

磁性体球回転式/往復式マイクロ・ミニポンプ に関する実験的研究

熊丸 博滋、阪田 風馬、野村 繕央、伊藤 和宏、下権谷祐児
機械系工学専攻

Experimental Study on Micro-/Mini-Pump using Rotating or Reciprocating Motion of Magnetic Material Balls

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

Abstract

Two micro-/mini-pumps are studied experimentally in this research. Both the pumps drive fluid by motion of magnetic material balls in a pumping channel. One is a pump in which magnetic balls and non-magnetic balls being in a line alternatively, covered with magnetic fluid, rotate in a closed-loop pumping channel. The other is a pump in which magnetic balls move back and force in a straight pumping channel. These micro-/mini-pumps can be incorporated into microfluidic devices (tips) and can pump arbitrary kind of liquid. For the former micro-/mini-pump (the rotational-motion pump), the maximum flow rate obtained and the maximum pump head achieved in experiments are $\sim 1000 \mu\text{L}/\text{min}$ and 90 mm, respectively. It is expected to increase further the maximum pump head for the former pump. For the latter micro-/mini-pump (the reciprocating-motion pump), the maximum flow rate obtained and the maximum pump head achieved in experiments are $\sim 7500 \mu\text{L}/\text{min}$ and 620 mm, respectively. These values of pump performance for the latter pump are sufficiently large as a micro-/mini-pump. 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 ball

1. 序言

近年、化学分析・合成から医療・バイオ（細胞分析・操作など）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）（大きさ：長さ 5~7 cm×幅 数 cm×厚さ 数 mm 程度）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。

磁性流体あるいは磁性体球を用いるマイクロ・ミニポンプに関する研究もいくつか行われている。これらの多くは、マイクロ流体デバイスと一体化でき、任意の液体を送ることができることを意図している。Hatch らは、Fig. 1 に示すような磁性流体の回転運動を利用したマイクロポンプを提案した（実際には、ポンプ上方に固定磁石が、ポンプ下方に回転磁石が置かれている）[2]。磁性流体は、バルブとピストンの両方の働きをする。磁性流体の一部は、バルブ部として、固定磁石により駆動ループの出入口間の短い方の区間に常に保持される。磁性流体の残りは、ピストン部として、回転磁石により駆動ループ内を回転する。回転するピストン部により、水などの流体が入口から吸込まれ出口から押出される。Hatch らは、磁石回転数 8 rpm で最大流量 $45.8 \mu\text{L}/\text{min}$ および最大ポンプヘッド 135 mm 水柱を得ている。しかし、最大流量は十分な値とは言えず、最大ポンプヘッドもさらに大きい値が望ましい。また、磁性流体による駆動ループ等の汚染、あるいは場合により磁性流体のポンプ外への流出があると報告している。

Kim らは、Fig. 2 に示すような磁性流体を用いた蠕動運動式マイクロポンプを提案した（実際には、ポンプ上方に回転磁石が置かれている）[3]。駆動ループはシリコン膜によって分けられた上下2段になっている。磁石に下段ループ内の磁性流体が引付けられることによりシリコン膜を変形させ、磁石により磁性流体を回転させることにより、上段ループ内の水などの流体を駆動する。実際には、回転磁石は2個、磁性流体も2つの塊が 180° の位置に置かれている。Kim らは、磁石回転数 8 rpm で最大流量 3.8

$\mu\text{L}/\text{min}$ を得ているが十分な値とは言えない。また、最大ポンプヘッドは記されておらず、ほぼ0と推定される。Duらは、Fig. 3に示すように、鉄球をシリコン膜に沿って回転させるマイクロ・ミニポンプを提案している（実際には、ポンプ上面に鉄球が、ポンプ下方に回転磁石が置かれている）[4]。水などの入った駆動ループの上面はシリコン膜となっていて、複数個の鉄球をシリコン膜上で下方に置いた同数の磁石で引付けて、シリコン膜を変形させながら回転させ、水などの流体を駆動する。Duらは、回転数43rpmで最大流量490 $\mu\text{L}/\text{min}$ および最大ポンプヘッド592 Pa（約60 mm水柱）を、回転数500 rpmで最大流量5000 $\mu\text{L}/\text{min}$ および最大ポンプヘッド10 kPa（約1.02 m水柱）を得ている。しかし、前者の回転数では最大ポンプヘッドは十分とは言えず、また、特に後者では回転数が大きいためシリコン膜の耐久性が問題になると考えられる。

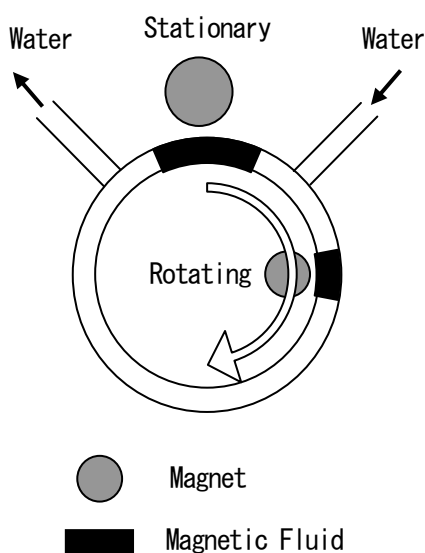


Fig. 1 Hatch et al.'s Pump

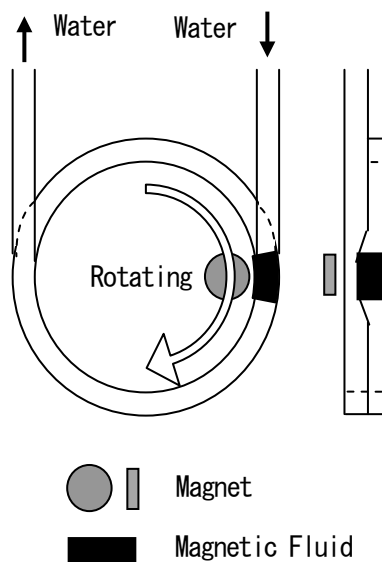


Fig. 2 Kim et al.'s Pump

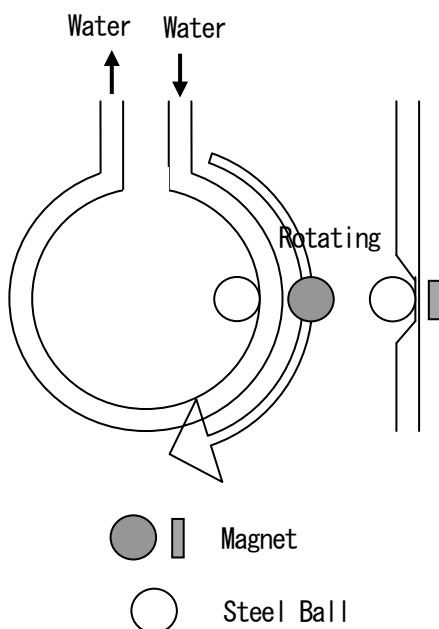


Fig. 3 Du et al.'s Pump

これらの磁性流体あるいは磁性体球を用いたマイクロ・ミニポンプの問題点の現状から、著者らは2つの方式のマイクロ・ミニ

ポンプを提案し実験を行ってきた。1つ目は、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、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・ミニポンプである。2つ目は、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・ミニポンプである。これらのポンプの目標性能としては、文献[5]などにまとめられている各種マイクロポンプの性能を参照し、また報告者らのポンプはマイクロ流体デバイスと一体化でき任意の流体を駆動できる利点があることを考慮し、最大流量 数 100 $\mu\text{L}/\text{min}$ および最大ポンプヘッド 数 1000 Pa (数 100 mm 水柱) とした。

磁性体球回転式マイクロ・ミニポンプについては、前報までの実験により、磁性体球のみを回転させ、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 (約 15 mm 水柱) を得ることができた[6]。本報では、磁性体球を磁性流体で覆い回転させることによりポンプ性能を改善できないか調べた実験について報告する。また、磁性体球往復式マイクロ・ミニポンプについては、前報までの実験により、磁性体球外径/流路内径および往復運動の周波数のある1つの条件について、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 (約 410 mm 水柱) を得ることができた[6]。本報では、これらの条件の範囲をさらに広げて実験を行い最大のポンプ性能を確認した結果について報告する。

なお、磁性体球回転式マイクロ・ミニポンプについては、市販熱流体ソフトによる数値解析によりポンプ性能の予測を行ったが、実験結果を必ずしも十分には予測することができなかった[7]。また、磁性体球往復式マイクロ・ミニポンプについても、市販熱流体ソフトによる数値解析を行ったが、流路と磁性体球の間のギャップが小さいため、ポンプヘッド = 0 Pa 以外では現時点では解析結果を得ることはできていない。

2. 磁性体球回転式マイクロ・ミニポンプ

2.1 原理および実験

Fig. 4 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. 4(a) に示すように、ポンプ駆動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. 4(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、環状の駆動ループ内をスムーズに回転しなくなることを防ぐためである。

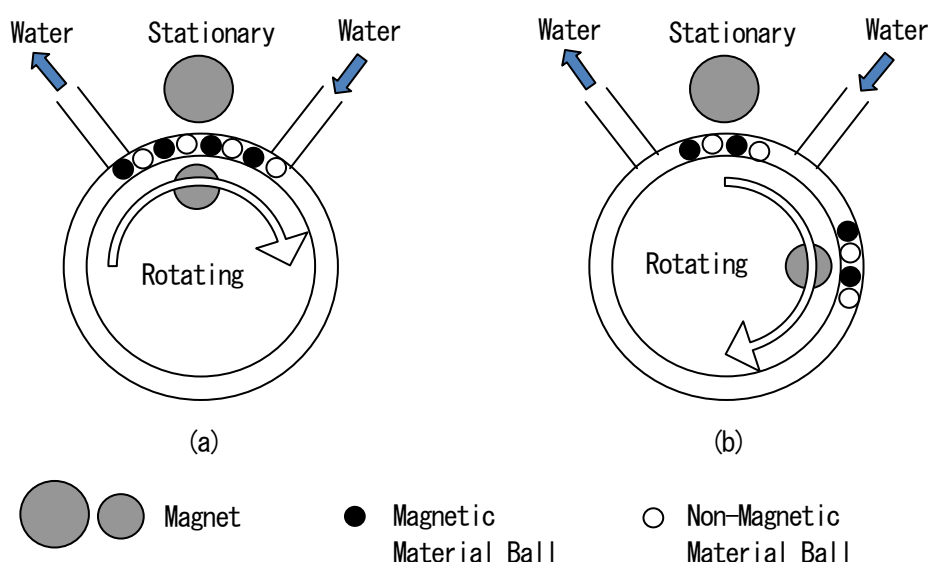


Fig. 4 Principle of Rotational-Motion Micro/Mini-pump

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)、非磁性体球は直径 2.03 mm のアルミナ Al_2O_3 である。SUS-440C はほとんど錆びず磁場中で磁化する材料である。駆動ループの直径

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、駆動ループの流路、接続流路等をマシニングセンターによりエンドミルを用いて加工する。特に、駆動ループの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°C で 2 時間焼成して、アクリル上板と下板を溶着する。なお、駆動ループの流路の製作精度については、マシニングセンターによる加工精度は 10 μm のオーダーであると考えられるが、電気炉による溶着により流路断面の上下方向が水平方向に比べ 100 μm のオーダーで短くなる可能性があり、磁性体球等と駆動ループ壁間の隙間を極力小さくことには限界がある。

Fig. 5 にマイクロ・ミニ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。

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。

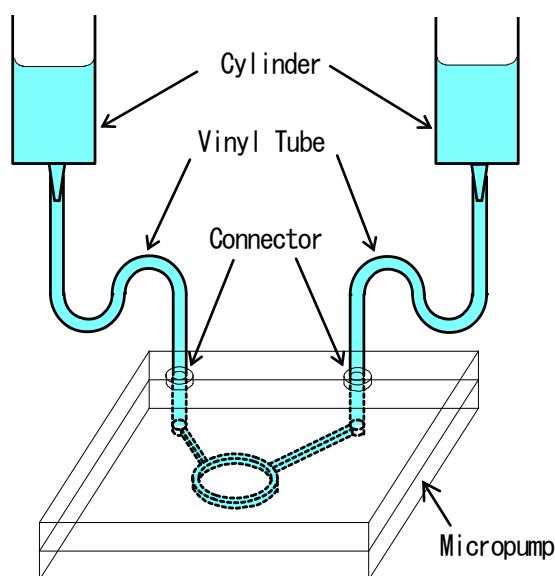


Fig. 5 Experimental Setup

前述のように、前報までの実験では、回転数 48 rpm で回転磁石を回転させることにより最大流量 約 2000 μL/min および最大ポンプヘッド 約 150 Pa (約 15 mm 水柱) を得ることができた[6]。本研究では、磁性体球等 (磁性体球および非磁性体球) に加え磁性体球等を覆う程度 (約 20 μL) に磁性流体を追加して実験を行った。これは、磁性体球等と駆動ループ壁面との間のギャップを埋め、得られるポンプヘッドを大きくするためである。使用した磁性流体は、シグマハイケミカル社製の A-300 (磁化 34 mT、粘度 300 mPa) であり、防塵あるいは真空シール用の高粘度のものである。本研究室でも従来使用していた安価な M-300 (磁化 34 mT、粘度 30 mPa) では送液流体の水に同伴され流出する可能性が高いため、高粘度の磁性流体を使用した。

2.2 実験結果

回転磁石の回転速度を 48 rpm として送液実験を行ったところ、磁性体球等は良好に回転しなかった。これは磁性流体を追加していなかった場合と比べ、磁性流体を追加した場合の流動抵抗が大きくなったためと考えられる。回転磁石の回転速度を低下させて行き、回転数 16.8 rpm としたところで、磁性体球等は良好に回転し、またこの回転数でほぼ最大の流量およびポンプヘッドが得られた。なお、磁性体球等は、磁性流体を追加しなかった場合と同様に、4個がピストン部として4個がシリンダ部として働いた。

実験で直接得られた測定結果の例として、Fig. 6 に2つの計量容器内水位の差すなわちポンプヘッド [mm] の時間変化を示す。実験開始後、ポンプヘッドは最初は直線的に増加し、次第に増加が緩やかになり、105 s においてポンプヘッド 88.5 mm となった。Fig. 7 に、両計量容器内水位の変化より、計量容器の断面積および測定時間間隔を考慮して得られた流量 [μL/min] の時間変化を示す。実験開始後 14 s までは、ポンプヘッドが小さくほぼ同じ最大流量 1000 μL/min で送液できたことが分る。この最大流量は、

球がポンプ流路の 3/4 (入口～出口間) を回転数 16.8 rpm に相当する速度で通過する間に、この部分の水が全て送液されると仮定して求めた流量 (2350 $\mu\text{L}/\text{min}$) の約 1/2 である。2つの流量の差は、ピストン部およびバルブの両方において磁性体球等と駆動ループ壁間の隙間から水がもれる (逆流する) ために生じたと考えられる。実験開始後 14 s 以降は、ポンプヘッドが次第に増加し、磁性体球等と駆動ループ壁間のもれ (逆流) が次第に増加し、流量は低下し 0 に近づいていった。

Fig. 8 に流量とポンプヘッドの関係を示す。シンボル○ (“With Magnetic Fluid”) が本研究の結果である。また、シンボル△ (“Without Magnetic Field”) は前報に示した磁性体球等のみを使用した実験の結果である。前述のように、磁性体球等のみを回転させた前報の実験では、ポンプヘッドがほぼ 0 のとき最大流量 約 1900 $\mu\text{L}/\text{min}$ 、流量がほぼ 0 のとき最大ポンプヘッド 約 15 mm が得られていた。本研究の磁性体球等に磁性流体を追加した実験では、ポンプヘッドが約 0 mm から約 40 mm までほぼ同じ最大流量 約 1000 $\mu\text{L}/\text{min}$ が得られ、流量がほぼ 0 のとき最大ポンプヘッド 約 90 mm が得られた。本研究のポンプでは、目視の範囲では磁性流体のポンプからの流失は見られなかった。磁性流体を追加したことにより、磁性流体の粘性のため磁性流体等の追従する回転数が低下し最大流量は小さくなったものの、磁性体球等と駆動ループ壁間の隙間からのもれが減少し最大ポンプヘッドは大きくなった。最大流量は前述の目標値より大きい、最大ポンプヘッドは目標値よりまだ小さく、さらに改良の必要がある。

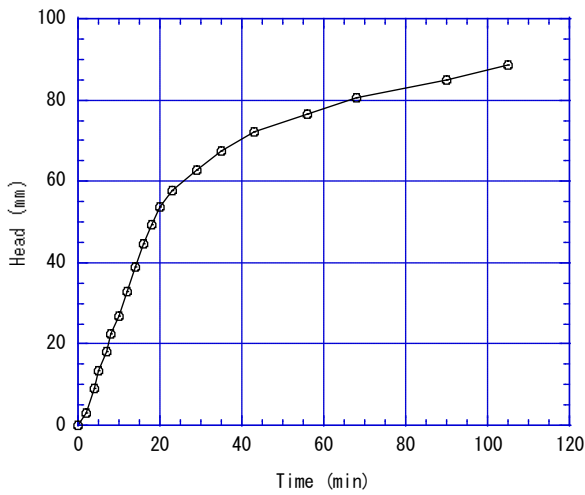


Fig. 6 Pump Head versus Time

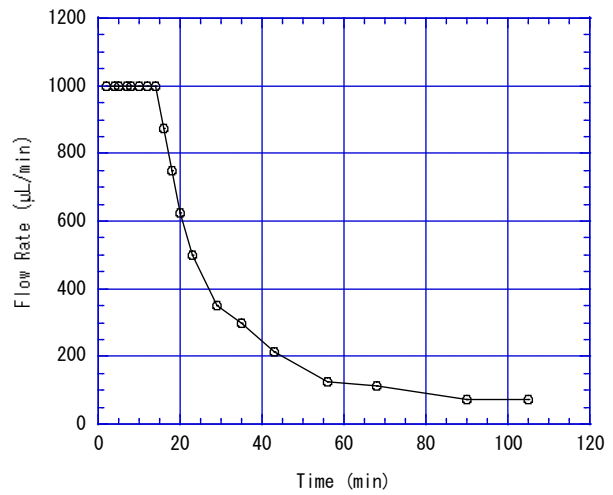


Fig. 7 Flow Rate versus Time

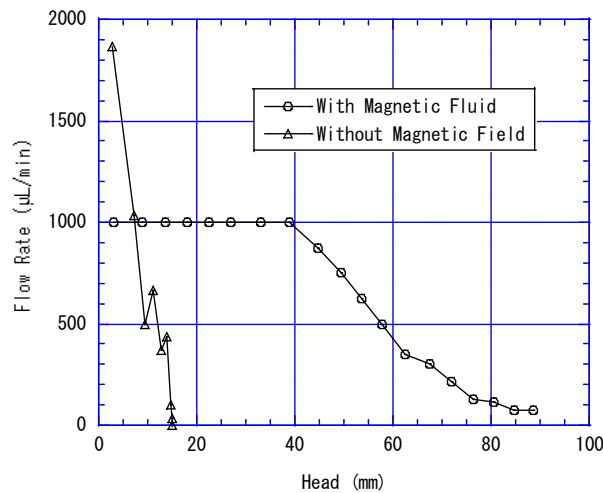


Fig. 8 Flow Rate versus Pump Head

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. 9 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. 9(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. 9(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、磁性体球の往運動時および復運動時ともに、液体を右の入口より左の出口へ送液することができる。

磁性体球は SUS-440C（マルテンサイト系ステンレス・スチール）であり、ピストン部流路はテフロンチューブである。本研究では、磁性体球直径 1.98 mm で流路内径 2.0 mm と磁性体球直径 1.98 mm で流路内径 2.05 mm の 2 つの組合せについて実験を行った。ピストン部流路のテフロンチューブは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。磁性体球の個数は、磁性体球とピストン部流路壁間の隙間からのもれの低減および磁性体球の移動距離のより広範囲な確保を考慮し、また予備実験を行い 2 個とした。なお、ピストン部流路は直線であり、回転式ポンプで考慮した磁性体球のクラスター化は問題とはならない。

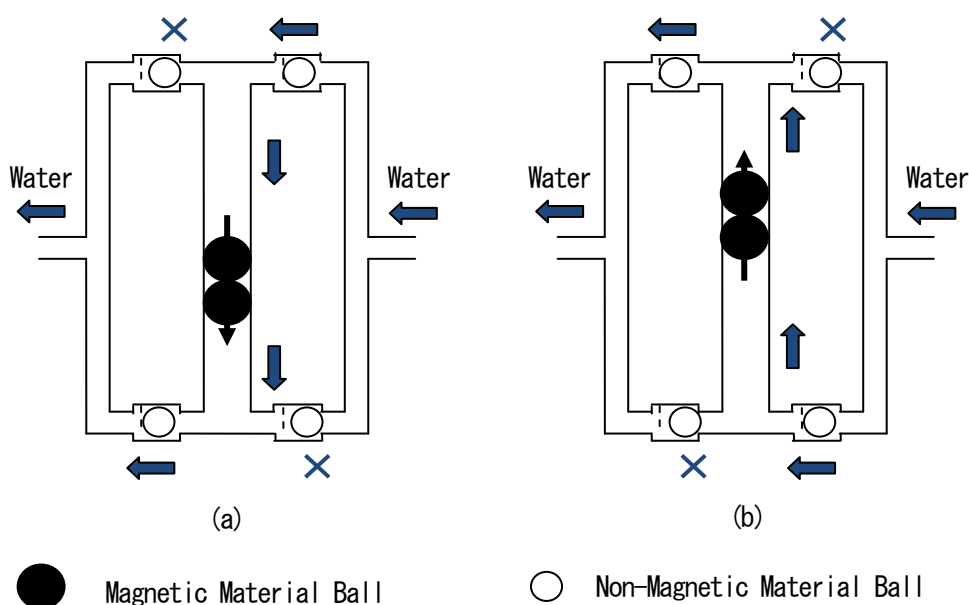


Fig. 9 Principle of Reciprocating-Motion Micro/Mini-pump

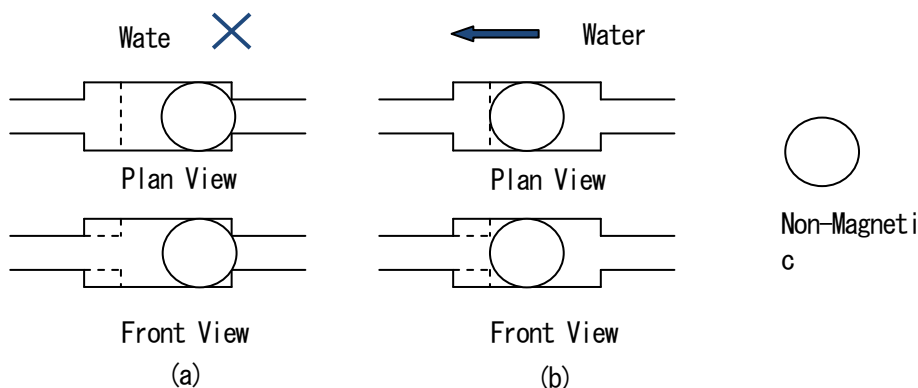


Fig. 10 Principle of Passive Check Valve

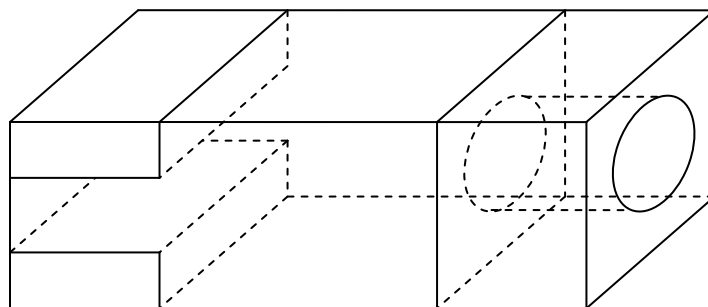


Fig. 11 Schematic of Passive Check Valve

Fig. 10 に受動逆止弁の動作原理を、また Fig. 11 に模式図（非磁性体球を除いて図示）を示す。Fig. 10(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、液体が流れなくなる構造となっている。これに対して、Fig. 10(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、液体が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×高さ 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よりエンドミルを用いて切削加工する。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。

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

両計量容器の水位の時間変化よりポンプヘッドの時間変化および流量の時間変化を求めた手順は、回転式マイクロ・ミニポンプの場合と同じである。

Fig. 12 に、往復式マイクロ・ミニポンプについて、往復磁石の往復運動の周波数を変化したときに実験で得られた最大ポンプヘッド [mm] を示す。シンボル○ (“1.98/2.00”) が磁性体球直径 1.98 mm で流路内径 2.0 mm についての結果、シンボル△ (“1.98/2.05”) が磁性体球直径 1.98 mm で流路内径 2.05 mm についての結果である。2つのケースとも往復運動の周波数が 4.05 Hz のとき最大ポンプヘッドが得られた。特に前者のケースでは最大ポンプヘッド約 620 mm が得られた。

Fig. 13 に、往復磁石の往復運動の周波数を変化したときに実験で得られた流量 [mL/min] を示す。シンボルは Fig. 12 と同じである。シンボル○ (“1.98/2.00”) のケースでは、周波数が 1.25 Hz と 4.77 Hz については流量の測定結果が得られていない。2つのシンボルのケースとも往復運動の周波数が 4.05 Hz のとき最大流量が得られた。特にシンボル○のケース (“1.98/2.00”) では最大流量約 7.5 mL/min が得られた。この最大流量は、磁性体球がピストン部流路 30 mm を周波数 4 Hz に相当する速度で往復する間に、この部分の水が全て送液されると仮定して求めた流量 (45 mL/min) の約 1/6 である。約 1/6 しか送液されていない理由は、ピストン流路において磁性体球が移動する際に磁性体球と流路壁間の隙間から水がもれる（逆流する）ため、および受動逆止弁において非磁性体球が開状態から閉状態まで移動する間に意図した方向とは逆方向へ水が流れるためと考えられ、特に後者の影響が大きいと考えられる。最大流量はポンプヘッドがほぼ 0 の状態で得られるものであるが、この状態ではピストン流路の出入口圧力差（ヘッド差）はほぼゼロでありピストン流路での逆流は 0 に近い値と考えられる。従って、受動逆止弁において非磁性体球が開状態から閉状態まで移動する間に逆方向へ流れることが、約 1/6 しか送液されないことへの影響が大きいと考えられる。この改善策として、非磁性体球としてアルミナ球（密度 3.8 g/cm³）に換えて、より軽量で耐熱性のあるポリイミド球（密度 1.43 g/cm³）あるいは PEEK 球（密度 1.28 g/cm³）を使用することを検討している。

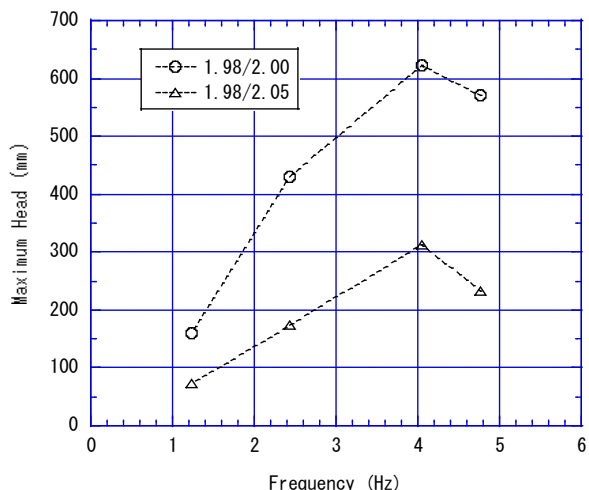


Fig. 12 Maximum Pump Head versus Frequency

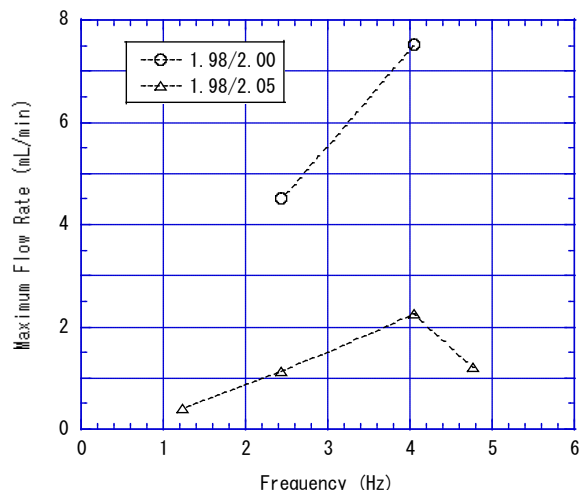


Fig. 13 Maximum Flow Rate versus Frequency

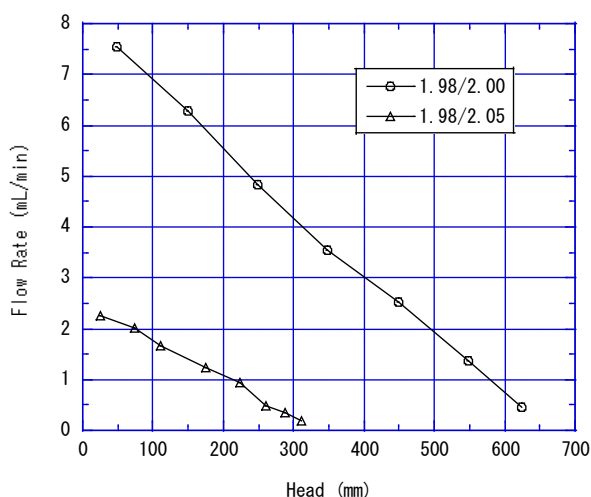


Fig. 14 Flow Rate versus Pump Head

Fig. 14 に、流量とポンプヘッドの関係を示す。シンボルは Fig. 12 および Fig. 13 と同じである。シンボル○ (“1.98/2.00”) のケースではポンプヘッドが ほぼ 0 のとき最大流量 約 7.5 mL/min が得られ、流量が ほぼ 0 のとき最大ポンプヘッド 約 620 mm が得られた。シンボル△ (“1.98/2.05”) のケースではポンプヘッドが ほぼ 0 のとき最大流量 約 2.2 mL/min が得られ、流量が ほぼ 0 のとき最大ポンプヘッド 約 310 mm が得られた。マイクロ流体チップと一体化でき任意の液体を送液できるという特徴も考えると、マイクロ・ミニポンプとして最大流量および最大ポンプヘッドともに十分大きな値であると考えられる。今後は、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目指してさらに実験を行っていく予定である。

4. 結言

磁性体球回転式マイクロ・ミニポンプについて、前報のポンプにおいて磁性体球等に磁性流体を追加して実験を行った。実験の結果、最大流量 約 1000 μ L/min および最大ポンプヘッド 約 90 mm 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さらに大きな値にする必要がある。このため本回転式ポンプについてはさらに改良を行う必要がある。

磁性体球往復式マイクロ・ミニポンプについて、前報の実験に引き続き、磁石往復運動の周波数の範囲を拡大して実験を行った。実験の結果、最大流量 約 7500 μ L/min および最大ポンプヘッド 約 620 mm 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、ポンプ流路ループ内径を小さくしたよりコンパクトなポンプを製作し、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] 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)
- [6] 熊丸博滋、野村繕央、阪田風馬、伊藤和宏、下権谷祐児：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、兵庫県立大学大学院工学研究科研究報告、No. 65, pp. 1-7 (2012)
- [7] H. Kumamaru, F. Sakata, A. Ohue, K. Itoh and Y. Shimogonya, Studies on Micropump/Minipump using Rotational Motion of Magnetic Material Balls, Proc. of The ASME 2013 11th Int. Conf. on Nanochannels, Microchannels and Minichannels (ICNMM2013), ICNMM2013-73160, June 2013, Sapporo, Japan

兵庫県立大学大学院工学研究科研究報告 No. 66

平成 26 年 3 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 公立大学法人 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
