結したスパイラルローターを考案した。このローターでは、上下の螺旋状羽根部の作用するトルクの方が一致するため、1 つの螺旋状羽根よりも回転力が増強される。

実際に、独自に開発した 2 光子マイクロ光造形法を用いて、螺旋状羽根が 1 つのローターと、2 つの羽根を試作し、それぞれのローターの回転数を比較した。その結果、2 つの羽根をもつローターでは 4 倍以上の回転数が得られた。最大回転数は、レーザー出力が 500mW のときに、560rpm であった。

さらに、スパイラルローターを内蔵したマイクロポンプを試作した。図 2 は、スパイラルローターの電子顕微鏡写真とマイクロポンプの試作例である。この駆動実験では、光源として Ti:sapphire レーザーの連続光 (波長: 754nm) を用いた。ローター (直径: 4 μ m) を 300rpm で回転させて、流体の輸送を実証した。このとき、ポンプの流量は、約 18pL/分であった。このように、レーザー照射のみで高速回転するローターを利用した流体輸送機構は、光源一体型マイクロポンプに応用できる。

さらに、2 つのスパイラルローターを内蔵したタンデムポンプ (図 3) を試作した。この実験では、2 つのローターを同時に回転させるために、空間光変調素子を用いて、レーザー光の位相を制御し、焦点面において 2 つのレーザースポットを形成した。この 2 つの焦点を用いることで、数 100rpm の高速回転をする 2 つのローターを安定して捕捉し、回転させることができた。このようなタンデムポンプは、細胞や細菌などの生体試料をマイクロ流路内で搬送するセルソーターに応用できる。

光駆動マイクロポンプに加えて、高い圧力と大流量に対応するために空気圧によって駆動するマイクロポンプを開発した。これまでに開発されてきた空気圧式のマイクロポンプのほとんどは、ダイヤフラム型ポンプであり、その構造は 2 次元的な平面構造であった。このため、ダイヤフラムを十分に変形させるために、流路幅に比べてポンプチャンバーの体積が非常に大きくする必要があり、デッドボリュームが多く、小型化・高集積化に限界があった。

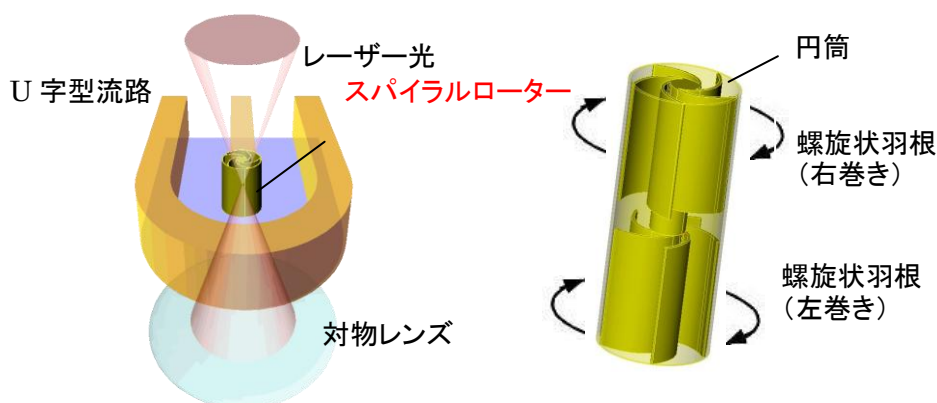


図 1 光駆動スパイラルローターを用いたマイクロ粘性ポンプ

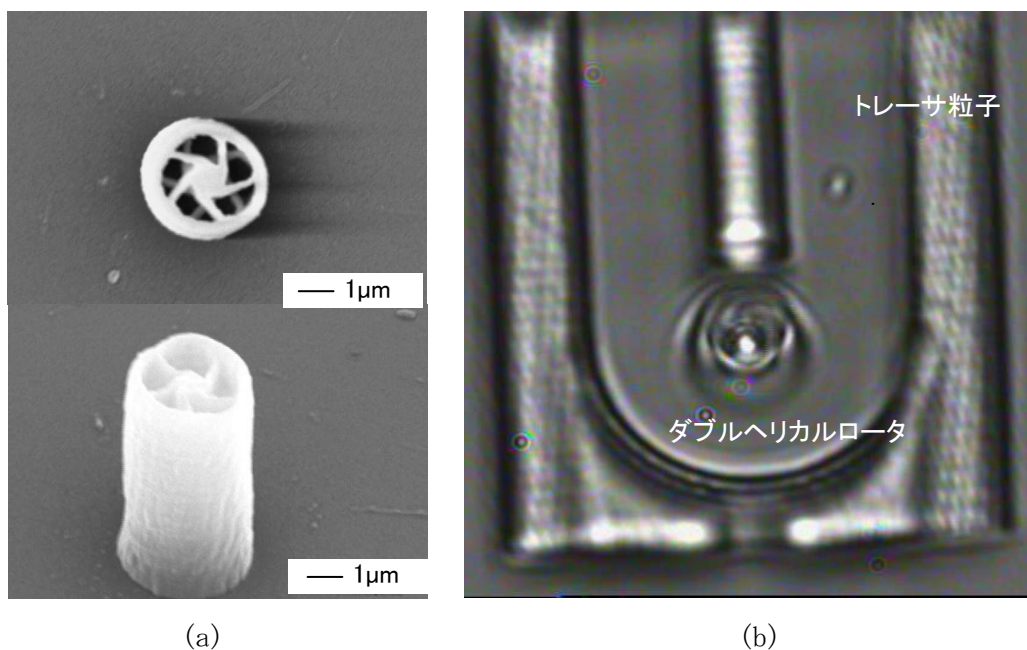


図2 スパイラルローターを用いたマイクロ粘性ポンプの試作と駆動実証
(a) スパイラルローターの電子顕微鏡写真 (b) マイクロポンプの駆動実験

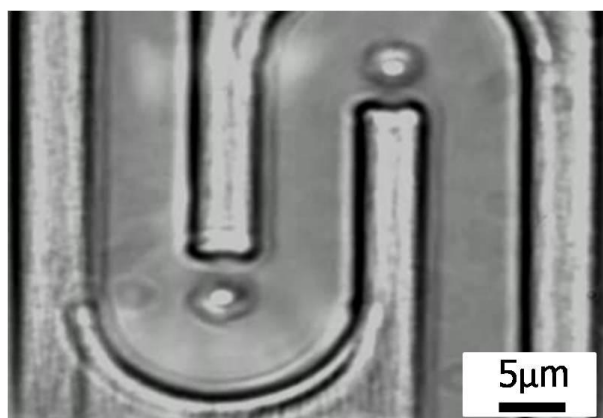


図3 タンデムマイクロポンプの駆動実験

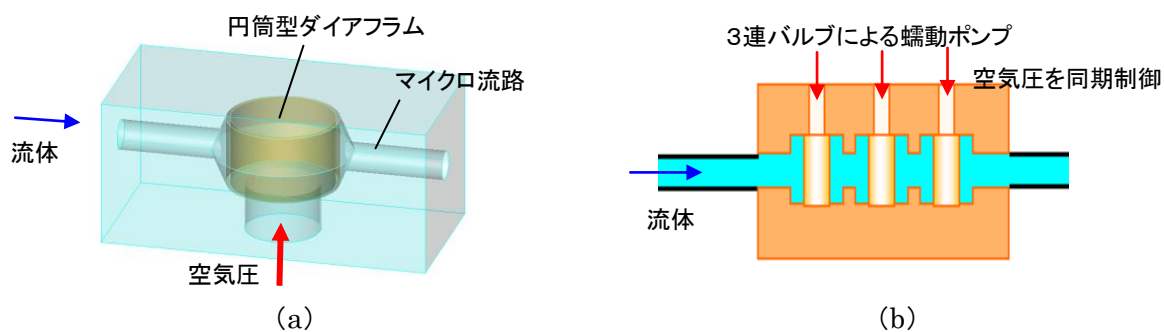


図4 円筒型ダイアフラムを用いた空圧駆動流体制御素子の概念図
(a) マイクロバルブ (b) マイクロ蠕動ポンプ

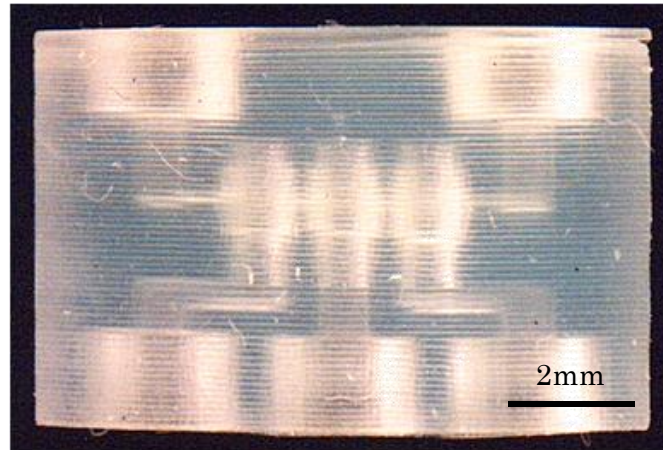


図5 空気圧駆動型マイクロ蠕動ポンプの試作

そこで我々は、複数の円筒型薄膜を流路内部に内蔵させて、この円筒薄膜を空圧によって加圧することにより変形させて、入口と出口流路の双方を塞ぐことで、液体を輸送する蠕動マイクロポンプを考案した。図4に、円筒薄膜を用いたマイクロ蠕動ポンプの構成図を示す。この円筒型マイクロ蠕動ポンプでは、流路幅と同等サイズの円筒を内蔵させることで、デッドボリュームを大幅に低減できる。このため小型化・高集積化にも適している。また、直径が異なる円筒薄膜をタンデムに配置することで、 $\text{nL/min} \sim \mu\text{L/min}$ の幅広い流量範囲をカバーするマイクロポンプを実現できる。図5に、試作したマイクロ蠕動ポンプの写真を示す。この試作ポンプのチャンバー外径は 1.3mm であり、各チャンバーの容積は約 $0.45\mu\text{L}$ である。基礎実験では、このポンプを用いて、水、空気をともに輸送することに成功し、自己吸引可能なポンプの作製に成功した。また、付加圧力として 15kPa まで一定流量で輸送できることを確認し、最大 55kPa まで負荷をかけたときに、 $10\mu\text{L/min}$ の流量を確認できた。

4. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

丸尾昭二・横浜国立大学・准教授

5. 研究実施時期

2008年(平成20年) 1月 1日から 2009年(平成21年)12月31日

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

S. Maruo, A. Takaura, and Y. Saito, “Optically driven micropump with a twin spiral microrotor,” *Optics Express* **17**, Iss. 21, 18525–18532 (2009).

7. 内外における関連研究の状況

レーザー光によって駆動するマイクロ流体デバイスの開発は、世界でも類を見ない独創的な研究であるが、遠隔駆動型のマイクロポンプとしては、磁気駆動型のマイクロポンプが開発されている。この方式では、永久磁石や電磁石によってマイクロポンプを駆動できるため、駆動装置が廉価となり、さまざまな分野でマイクロポンプが活用されることが期待できる。しかしながら、磁場の干渉によって、複数のポンプやバルブを近接させて集積化させることが困難である。よって、光駆動マイクロポンプは、より微小な流体制御素子を高密度に集積化させる場合に、非常に有用なデバイスとなる。

8. 今後の発展に対する希望

今後、光駆動型と空気圧駆動型の双方を集積化した、ハイブリッド型マイクロ流体制御素子を構築したい。これによって、濃縮した細胞などを含む高濃度溶液など輸送に高い圧力が必要な場合には、空気圧型マイクロポンプを利用し、一方、微量な試薬などを高精度に注入する場合には、光駆動型マイクロポンプを活用するというように、用途に応じて各種マイクロポンプを駆使して、高度な分析や合成反応をラボオンチップで実現したい。