電磁アクチュエータ一体型マイクロリニアポンプ

正員 鈴森 康一* 非会員 古澤 宏明*
 正員 神田 岳文* 非会員 山田 嘉昭**
 非会員 永田 卓志*

Micro Linear Pump with Electromagnetic Actuator

Koichi Suzumori*, Member, Hiroaki Furusawa*, Non-member, Takefumi Kanda*, Member,
 Yoshiaki Yamada**, Non-member, Takashi Nagata*, Non-member

In recent years, research and development of the micro-fluid systems have been activated in the field of chemical technology and biotechnology. Micro-fluid systems are realized by micromachine technology and MEMS technology. Micro pump is an essential element for miniaturization of chemical analysis reaction systems. The aim of this research is development of a micro linear pump which will be built into micro-fluid systems. This pump aims to take a sample of very-small-quantity of liquids. Taking a sample of very-small-quantity of liquids reduce the amount used and waste fluid of a reagent. Full length and diameter of this pump are 32.5mm and 6mm respectively. The features of this pump are (1) the pump is built with actuator, (2) the gap of 7 μ m between piston and cylinder is achieved through fine machining process, and (3) micro check-valves of 2mm diameter made of stainless-steel film are fabricated and integrated. In this paper, the structure and the characteristics of this pump were shown. And the characteristics after improvement of micro check-valves were shown.

キーワード：マイクロ流体システム，マイクロリニアポンプ，微量サンプリング，アクチュエータ一体型，小型化

Keywords：micro-fluid system, micro linear pump, sample of very-small-quantity, built-in actuator, miniaturization

1. まえがき

近年，マイクロリアクタ， μ TAS，Lab-on-Chip 等，マイクロ流体システムの研究が活発に進められている。このようなマイクロ流体システム実現の要となる要素の一つはマイクロポンプである。

従来，チップ上に集積されるマイクロポンプとして，MEMS 技術を利用して作られる圧電素子駆動のダイヤフラム型のポンプを始め，様々なマイクロポンプが開発されてきた⁽¹⁾。これらのポンプはマイクロ化や集積化に適しており，数 nl/min から数 100nl/min 程度の微小流量制御を対象に開発されている。

一方で，数～数 10ml/min オーダの吐出量を持ち，チップの外付けで利用される自立型のマイクロポンプのニーズも

高まっている。

このようなマイクロポンプとして，マイクロギヤポンプやマイクロトロコイドポンプ⁽²⁾，圧電素子を用いたダイヤフラム式マイクロポンプ⁽³⁾等が開発されているが，いずれもポンプ全体の体積に対する吐出量の割合が低い。マイクロギヤポンプやマイクロトロコイドポンプは，機械的エネルギー損失が比較的大きく，外部に比較的大きなアクチュエータを必要とし，小型化をする上で問題となっている。また，ダイヤフラム式マイクロポンプは一般に駆動電圧が高い上，吐出量/ポンプ体積比も優れているとはいえない。チップへの組込みの際には，吐出量/ポンプ体積比の高いポンプが望まれている。

本研究では，数 ml/min 程度の吐出量を持ち，吐出量/ポンプ体積比の優れたマイクロポンプの実現を目標とし，電磁アクチュエータと一体となったマイクロリニアポンプの開発を行なった。

2. マイクロリニアポンプの設計

〈2・1〉 構造と駆動原理 図 1 に試作した全長 32.5mm，直径 6mm のマイクロリニアポンプの外観を示す。

* 岡山大学大学院自然科学研究科
 〒700-8530 岡山県岡山市津島中 3-1-1
 Okayama University

** 岡山県産業振興財団
 〒701-1221 岡山県岡山市芳賀 5301
 Industrial Promotion Foundation of Okayama Prefecture
 5301 Haga, Okayama 701-1221

図 1 マイクロリニアポンプ
Fig. 1. Micro linear pump.

図 2 マイクロリニアポンプの構造図
Fig. 2. Structure of micro linear pump.

図 3 マイクロリニアポンプの IO ブロック内に
取り付けられたマイクロチェックバルブ
Fig. 3. Micro check-valve in IO block of
micro linear pump.

図 2 に示すように、外周に線径 0.2mm、200 巻のコイルが形成された石英ガラス製のシリンダ内を全長 9mm、直径 3mm のサマリウムコバルト永久磁石製のピストンが往復運動する構造となっている。精密旋盤による微細加工により、ピストンの直径とシリンダの内径との径の差を平均 7 μ m で仕上げられている。また、ピストンが往復運動する際の衝撃を吸収するためにクッション性のあるテフロン製のスペーサがピストンの前方と後方に設けられている。ピストンのストロークは 5mm である。このマイクロリニアポンプは、構造の簡略化を目的としており、強磁性材料を用いた磁路回路を持たない構造とした。

このマイクロリニアポンプの構造的特徴として、外部に他のアクチュエータを必要とせず、構造が簡単であるので、大きな吐出量/ポンプ体積比が得られ、小型化と量産化を行ないやすい点が挙げられる。

図 4 マイクロリニアポンプの IO ブロック内に
あるマイクロチェックバルブの動作
Fig. 4. Operation of micro check-valve in IO
block of micro linear pump when fluid is
flowing.

図 5 磁場解析時におけるコイルに電圧を印加した
時のピストンの動作
Fig. 5. Operation of piston when voltage is
applied to a coil at the time of magnetic field
analysis.

〈2・2〉 マイクロチェックバルブ IO ブロック内には流体の方向制御のために図 3 に示す厚さ 0.02mm のステンレス薄膜で作られた直径 2mm のマイクロチェックバルブが吸入口と吐出口に付けられている。今回、バルブの耐久性と動作を考慮して、片持ち部の幅を示す図 3 中の θ が 105° のものと 30° のものの 2 種類のマイクロチェックバルブを製作し、比較検討を行なった。

吸入時と吐出時のマイクロチェックバルブの動作の様子を図 4 に示す。このマイクロチェックバルブは流体から力を受けることによって受動的に動作する。

〈2・3〉 磁路設計 有限要素法を用いて磁場解析を行い、コイルとピストンの位置と大きさの最適設計を行った。図 5(a)に示すように、ピストンとコイルの端面が揃った位置を 0 とし、図 5(b)に示すようにピストンの位置を x で表すことにする。

ここでは、ピストンの動作ストロークを 5mm、動作に要する吸引力を 0.03N と設定して設計を進めた。ピストンが安定して動作するには、ピストンの動作範囲のどの位置においても、上下どちら方向にも目標とする大きさの吸引力を発生させる必要があり、コイルやピストンの大きさを変えて設計を行った。設計結果を以下に記す。

図 5 に示すように、ピストンの位置を変えて、ピストンの位置 x とピストンがコイルから受ける吸引力の関係を解

図6 500mA 駆動時におけるコイルが発生する吸引力の磁場解析による計算結果

Fig. 6. Calculated results of coil suction force at the driving current of 500mA by magnetic field analysis.

図7 -500mA 駆動時におけるコイルが発生する吸引力の磁場解析による計算結果

Fig. 7. Calculated results of coil suction force at the driving current of -500mA by magnetic field analysis.

図8 磁場解析により得られた磁束線図

Fig. 8. Lines of magnetic flux by magnetic field analysis.

析した。図5の上方向へかかる力を正とする。解析ではコイルを200巻、電流を $\pm 500\text{mA}$ と想定した状態で磁場解析をそれぞれ行なった。解析により得られたコイルの吸引力を図6と図7に示す。また、図8に解析により得られた磁束線図を示す。

ここでは図6と図7からピストンの位置 x が2mm以下7mm以上ではコイルの吸引力が小さく流水時に力が不足すると考えられるが、 x が2~7mm上方の範囲では上下どちら方向にも常に0.03N以上の吸引力が得られており、この範囲でピストンは安定した動作が行える。

3. 特性試験

〈3・1〉 周波数追従特性 非流水時におけるピストンの周波数追従性の測定を行なった。ピストンが5mmの全ストロークを完全に往復している状態を追従しているとし、各電圧において周波数を1Hzから徐々に上げていながらピストンが追従する周波数の限界を測定した。測定ではピストンを駆動できる最低電圧の0.4V_{p-p}から0.1V_{p-p}ずつ上げていき、10箇所の電圧値において測定した。測定により得られた結果を図9に示す。図9より電圧が上がるにつれてピストンの追従する周波数の限界値はほぼ線形的に上がっていき、磁気飽和は認められない。また、コイルを指で触った場合、コイルの温度は多少上昇しているが、過度の温度上昇は認められない。よって、良好なアクチュエータ設計が実現できていることが確認できる。

〈3・2〉 周波数 - 吐出量特性 コイルに印加する電圧の周波数と吐出量との関係を測定した結果を図10に示す。なお、ここから〈3・4〉節までは、 $\theta = 105^\circ$ マイクロチェックバルブを用いた場合について説明する。

マイクロリニアポンプを各電圧、各周波数で3分間駆動し、吐出された水の質量を量り1分間の吐出量を求める。この作業を3回繰り返して得られたデータの平均値を図10に示している。図10よりどの電圧においてもある周波数ま

図9 コイルに印加する電圧とピストンが追従する周波数の限界値との関係

Fig. 9. Relation between applied voltage and limit value of frequency that piston follows.

図 10 周波数と吐出量との関係

Fig. 10. Relation between frequency and flow rate.

図 11 周波数と吐出圧との関係

Fig. 11. Relation between frequency and flow pressure.

では周波数が高くなるにつれて吐出量は増加し、それ以降は減少していくという傾向が得られた。ピストンが追従できなくなる周波数の限界値に達すると、ピストンの動作ストロークが小さくなり、吐出量が減少する。1.0Vp-p を例にとると、ピストンは 8Hz 付近から 5mm の全ストロークを往復できなくなり、非流水時に比べてピストンの追従する周波数の限界値は 1/3～1/4 になっている。

〈3・3〉 周波数 - 吐出圧特性 コイルに印加する電圧の周波数と吐出圧との関係を測定した結果を図 11 に示す。吐出口に取り付けたチューブを垂直に立て、マイクロリアポンプを各電圧、各周波数で 5 分間駆動させることによりチューブ内の水面を安定させ水面の高さを測定する。ここでいう水面の高さとは、吸入口側タンクの水面から吐出口に取り付けたチューブ内の水面までの高さを意味する。吐出圧は以下の式を用いて測定した水面の高さから計算した。

$$P_D = \rho \times g \times h \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、吐出圧を P_D [Pa]、水の密度を ρ [kg/m³]、重力加速度を g [m/s²]、水面の高さを h [m] とする。

図 11 より、低い周波数域では電圧が異なっても吐出

図 12 負荷圧力と吐出量との関係

Fig. 12. Relation between back pressure and flow rate.

圧はほぼ同じ値を示し、周波数が高くなるにつれて吐出圧は高くなっていくことがわかる。また高い周波数域では周波数が高くなるにつれて吐出圧は低くなり、電圧が高いほど吐出圧は高いこともわかる。

これは次のように説明できる。吐出側の圧力を p_o 、吸入側の圧力を p_i とする。一般に吐出側の圧力が高くなってゆくと、チェックバルブの隙間やピストンとシリンダの隙間を通して流体が吐出側から吸入側に流れようとする作用(これを逆流作用と呼び、この作用によって発生する流量を逆流流量と呼ぶ)が働く。逆流流量は $p_o - p_i$ に比例するが、ポンプが定常状態で動作している状態では、無負荷時の吐出量(図 10)と逆流流量は等しくなりバランスしている。

ピストンが追従する比較的低い周波数領域では、図 10 に示すように無負荷時の吐出量はコイルの印加電圧に依存せず、周波数にほぼ比例する。従って逆流流量および吐出側と吸入側の差圧 $p_o - p_i$ も印加電圧には依存せず周波数のみに依存する。

これに対して、比較的高い周波数で、ピストンが追従してこない領域では、図 10 に示すように、電圧を上げるほど無負荷時の吐出量が増大し、周波数に対して上に凸の曲線を描くようになる。従って逆流流量および吐出側と吸入側の差圧 $p_o - p_i$ も電圧に依存し、周波数に対して上に凸の曲線を描く。

〈3・4〉 負荷圧力 - 吐出量特性 負荷圧力と吐出量との関係を測定した結果を図 12 に示す。吸入口と吐出口に取り付けたチューブ先端に高低差をつけてマイクロリアポンプに負荷をかける。その状態でマイクロリアポンプを各電圧、2Hz で 3 分間駆動し、吐出された水の質量を量り 1 分間の吐出量を求める。この作業を 3 回繰り返して得られたデータの平均値を図 12 に示している。

吐出口の圧力を p_o [Pa]、吸入口の圧力を p_i [Pa]、負荷圧力を $p_o - p_i$ [Pa]、水の密度を ρ [kg/m³]、重力加速度を g [m/s²]、チューブ先端の高低差を L [m] として

$$P_o - P_i = \rho \times g \times L \quad \dots\dots\dots (2)$$

表 1 他社製マイクロポンプとの比較

Table 1. Data comparison of micro linear pumps with micro pump of other companies

	Developed pump	A	B	C
Maximum flow rate [ml/min]	1.2	1.5	2.4	8.33
Size [mm]	$\phi 6 \times 32.5$	$23 \times 23 \times 4.7$	$\phi 6.45 \times 7.9$ + external motor	$17.5 \times 26 \times 45$
$\frac{\text{Maximum flow rate}}{\text{Pump volume}}$	0.001	0.0006	—	0.004
Supply voltage	2.0Vp-p	300Vp-p	12V	230V
Power [W]	0.4	0.06	5	5
Driving frequency [Hz]	10	20	50	50

図 13 マイクロチェックバルブを改良後の周波数と吐出量の関係

Fig. 13. Relation between frequency and flow rate after improvement of micro check-valve.

という関係式と測定時のチューブ先端の高低差から負荷圧力は求められる。図 12 より負荷圧力が高くなるにつれて吐出量は減少していき、比較的線形な関係であるという結果が得られた。

〈3・5〉 マイクロチェックバルブによる影響 〈3・1〉～〈3・4〉では耐久性を考えて図 3 中の θ が 105° のマイクロチェックバルブを用いて試験を行なった。そこで、 θ が 30° の応答性のよいマイクロチェックバルブを用いてコイルに印加する電圧の周波数と吐出量との関係を測定し、マイクロチェックバルブがマイクロリニアポンプの特性にどれくらい影響しているのかを調べた。測定方法は〈3・2〉と同様である。測定により得られた結果を図 13 に示す。図 10 と図 13 を比較すると、最大吐出量を約 0.9ml/min から約 1.2ml/min に増加させることに成功した。

4. むすび

電磁駆動を用いることにより、 ml/min レベルのアクチュエータ一体型マイクロリニアポンプの開発を行なった。測定により、最大吐出量約 1.2ml/min という結果が得られた。また、マイクロチェックバルブがマイクロリニアポンプの

特性に大きく影響を与えていることもわかった。

表 1 に今回開発したマイクロリニアポンプと従来の 3 つのポンプの性能の比較を示す。A は圧電駆動のダイヤフラム式マイクロポンプ⁽³⁾、B は外部から市販の電磁モータで駆動するトロコイドポンプ⁽²⁾、C は電磁駆動のポンプ⁽⁴⁾の特性である。B については、現在開発段階で大きなモータを用いているために定量的な比較はできないが、外部モータまで考慮すると小型化は難しい。

以上のように、比較的低電圧で動作し、電磁アクチュエータと一体になった、吐出量/ポンプ体積比の高いポンプが実現できた。今後、チェックバルブの設計を詰めることにより、さらに性能の向上が期待できる。

(平成 17 年 3 月 24 日受付, 平成 17 年 5 月 30 日再受付)

文 献

- (1) T. Kitano, S. Shoji, Y. Baba, and H. Fujita : Technology and Application of Micro Chemical chip, MARUZEN CO., pp.271-280 (2004) (in Japanese)
北森武彦・庄子習一・馬場嘉信・藤田博之: μ 化学チップの技術と応用, 丸善, pp.271-280 (2004)
- (2) Y. Yamada : "Micro pump for μ TAS", *Hydraulics & Pneumatics*, Vol.42, No.6, pp.12-16 (2003) (in Japanese)
山田嘉昭: 「マイクロ TAS 用マイクロポンプ」, 油空圧技術, 42, 6, pp.12-16 (2003)
- (3) STAR MICRONICS CO., LTD. : Diaphragm Micro Pump.
スター精密株式会社: ダイヤフラム式マイクロポンプ.
<http://www.star-m.jp/products/develop/de02.htm>
- (4) GOTECH : Electromagnetic pump
GOTECH 社: 電磁ポンプ. <http://www.gotech.ch/index1.htm>

鈴 森 康 一

(正員) 1959 年 4 月 3 日生。1984 年横浜国立大学大学院工学研究科修士課程修了。同年(株)東芝入社。2001 年まで同社, 総合研究所および研究開発センターに勤務。この間, 1990 年横浜国立大学大学院工学研究科博士課程修了。1999-2001 年財団法人マイクロマシンセンター勤務。2001 年岡山大学教授, 現在に至る。工学博士。各種アクチュエータの研究に従事。日本機械学会, IEEE 等各会員。

古 澤 宏 明

(非会員) 1982年11月26日生。2005年3月岡山大学工学部システム工学科卒業。同年4月岡山大学大学院自然科学研究科博士前期課程機械システム工学専攻進学，現在に至る。主にマイクロリアクターに関する研究に従事。日本機械学会会員。

山 田 嘉 昭

(非会員) 1942年1月6日生。1965年3月関西大学工学部機械工学科卒業。同年4月(株)化繊ノズル製作所入社。1996年Kasen USA Corp.社長就任。2002年(株)化繊ノズル製作所非常勤顧問，岡山県産業振興財団科学技術コーディネータ，現在に至る。

神 田 岳 文

(正員) 1972年6月18日生。2002年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年4月岡山大学大学院自然科学研究科助手，2003年4月岡山大学工学部講師，現在に至る。博士(工学)。主にマイクロセンサ，アクチュエータに従事。精密工学会，IEEE，日本機械学会，日本ロボット学会各会員。

永 田 卓 志

(非会員) 1980年10月3日生。2005年3月岡山大学大学院自然科学研究科博士前期課程修了。同年4月(株)オリンパス入社，現在に至る。在学中，主にマイクロリアクターに関する研究に従事。日本機械学会，IEEE 各会員。