

磁性体球の運動を利用したマイクロ/ミニポンプ に関する実験的研究

熊丸 博滋、野村 繕央、阪田 風馬、伊藤 和宏、下権谷祐児
機械系工学専攻

Experimental Study on Micro/Minipump using Motion of Magnetic Material Balls

Hiroshige KUMAMARU, Yoshio NOMURA, Fuhma SAKATA,
Kazuhiro ITOH and Yuji SHIMOGONYA
Department of Mechanical and System Engineering

Abstract

Two micro/minipumps are studied experimentally in this research, i.e. a pump where magnetic balls and non-magnetic balls being in a line alternatively rotate in a closed-loop pumping channel and a pump where magnetic balls move back and force in the straight pumping channel. These micro/minipumps can be incorporated into microfluidic devices (chips) and can pump arbitrary kind of liquid. For the former micro/minipump (the rotational-motion pump), the maximum flow rate obtained and the maximum pump head achieved in experiments are approximately 2000 $\mu\text{l}/\text{min}$ and 150 Pa, respectively. It is expected to increase the maximum pump head by improving the adherence method of two plates forming the pump. For the latter micro/minipump (the reciprocating-motion pump), the maximum flow rate obtained and the maximum pump head achieved in experiments are approximately 800 $\mu\text{l}/\text{min}$ and 4000 Pa, respectively. It is expected to miniaturize further the pump by decreasing the cross-section of pumping channel.

Key Words: micropump, rotational motion, reciprocating-motion, magnetic material

1. 序言

近年、化学分析・合成から医療・バイオにわたる広範な分野への応用を目的として、多くのマイクロ流体デバイス（チップ）の開発が行われてきている。これらのマイクロ流体デバイスへ送液する、あるいはマイクロ流体デバイスにおいて送液するマイクロ/ミニポンプに関しても、多くの研究者が種々の原理・方法に基づくものについて研究を行ってきている[1]。これらの中でも、チェックバルブ式ダイヤフラムポンプおよび電気浸透流ポンプはある程度実用段階にある。しかし、これらのマイクロ/ミニポンプについてもまだ問題点が残されている。例えば、前者については、比較的サイズが大きくマイクロ流体デバイスへ搭載（と一体化）が困難であること、可動部を有するチェックバルブの耐久性の問題があることなどである。また、後者については、流体が電解質溶液に限られること、電解質溶液が発泡することなどである。

このため、マイクロ流体デバイスに搭載（と一体化）でき、任意の液体を送ることができることを意図して、磁性流体あるいは磁性体球の回転運動を利用したマイクロポンプがいくつか提案されている。Hatchらは磁性流体を環状流路内で外部磁石により回転させ水などを送液するマイクロポンプを提案した[2]。しかし、磁性流体によるポンプ流路の汚染、あるいは磁性流体のポンプ外への流出が生じるという問題が発生している。Kimらはシリコン膜で仕切られた上下2つの環状流路を設け、下側の環状流路内で外部磁石により磁性流体を回転させてシリコン膜を変形させ、上側の環状流路内の水などを送液するマイクロポンプを提案した[3]。しかし、ポンプヘッドは報告されておらず原理上からはほぼ0と推定される。Duらは磁性流体の入った環状流路はなく、外部において鋼球を外部磁石でシリコン膜に沿って回転させる方式を提案している[4]。しかし、原理上からシリコン膜の耐久性が問題となってくる。これらの文献についてはより詳細に前報[5]で紹介している。

これらの磁性流体あるいは磁性体球を用いたマイクロポンプの問題点の現状から、本研究では問題点のほぼ存在しないマイクロポンプを開発する可能性を高めるため、2つの方式のマイクロ/ミニポンプを提案し実験を行った。まず、Hatchらの磁性流体回転式マイクロポンプと同じ原理に基づくものの、彼らのポンプの問題点を解決するために、磁性流体を磁性体球に置き換えた磁性体球回転式マイクロ/ミニポンプに関する実験を行った。つぎに、報告者らが別途独自に考案した、磁性体球の往復運動と受動的に作動する逆止弁を組合せた、磁性体球往復式マイクロ/ミニポンプに関する実験も行った。

2. 磁性体球回転式マイクロ/ミニポンプ

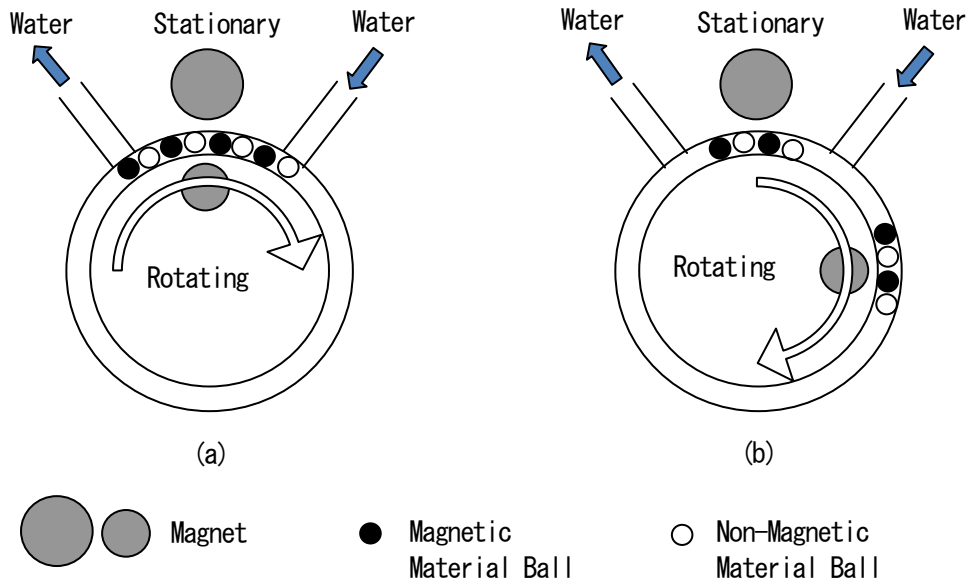


Fig. 1 Principle of Rotational-Motion Micro/Minipump

2.1 原理および実験

Fig. 1 に磁性体球回転式マイクロ/ミニポンプの送液原理を示す。Fig. 1(a) に示すように、ポンプ流路ループの中に磁性体球4個と非磁性体球4個を交互に並べて入れる。最初、磁性体球等は入口～出口間の短い方の区間にあり、入口および出口とも塞いでいる。磁性体球等はピストンおよびバルブの両方の役割をする。Fig. 1(b) に示すように、磁性体球等の一部分（ピストン部）は外部の回転磁石に引かれて回転する。磁性体球等の残り部分（バルブ部）は外部の固定磁石に引付けられて、固定磁石の位置に留まる。ピストン部は回転することにより、液体（水など）を入口から引込むとともに、液体を出口から押出す。ピストン部はほぼ1回転するとバルブ部と合体して、Fig. 1(a) に示す最初の状態に戻る。これを繰り返すことにより送液を行う。バルブ部は逆止弁の働きをする。なお、磁性体球と非磁性体球を交互に並べているのは、磁性体球が磁場内で磁化することによりクラスター化（直線鎖状化）し、環状のポンプ部流路内をスムーズに回転しなくなることを防ぐためである。

実験において送液される流体は水である。磁性体球は直径2.0 mm のSUS-440C（マルテンサイト系ステンレス・スチール）、非

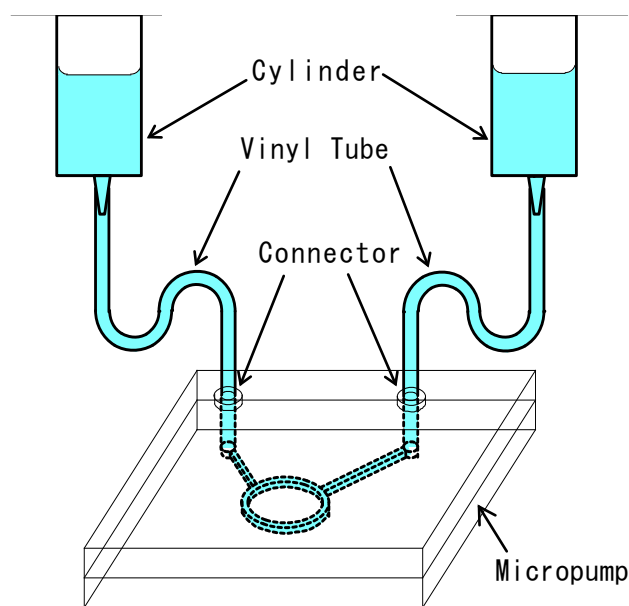


Fig. 2 Experimental Setup

磁性体球は直径 2.03 mm のアルミナ Al_2O_3 である。ポンプ部流路のループ直径は 14.3 mm であり、流路断面は直径 2.3 mm の円形である。また、入口および出口接続流路は幅 2 mm × 高さ 1 mm の矩形断面であり、両者のなす角は 90° である。アクリル製の上板および下板に、ポンプ部流路、接続流路等をマシニングセンターにおいてエンドミルにより加工する。特に、ポンプ部流路は円形断面のため、ボールエンドミルで切削加工した。電気炉において $140^\circ C$ で 2 時間焼成して、アクリル上板と下板を溶着する。

Fig. 2 にマイクロポンプと計量容器を組合わせた実験装置を示す。流量およびポンプヘッドを測定するために、2つの計量容器をマイクロポンプの入口および出口接続流路に接続する。実験開始前は2つの計量容器内の水位を同じにしておく。実験開始後に2つの計量容器内の水位差を測定し、流量およびポンプヘッドを求める。なお、ポンプ部流路を除く、吸込側の計量容器から吐出側の計量容器までの形状変化等による損失および摩擦損失は十分小さいことを確認している。

固定磁石および回転磁石ともに、直径 10 mm、厚さ 5 mm、表面磁束密度 350 mT の円盤状のネオジウム磁石である。固定磁石はアクリル上板の上表面上に置く。回転磁石は、アクリル下板の下表面の直下でモーターにより回転させる。回転速度はギアヘッドおよびコントローラーにより制御し、タコメーターにより測定する。

なお、報告者らは、既に、ポンプ部流路のループ直径が 11 mm、流路断面が直径 1.0 mm、および磁性体球の直径が 0.8 mm、非磁性体球の直径が 0.5 mm の磁性体球回転式マイクロポンプについて実験を行い、最大流量 約 500 $\mu l/min$ および最大ポンプヘッド 約 70 Pa の実験結果を得ている[5, 6]。

2.2 実験結果

回転磁石の回転速度は、48 rpm とした。この回転数ではほぼ最大流量および最大ヘッドが得られた。なお、磁性体球等は、4個がピストン部として、4個がバルブ部として働いた。

Fig. 3 に、実験で得られたポンプヘッド [Pa] の時間変化を示す。実験開始後、ポンプヘッドは増加していき、510 s において最大ポンプヘッド 151 Pa が得られ、ほぼ水位変化がなくなり（送液できなくなり）実験を終了した。Fig. 4 に、実験で得られた流量 [$\mu l/min$] の時間変化を示す。実験開始後のポンプヘッドが小さい 30 s において、最大流量 2000 $\mu l/min$ が得られた。510 s において、ポンプヘッドが大きくなり流量がほぼ 0 となったため、実験を終了した。60 s 間の平均流量を取っているが、ほぼ全時間に渡って流量は変動した。これは、60 s 間における2つの計量容器のヘッド差の変化が 30~10 Pa (3~1 mm 水柱) と小さく、この差により流量を求めているためである。Fig. 3 におけるポンプヘッド変化の勾配の差がほぼ流量の差（変動）に相当する。

Fig. 5 に流量とポンプヘッドの関係を示す。ポンプヘッドがほぼ 0 のとき最大流量 約 2000 $\mu l/min$ が得られ、流量がほぼ 0 のとき最大ポンプヘッド 約 150 Pa が得られた。開発されているマイクロ/ミニポンプとして、最大流量は十分大きい値と考えられるが、最大ポンプヘッドは得られた値の 10 倍程度以上が必要と考えられる[7]。このため、アクリル上板と下板を電気炉で焼成して溶着している現在の方式を、O リングをシールとして使用しボルト・ナットにより密着する方式に改め、ポンプ部流路の壁面と磁性体球との隙間を小さくするなどの改良を行っていく予定である。

なお、本磁性体球回転式ポンプについては、ポンプ性能を予測するために市販熱流体解析ソフトによる数値解析を現在実施しており、次報において報告する予定である。

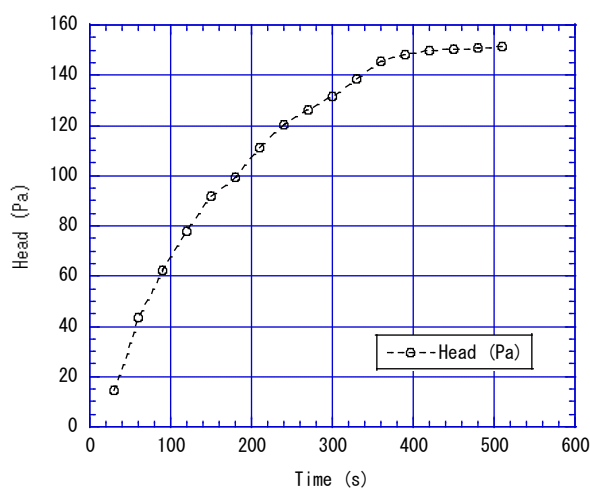


Fig. 3 Pump Head versus Time

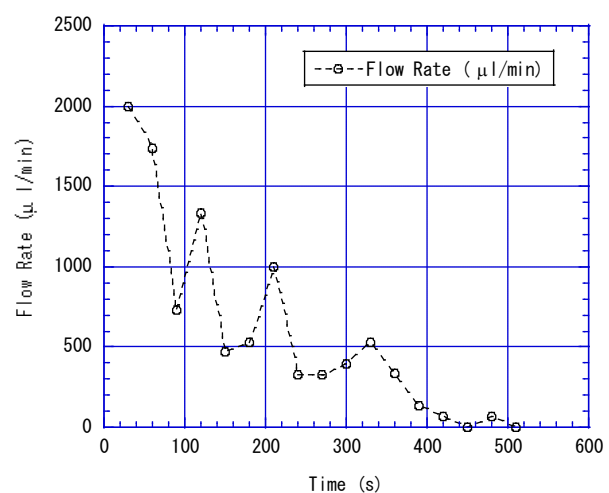


Fig. 4 Flow Rate versus Time

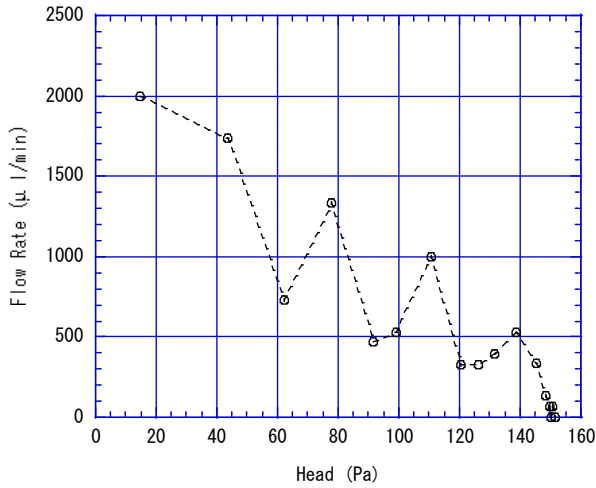


Fig. 5 Flow Rate versus Pump Head

3. 磁性体球往復式マイクロ/ミニポンプ

3.1 原理および実験

Fig. 6 に磁性体球往復式マイクロ/ミニポンプの送液原理を示す。磁性体球が往復するピストン部流路と受動逆止弁4個を組合せたものである。ピストン部流路内で2個の磁性体球を外部の往復磁石により往復運動させる。受動逆止弁は非磁性体球が一方へ移動したときは流路を塞ぎ、他方へ移動したときはストッパーにより流路を塞がない構造のものである（後で詳細を説明する）。

Fig. 6(a) に示すように、ピストン部流路内で磁性体球が往運動する（図で下側へ移動する）ときは、右上と左下の受動逆止弁は開となり、左上と右下の逆止弁は閉となる。このため、液体（水など）は、右の入口より右上の受動逆止弁と左下の逆止弁を通り左の出口に流れる。一方、Fig. 6(b) に示すように、ピストン部流路内で磁性体球が復運動する（図で上側へ移動する）ときは、右下と左上の受動逆止弁は開となり、左下と右上の逆止弁は閉となる。このため、液体は、右の入口より右下の受動逆止弁および左上の逆止弁を通り左の出口に流れる。従って、磁性体球の往運動および復運動ともに、液体を右の入口より左の出口へ送液することができる。

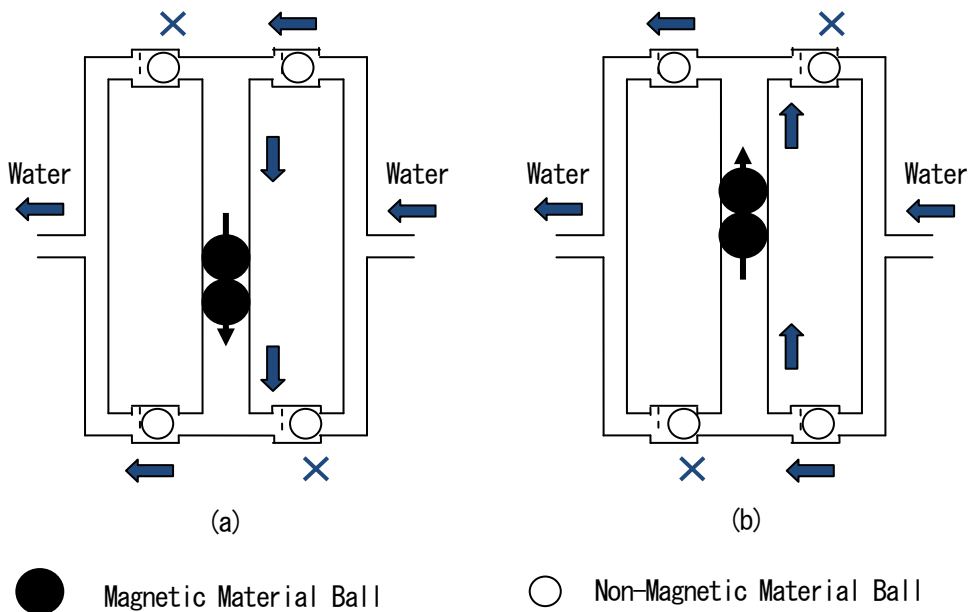


Fig. 6 Principle of Reciprocating-Motion Pump

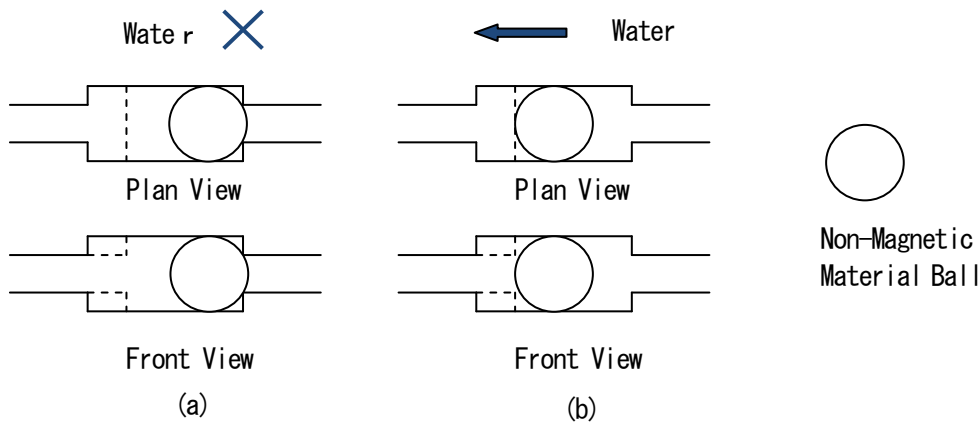


Fig. 7 Principle of Passive Check Valve

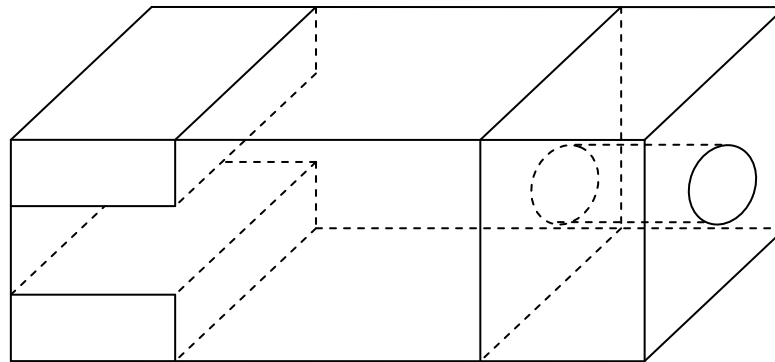


Fig. 8 Schematic of Passive Check Valve

磁性体球は直径 1.587 mm (1/16 インチ) の SUS-440C (マルテンサイト系ステンレス・スチール) である。また、ピストン部流路は内径 2.0 mm のテフロンチューブであり、アクリル上板と下板の間に挟み込むようにしている。これは、2枚のアクリル板に切削加工し溶着して円形断面にするより、円形断面の精度確保が容易と考えられ採用したものである。(この方法は、回転式マイクロ/ミニポンプの場合は、環状とするためのつなぎ目の存在、入口/出口接続流路への接続部の工作の観点から採用が困難である。) なお、ピストン部流路の有効長さ(磁性体球を往復運動させる実質距離)は 30 mm である。

Fig. 7 に受動逆止弁の動作原理を、また Fig. 8 に模式図(非磁性体球を除いて図示)を示す。Fig. 7(a) に示すように、液体が左側より右側へ流れようとする場合は、非磁性体球が円形断面の接続流路を塞ぎ、流れなくなる構造となっている。これに対して、Fig. 7(b) に示すように、液体が右側より左側へ流れようとする場合は、非磁性体球が左側の矩形断面ストッパーにあたり、流ることが可能な構造となっている。受動逆止弁の主要部は幅 1.7 mm × 深さ 1.7 mm、長さ 2.5 mm であり、非磁性体球は直径 1.5 mm のアルミナ Al_2O_3 である。また、右側接続流路は内径 1.0 mm の円形断面であり、左側ストッパー部流路は幅 1.7 mm × 高さ 1.0 mm の矩形断面である。

実験において送液される流体は水である。ピストン部流路および受動逆止弁を除く接続流路は、幅 1 mm × 高さ 0.5 mm の矩形断面である。アクリル製の上板および下板に、ピストン部流路、受動逆止弁、接続流路等をマシニングセンターにおいてエンドミルにより加工する。ピストン部流路のテフロンチューブを挟み込んで、電気炉において 140°C で 2 時間焼成して、アクリル上板と下板を溶着する。

流量およびポンプヘッドを求める実験手順は、回転式マイクロ/ミニポンプの場合と同じである。なお、正流方向の受動逆止弁も含めピストン部流路以外の、吸込側の計量容器から吐出側の計量容器までの形状変化等による損失および摩擦損失は十分小さいことを確認している。

往復磁石は直径 10 mm、厚さ 5 mm、表面磁束密度 350 mT の円盤状のネオジウム磁石である。往復磁石はアクリル下板の下表面の直下で、玩具用のモーターと自作した往復スライダー機構により往復させる。

3.2 実験結果

本実験においては、往復磁石の往復周波数は2.5 Hzとした。この回転数以上でさらにポンプ性能が改善する余地が残されており、モーターを変更して実験を行う予定である。なお、磁性体球の有効往復移動距離は、前述のように30 mmである。

Fig. 9に、実験で得られたポンプヘッド [Pa] の時間変化を示す。実験開始後、ポンプヘッドは増加していき、約3500 sにおいて最大ポンプヘッド4056 Paが得られ、水位変化が小さくなった(送液が少なくなった)ため実験を終了した。Fig. 10に、実験で得られた流量 [$\mu\text{l}/\text{min}$] の時間変化を示す。実験開始後のポンプヘッドが小さい約230 sにおいて、最大流量800 $\mu\text{l}/\text{min}$ が得られた。約3500 sにおいて、ポンプヘッドが大きくなり、流量が0に近くなったため、実験を終了した。ポンプヘッドが小さい、実験開始後の約1000 sまでは、流量の変動が見られた。これは、ポンプヘッドが小さい場合には流量が大きく、わずかな状況の変化(ピストン部受動逆止弁部における磁性体球/非磁性体球の流路断面内位置の変化)により流量が変動しやすいためと考えられる。Fig. 9におけるポンプヘッド変化の勾配の差がほぼ流量の差(変動)に相当する。

Fig. 11に流量とポンプヘッドの関係を示す。ポンプヘッドがほぼ0のとき最大流量約800 $\mu\text{l}/\text{min}$ が得られ、流量がほぼ0のとき最大ポンプヘッド約4000 Paが得られた。開発されているマイクロ/ミニポンプとして、最大流量は十分な値と考えられ、最大ポンプヘッドも十分大きな値であると考えられる[7]。今後は、本ポンプについて、前述のようにモーターを交換し、往復周波数をさらに大きくして実験を行う。また、ピストン部流路の断面内径を小さくするとともに、受動逆止弁の配置を工夫することにより、よりコンパクトなマイクロポンプを製作し実験を行う予定である。

なお、本磁性体球往復式ポンプについても、ポンプ性能を予測するために市販熱流体解析ソフトによる数値解析を現在実施しており、次報において報告する予定である。

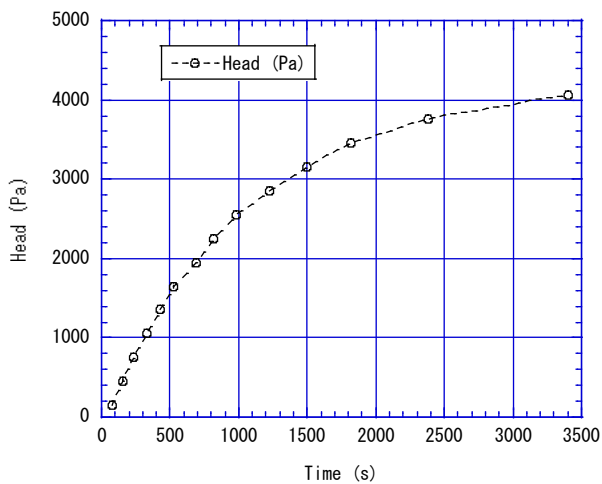


Fig. 9 Pump Head versus Time

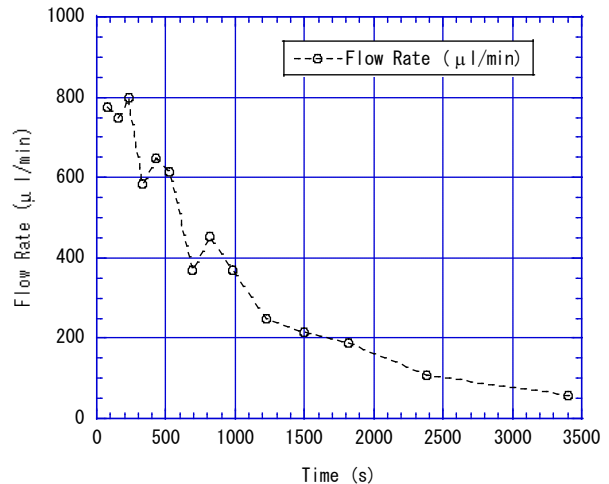


Fig. 10 Flow Rate versus Time

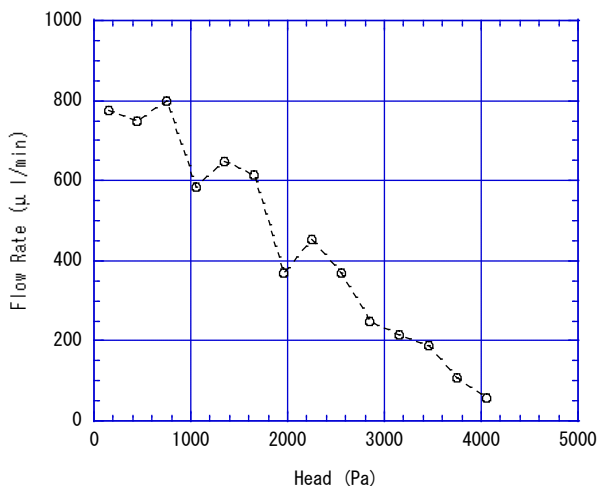


Fig. 11 Flow Rate versus Pump Head

4. 結言

磁性体球回転式および往復式マイクロ/ミニポンプについて、送液実験を行いポンプ性能の評価を行った。

磁性体球回転式マイクロ/ミニポンプについては、実験の結果、最大流量 約 2000 $\mu\text{l}/\text{min}$ および最大ポンプヘッド 約 150 Pa が得られた。最大流量については十分大きな値であるが、最大ポンプヘッドについては得られた値の 10 倍以上の大きな値にする必要がある。このため、ポンプ部流路の製作精度を上げるためアクリル上板と下板の密着方法を改良することなどを行う予定である。

磁性体球往復式マイクロ/ミニポンプについては、実験の結果、最大流量 約 800 $\mu\text{l}/\text{min}$ および最大ポンプヘッド 約 4000 Pa が得られた。最大流量および最大ポンプヘッドとも十分大きな値が達成された。今後は、現在のポンプについてさらに磁性体球の往復周波数を変化させた実験を行うとともに、ポンプ部流路内径を小さくしたよりコンパクトなポンプを製作して実験を行う予定である。

参考文献

- [1] マイクロ・ナノ熱流体ハンドブック編集委員会；マイクロ・ナノ熱流体ハンドブック、エス・ティー・エス、pp. 378-397 (2006)
- [2] A. Hatch, A.E. Kamholz, G. Holman, P. Yager and K.F. Bohringer; A Ferrofluidic Magnetic Micropump, J. of Microelectromechanical Systems, 10 (2), pp. 215-221 (2001)
- [3] E.G. Kim, J.G. Oh and B. Choi; A Study on The Development of A Continuous Peristaltic Micropump using Magnetic Fluids, Sensors and Actuators A, 128, pp. 43-51 (2006)
- [4] M. Du, X. Ye, K. Wu and Z. Zhou; A Peristaltic Micro Pump driven by A Rotating Motor with Magnetically Attracted Steel Balls, Sensors, 9, pp. 2611-2620 (2009)
- [5] 熊丸博滋, 有本光希, 阪田風馬, 岡本哲, 野村繕央, 伊藤和宏, 下権谷祐児, 磁性流体あるいは磁性体球の回転運動を利用したマイクロポンプに関する実験的研究, 兵庫県立大学大学院工学研究科研究報告, No. 64, pp. 19-24 (2011)
- [6] H. Kumamaru, F. Sakata, Y. Nomura, K. Itoh and Y. Shimogonya, Experimental Study on Micropump using Rotational Motion of Magnetic Material Balls, Proc. of The 4th Int. Conf. on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale, HTFFM-IV-052, Sept. 2011, Fukuoka, Japan
- [7] K.S. Yun, I.J. Cho, J.U. Bu, C.J. Kim and E. Yoon, A Surface-Tension Driven Micropump for Low-Voltage and Low-Power Operations, J. of Microelectromechanical Systems, 11 (5), pp. 454-461 (2002)

兵庫県立大学大学院工学研究科研究報告 No. 65

平成 25 年 1 月 31 日 発行

編集者 兵庫県立大学大学院工学研究科
〒671-2280 姫路市書写2167
電話 (079) 266 - 1661

発行者 兵庫県立大学
〒651-2197 神戸市西区学園西町8-2-1
電話 (078) 794 - 6580
