圧電素子応用微量液送ポンプの基礎検討*

小島吉夫^{*1}, 奥沢 務^{*1}, 坪内邦良^{*1}
高木勇輔^{*2}, 浜野亘男^{*2}

Fundamental Investigation of Piezo-Element-Driven Pump Feeding a Trace of Liquid

Yoshio KOJIMA, Tsutomu OKUSAWA, Kuniyoshi TSUBOUCHI,
Yuusuke TAKAGI and Nobuo HAMANO

Generally, a peristaltic pump and a syringe pump have been used to feed about 2(ml/min) of liquid. But, as neither a continuous flow nor a low fluctuation flow can be realized simultaneously, a new type of microquantity pump is required in the field of pharmaceutical manufacturing. Therefore piezo-elements were applied to make a 2-dimensional pump suitable for multichannel and multistage pumps. The experiments have revealed that the pump successfully works and its head reaches a maximum of 18(kPa).

Key Words: Pump, Fluid Machinery, Piezo-Element, Check Valve

1. 結 言

医療および製薬の分野では、数 ml 以下の薬液などの液送処理が必要である。特に、分離分析用の機器の一つである無担体電気泳動装置では、50 チャンネル以上の生体試料を高精度で移送するポンプが要求される。従来この種の微量液送ポンプには、ペリスタポンプとシリンジポンプの 2 種類が多く用いられてきた。このうち、ペリスタポンプは、数個のローラによってチューブをしごくことで内部の液体を移送する方式である。このため、連続供給が可能であるものの、脈動率⁽¹⁾およびチューブ寿命の問題が大きい。一方、シリンジポンプはシリンジ(注射筒)をポンプとして使用するもので、低脈動で供給できるという特徴をもつ。しかし、シリンジポンプは液の排出と供給を交互に行う方式のため、二連化しなければ連続供給できないことや多チャンネル化に対応しにくいという課題がある。そこで、多チャンネル化に対応しやすく、連続低脈動

供給が可能なポンプとして、バイモルフ型の圧電素子をアクチュエータに利用した微量液送ポンプを開発⁽²⁾した。これまでに圧電素子をポンプに応用した研究について数例⁽³⁾⁽⁴⁾報告されているが、本微量液送ポンプは、積層化による多チャンネル化、および多段化による吐出圧向上に対応しやすいハード構造に特徴がある。本報では、試作した単段 1 連モデルおよび 3 段 1 連モデルの基本特性を実験的に研究した結果について報告する。

2. 記 号

D : 圧電素子の有効直径
 V : 電圧
 Q : 流量
 U : 圧電素子の変位量
 d_{31} : 等価圧電定数
 f : 圧電素子の駆動周波数
 h : 球冠の高さ
 k : 係数
 n : 圧電素子数
 r : 球の半径
 t : 圧電素子の厚さ
 ε : 滞流係数

* 平成 3 年 10 月 17 日 第 69 期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成 4 年 5 月 20 日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所機械研究所 (●317 日立市幸町 3-1-1)。

^{*2} 正員、(株)日立製作所宇宙技術推進本部 (●101 東京都千代田区神田駿河台 4-6)。

3. 微量液送ポンプの概要

3・1 微量液送ポンプの構造 図1に微量液送ポンプの構造例を示す。図は3段3連モデルの場合を示したもので、ポンプ段数は流れの方向に沿って1段、2段、3段とし、多段化することで吐出圧の増加を図れる構造とした。本ポンプ1連(3段)当たりの外形寸法は、長さ50 mm×幅20 mm×厚さ3.5 mmである。流路部には流入側、流出側とも外径1 mm、内径0.7 mmのストレート管を取付け、流出側には0.3 mmのノズルを取付けた。また、ポンプの同一段には、それぞれ2個の圧電素子を取付け、排水容積の増大を図った。通常、圧電素子は、積層型とバイモルフ型に分類されるが、ここでは、ポンプ構造を簡略化するため、変位拡大機構なしでも大きな変位量が得られるバイモルフ型の圧電素子(直径 $\phi 12$ mm×厚さ0.4 mm)を用いた。これら上下2個の圧電素子を 180° の位相差で駆動するとともに、各段の圧電素子に所定の位相差を与えることにより、内部の液体は連続的に吐出する。さらに、本ポンプでは、ポンプ室の内容積を圧電素子の変位量に近づけるために、素子の表面に凸型のシリコンゴムを取付け、上下のゴムの中央部が点接触する構造を採用した。これにより、流路部は滑らかにつながり洗浄しやすい構造となる。また、圧電素子が液体と接触することによる素子の性能低下も防止できる。さらに、ゴムの表面にはフッ素樹脂製(FEP)のフィルムを貼り付け、ゴム同士の接着防止および疎水性の向上を図った。

このように構成したポンプを積層化すれば中間の圧電素子を2チャンネルで共有できるので、多チャンネル化に対応しやすい微量液送ポンプを実現できる。

図2に、今回試作した2種類のモデルのうちの一つ、

図1 圧電素子応用微量液送ポンプの構造
(3段3連モデル)

3段1連モデルの外観写真を示す。ポンプの上端および下端には、各3個の圧電素子(図中: +)を取付けている。ポンプの流れ方向は、紙面の右から左方向であり、流出口の先端にノズルを取付けているようすがわかる。

図3に本ポンプに供試したフロート式逆止弁の構造を示す。これは、内部に設けられたポリカーボネート製のフロートの移動により流れを制御する方式の弁である。ポンプ全体の小型化を考慮し、逆止弁をポンプの流路部に実装できる構造とした。本逆止弁は、順方向の流れに対しては、フロートの後方に設けられたスリット部を通り液体は流出するが、逆方向の流れには、管内壁とフロート前方のテーパ部で流路を閉止する構造である。ここで、テーパ部の先端角度は移動性を考慮して 45° に設定した。この逆止弁をポンプの流入側および流出側の2か所に取付けた。

3・2 微量液送ポンプの駆動方法 図4に圧電素子の駆動制御方法を示す。前述のように、同一段の素子は 180° の位相差で駆動し、また、各段間の位相差は1段めの素子を基準に駆動する。すなわち、2段めは1段めを基準に $\Delta\theta_{12}$ 遅らせ、3段めは2段めを基準に $\Delta\theta_{23}$ 遅らせるような位相制御を行う。これにより、ポンプ室内の水は、流れの方向に沿って連続的に吐出する。

4. 実験装置および方法

4・1 実験装置 図5に実験装置の概要を示す。供

図2 試作圧電ポンプの外観(3段1連モデル)

図3 フロート式逆止弁の構造

試ポンプの各圧電素子は圧電素子駆動装置でそれぞれ独立に駆動制御が可能である。表1に駆動装置の仕様を示す。出力波形はく形波で、最大60Vの電圧を発生することが可能である。ここで、素子の駆動波形をく形波とした理由は、正弦波駆動と比較して、最大電圧が印加されるまでの時間が短く、大流量化が図れるためである。基準水位形成タンク内の液体はポンプで常に循環され、タンク内部のせきでその水位を一定に保つとともに、ポンプ中心と高さを合せるように構成した。タンクから流出した液体は連続的に供試ポンプに供給され、ポンプからの吐出量は重量計(電子天秤)で

表1 圧電素子駆動制御装置仕様

Wave Shape	Ractangular
Number of Channels	10
Voltage (V)	0~60
Frequency (kHz)	0~9.99
Phase Difference (°)	0~359

図4 圧電素子の駆動制御方法

図5 実験装置

測定し、結果をコンピュータに取込む方式とした。

4・2 実験方法 微量液送ポンプの基本特性として、流量および吐出圧に対する圧電素子の駆動周波数および位相差の影響を検討した。ポンプの流量は重量法で測定し、2分間の平均値で評価した。これは、時間による変動量が比較的小さいことを考慮して定めた値である。また、ポンプの吐出圧は、供試ポンプの吐出口先端にフッ素樹脂製チューブを取付け、その液面の上昇高さから求めた。この場合、タンクの水位とポンプ流出口の中心高さを同一として、吸込み高さの影響を排除するとともに、事前に液面高さに与える表面張力の影響の少ないことを確認している。なお、今回の実験では、精製水を使用した。

5. 実験結果および考察

5・1 ポンプ室の内部形状 微量液送ポンプの基本特性実験に先立ち、ポンプ室内部の凸型ゴム形状についての基礎検討を行った。実験には、曲率半径の異なる3種類のモデルを用いた。このうちの2種類は、図6に示すように曲率半径 R を変化させたもの、また、もう一つは、図示はしていないが $R=\infty$ としたモデルである。ここで、図6(a)のモデルは、曲率半径を25mmとして、ゴムの端部が流入出口の径と同一面となるように設計したものである。これにより、式(1)で定義される無次元平均ギャップ G を15とした。

$$\text{無次元平均ギャップ } G = \frac{\text{上下のシリコンゴム間の平均ギャップ}}{\text{圧電素子の変位量}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

図6 ポンプ室内部の凸型ゴム形状

すなわち、上下のシリコンゴム間の平均ギャップが圧電素子の変位量(電圧 60 V 換算, 無負荷状態)の 15 倍となる。一方, 図 6(b)のモデルは曲率半径を約 1/2 の 13 mm としたもので, この場合, 無次元平均ギャップは $G=35$ となる。なお, $R=\infty$ モデルは曲率が ∞ , すなわち, 平面としたもので $G=0$ となる。

表 2 に使用したシリコンゴムの仕様を示す。このゴムは, 主に医療, 食品用として使用されるもので, 使用温度範囲も $-55\sim 200^{\circ}\text{C}$ と広いため, オートクレープなどの滅菌処理にも耐えられ, 生体試料用ポンプに適用しても何ら問題がない。また, 架橋密度が高く機械的な衝撃による塑性変形量が小さいので, 長時間使用しても安定した微量液送を実現できる。

これらの凸型ゴムを単段 1 連モデルに取付け, 圧電素子の駆動周波数をパラメータにした予備実験を行った。その結果, $G=15$ タイプについては, 広い周波数領域で良好なポンプ性能を示した。しかし, $G=0$ タイプは, ポンプとして作動しなかった。一方, $G=35$ タイプは, ポンプとして作動はしたが, 周波数 100 Hz で 0.2 ml/min 程度の流量であり, 他の領域では全く吐出しなかった。これは, ポンプ室容積と圧電素子の変位との相関関係にあると考える。すなわち, G が小さいと圧電素子の動きが封じられ, G が大きいと十分な圧力が発生しないためと考える。したがって, 次節以降で述べるポンプの基本特性は, $G=15$ タイプの凸型ゴムを取付けた結果についてのみ説明する。

5・2 単段 1 連モデルの性能 図 7 に単段モデルの流量と圧電素子の駆動周波数の関係を示す。実験では, 電圧 60 V で圧電素子を駆動し, 逆止弁の有無による性能比較を行った。その結果, 両者とも周波数の高い領域で良好なポンプ性能を示した。逆止弁付きポンプの流量特性は, 弁を取付けたことによる抵抗増加のため, 運転領域は 100 Hz 程度狭くなるが, 流量について見ると, 周波数 250 Hz 以下の全領域で 1.5 倍程度増加し, 試作したフロート式逆止弁が有効に機能していることがわかる。また, 最大流量で比較すると, 0.7 ml/min から約 1.7 倍増の 1.2 ml/min の性能を示した。

表 2 シリコンゴム仕様

Use in Medical Production	Pasteurization
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	$-55\sim 200$
Specific Gravity	1.07
Rubber Hardness	20

図 8 に逆止弁付き単段モデルの流量と圧電素子の駆動電圧の関係を示す。ここでは, 圧電素子の駆動周波数を 50, 100, 200 Hz の 3 通りとした。いずれの周波数においても, 電圧と流量は直線関係にある。これは, 式(2)で表されるように, 圧電素子の変位量 U が駆動電圧 V に比例するためであり, ポンプの流量を電圧変化で調製可能なことを意味する。

$$U = k \cdot d_{31} \cdot (D/t)^2 \cdot V \quad \dots\dots\dots (2)$$

また, 本ポンプでは, ノズル部での流出抵抗の影響により, 駆動電圧が 25 V 以下の領域ではポンプ機能をもたない。

ここで, 簡易的な理論モデルによるポンプ流量の算出を試みる。まず, 圧電素子の表面に取付けているシリコンゴムの体積 S は, 球冠の式で求めることができる。

$$S = 1/3 \cdot \pi \cdot h^2 \cdot (3r - h) \quad \dots\dots\dots (3)$$

この圧電素子に一定の電圧を加えると, 素子およびシ

図 7 単段モデルの流量と周波数の関係

図 8 単段モデルの流量と電圧の関係 (逆止弁付き)

シリコンゴムは変形を生じ、ポンプ室内の液体量は増減する。ここで、ポンプ室の液体を排出する方向に圧電素子を変形させた場合のシリコンゴムの体積量 S' を求める。ここで、計算を簡単にするため、ゴムが一様に変形すると仮定すれば、

$$S' = 1/3 \cdot \pi \cdot (h')^2 \cdot (3r' - h') \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $h' = h + U$ 、 $r' = r + U$ である。このシリコンゴムの体積の差 ($S' - S$) が、圧電素子が1回振動するごとに排出される量である。圧電素子の変位量については、前述した無負荷状態でかつ片持支持方式とした場合、供試圧電素子の変形量 U は $16.6 \mu\text{m}$ となる。しかし、本ポンプでは、素子全周を固定支持しているため、変形量は大幅に減少する。これを、簡易的にはりのモデルと仮定し、変形量を求めると、片持支持方式の $1/5$ 、すなわち、 $U = 3.3 \mu\text{m}$ となる。ここで、本ポンプの構造から、圧電素子の変位量だけでは上下のシリコンゴム全体が密着することはないので、ポンプ室内に流入した液体がすべて送出されることはなく、液体の滞流係数を ε とすると、

$$Q = \varepsilon \cdot n \cdot f \cdot (S' - S) \dots\dots\dots (5)$$

で表すことができる。

図9に、圧電素子の駆動周波数と滞流係数 ε の関係を示す。図からもわかるように、ポンプに流入した液の $1/4$ 以下しか送出されず、しかも周波数の増加に伴い滞流係数 ε は低下する。これは、簡易理論モデルでは流路部の管路抵抗について取扱っていないこと、および弾性体であるシリコンゴムの収縮率を考慮していないことなどが原因であると考えられる。

図10に単段モデルの吐出圧と圧電素子の駆動周波数の関係を示す。図にも見るように、逆止弁なしでは全領域で $0.2 \sim 0.3 \text{ kPa}$ 程度の吐出圧しかもたない。一方、逆止弁付きのポンプでは、周波数が 50 Hz 以下の領域では約 9 kPa の吐出圧をもち、逆止弁による吐出圧の向上効果を確認できた。しかし、周波数が 100

Hz 以上の領域では、ほとんど吐出圧をもたないことがわかった。この原因は、逆止弁内のフロートが液面上昇量測定用チューブ内の水圧の影響を受け、フロートの動きが圧電素子の駆動周波数に追従できなくなるからである。その結果、両者の同期が取れず還流する量が増加したものである。これにより、試作したフロート式逆止弁の最大吐出圧時における周波数応答性は 50 Hz 付近にあると推定する。

5.3 3段1連モデルの性能

図11に逆止弁なし3段モデルの流量と駆動周波数の関係を示す。ここでは、ポンプ各段間の位相差をパラメータとし、1-2段めの位相差 $\Delta\theta_{12}$ と、2-3段めの位相差 $\Delta\theta_{23}$ を同じ値に設定して実験を行った。その結果、位相差を大きく与えるほど流量が増加するとともに、高い周波数領域でもポンプ機能をもつことがわかった。このうち、位相差 90° における最大流量は 1.2 ml/min となり、逆止弁付き単段モデルと同等の流量を示した。しかし、高周波数で駆動した場合、ポンプの脈動低減には有効であるが、一方では素子の振動音増加や低寿命化につ

図10 単段モデルの吐出圧

図9 滞流係数と周波数の関係

図11 3段モデルの流量と周波数の関係 (逆止弁なし)

図 12 3 段モデルの流量と段間位相差の関係(逆止弁付き)

ながること、またポンプの構成要素であるシリコンゴムや逆止弁などの応答性も考慮すると、低脈動を保持できる範囲で低い周波数で駆動することが好ましく、コストを考慮すると電源周波数の 50~60 Hz が望ましい。

図 12 に逆止弁付き 3 段モデルの流量とポンプ各段間位相差の関係を示す。ここでは、周波数を 50, 100 Hz の低領域に設定し実験を行った。いずれの場合も、位相差 10° でわずかなピークをもつが、全体的には位相差が増加すると流量は低下する傾向をもつ。しかし、流量の絶対値は、単段モデルと比較して大幅に増加している。例えば、周波数 100 Hz における最大流量は約 2 倍の 2.5 ml/min となり、ポンプの多段化は流量の増加にも有効であることがわかった。

図 13 に逆止弁付き 3 段モデルの $Q-H$ 特性を示す。ポンプの吐出圧は、圧電素子の駆動周波数が小さいほど良好な性能を示し、周波数 10 Hz における最大吐出圧は 18 kPa となる。この値は、単段モデルの約 2 倍に相当し、ポンプの多段化による吐出圧向上の効果を確認することができた。なお、ポンプの吐出圧は、ポンプの各段間にも逆止弁を設けることで、さらに向上可能と考える。

これら 3 段 1 連モデルの実験結果から、ポンプの多

図 13 3 段モデルの $Q-H$ 特性(逆止弁付き)

段構造は、ほぼ同位相で駆動制御することにより、当初予想した吐出圧向上に加え、流量の増加にも有効であることがわかった。

6. 結 言

多チャンネル化に対応しやすく、連続低脈動供給が可能なポンプとして、圧電素子を応用した微量液送ポンプを開発し、試作した 2 種類のモデルを用いて、その基本特性を実験的に検討した結果を以下に要約する。

(1) ポンプ室内部の凸型ゴム形状は、ポンプ性能発揮のポイントであり、試作した形状の中では、上下のゴム間の平均ギャップを圧電素子の変位量の 15 倍としたものが良好な性能をもつ。

(2) ポンプの多段化は、流量および吐出圧の増加に有効であり、3 段 1 連モデルは、単段 1 連モデルの約 2 倍の性能をもつ。

(3) 3 段 1 連モデルは、各段間を同位相で駆動制御することにより、最大流量 2.5 ml/min, 最大吐出圧 18 kPa の性能を示す。

(4) ポンプの流量は、圧電素子の駆動電圧と一次関数であるため、電圧変化による流量調整が適する。

文 献

- (1) 内山・ほか 3 名, 分析化学, **36**-1, (1987), 54.
- (2) 小島・ほか 3 名, 機講論, Vol. 62 C, (1991), 580.
- (3) 江刺, 応用物理, **60**-3, (1991), 227.
- (4) MIYAZAKI, S., ほか 2 名, *IEEE-MEMS Workshop*, (1991), 283.