

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月19日現在

機関番号：32644

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22700513

研究課題名（和文） 新しいバルブレス輸液ポンプの開発

研究課題名（英文） Development of new valve-less transfusion pump

研究代表者

榎谷 和義 (Kazuyoshi Tsuchiya)

東海大学・工学部・准教授

研究者番号：50399086

研究成果の概要（和文）：申請者らは、ポンプを構成する個々の小型化を回避するために、バルブなどの構成部品数を最小限に抑えたバルブレスマイクロポンプの開発を試み、その基礎技術を固めた。本提案のマイクロポンプは、管路一体の構成をとり、簡易な構造でありながら流動制御パラメータが多く、様々な使用環境に適したポンプ設計が可能となる。そこで本研究では、小型化が可能な同ポンプを「新しいバルブレス輸液ポンプの開発」に適応し、未解決であったその流動性の高機能化と流量制御法の構築とその向上を目的とした。その結果、中空管マイクロポンプの進行波理論式の構築により、振幅と実験での流量との相関性の確認と、進行波理論振幅値 $y(t)$ の増加による制御性の確認から、その最適化から様々な使用環境に適したポンプ設計が可能となった。

研究成果の概要（英文）：In order to avoid the miniaturization for all micro parts to constitute a pump, the main researcher in this project has developed the valve-less micropump on the basic stage. The proposed micropump has a simple structure, which has some numbers of smart material parts such as a piezoelectric material mounted on the liquid flow tube as a power source. However, there are many parameters to control the liquid flow amount by the micropump so that it can be operated at various environmental uses. In this research, the micropump is applied to the transfusion pump and we focused on the investigation of the outstanding problems such as the highly functional flow ability and precise flow control of the liquid. As the results, it was confirmed that the correlativity of amplitude and the flow rate in the experiment finds good agreements with the increase in progressive wave theoretical amplitude value $y(t)$ by construction of the progressive wave theoretical formula of the valve-less micropump.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000円	600,000円	2,600,000円
2011年度	1,100,000円	330,000円	1,430,000円
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000円	930,000円	4,030,000円

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：医用システム

キーワード：機能性材料，アクチュエータ，バルブレス，マイクロポンプ，輸液

1. 研究開始当初の背景

現在、様々な現場でポンプの使用が見られるが、各種使用用途・環境に応じてそのスペックは異なる。特に医療ポンプにおいて、薬剤輸液としての使用割合が多く、精密な送液機能を満足する必要がある。ここで一般に、点滴に見られる自由落下にて送液するフリーフロー方式、また液送に流動機構を必要とする液送ポンプには、ペリスタポンプとシリンジポンプの3種類に大別することができる。これらの使用用途としては、輸液ポンプ、特に点滴静脈注射としての需要が大きい。ゆえに医療用ポンプとしての使用は、体内に挿入する薬剤量、およびその速度が重要であるがゆえ、そのポンプは上記のパラメータを正確に制御する必要がある。ここで、ペリスタポンプには小型化、耐久性、高性能化が仮題であり、またシリンジポンプには、注入速度の安定性、低流量精度、狭速度レンジに仮題がある。

厚生労働省の医療事故調査によれば、全体の3割を超える事故が輸液ポンプによる医療事故であると報告されており、上記の課題を克服した輸液ポンプの開発が急務である。ここで、堀内(工学院大学)らは、点滴口傾斜角と液滴体積に関係があることを明らかにし、点滴口の傾斜角度を加速度センサにて計測することで液滴体積を補正し精度向上を行っている。しかし、ポンプと制御装置を一体化することが望まれることから、小型化に課題がある。一方では、神野ら(京都大学)によるダイヤフラム式があるが、基板上に微小な流路を設計・加工し、その上にゴム等の弾性体を接着して封止し、その上に設置した圧電素子で機械的な力を加え、デバイス自身に流動機能を付加した構成である。しかし複雑な流路設計を必要とし、板型以外の形状に設計・加工すること、機械的な力を液体に付加する構成上、小型化が困難であることより、多様なアプリケーションへの対応が困難であった。それ故、既存輸液ポンプの流量制御の精度が低いこと、さらにはその制御範囲の著しく低いなどの欠点を克服した「新しいバンプレス液送ポンプ」の開発が社会的な課題となった。これが本研究の着想に至った経緯である。

2. 研究の目的

本提案のマイクロポンプは、管路一体の構成をとり、超音波による液体流動のため小型化が容易、かつ流体の流速・方向制御が可能、また方向制御を迅速に行うことで流動液体の静止も可能となり、バンプレスマイクロポンプの開発が可能となる。それ故、本研究で開発がなされる「新しいバンプレス輸液ポンプの開発」の実現は、液体輸送を行う管とバンプレスマイクロポンプが一体化した簡易

なポンプが実現可能となり、社会的波及効果は絶大である。そこで本研究では、既存の輸液ポンプであるシリンジポンプは、安全面を考慮し、微量輸液(～10ml/h)の場合にて使用する。一方ペリスタポンプは10ml/hを越える輸液スピードの場合に用いる。さらに同ポンプをクロマトグラフィーの送液として用いる場合、0.1～1000ml/hの流量を満足する必要がある。そこで本研究では、既存の輸液ポンプの幅広い流速を満足し、高精度な制御が可能な新しいバンプレス輸液ポンプの開発を最終目的とする。

その実現には、

項目1: 流量制御およびその向上、さらには項目2: ポンプの高機能化を目的として、(1) 高変形可能なリング型圧電材料の形状探索、(2) 最適制御因子の探索、(3) 圧電材料の溝の加工技術の探索およびその構築、の2項目・3課題・6小課題に大別し2年間で遂行する。最後に研究総括ならびに同手法のポテンシャルを再認識し、次の展望に向けた研究の方向性を確認する。

3. 研究の方法

本研究で提案する中空管マイクロポンプの液送原理は、ミミズや腸などの運動方法である蠕動運動を模倣し、この運動によって生じた進行波を用いることで中空管内の液体を搬送するものである。中空管マイクロポンプの構造を図1に示す。進行波の発生原理として、中空管上にリング型PZT素子を等間隔に偶数個設置し、隣り合うPZT素子にそれぞれ位相の異なる交流電圧を印加することによってPZT素子を振動させ、PZT素子直下の流体に振動を伝播する。伝播された波の重ね合わせによって進行波が発生し、流体の粘性の影響により流体は初期位置からずれ、それに伴い管内の液体が搬送される。

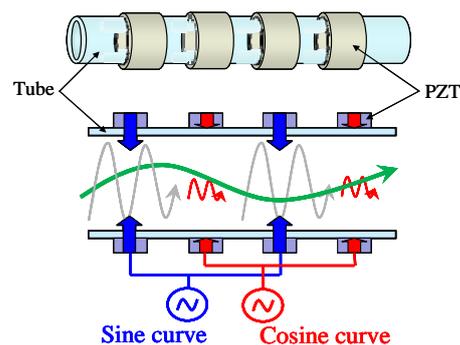


Fig.1 Diagram of tube type micropump.

小型化した中空管マイクロポンプ (Small pump) を評価するため、表1のように流動性が確認された Large pump を比較対象とする。表1に本研究で用いる Small pump と Large pump の寸法を示す。

Table1 The size of micropump.

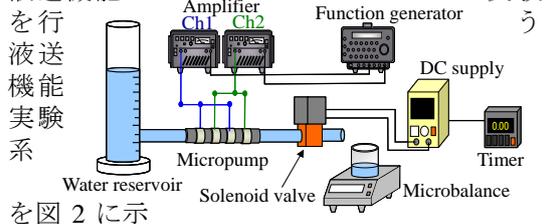
		Large pump	Small pump
Tube	Element material	Ti	
	Outside diameter [mm]	12	6
	Inside diameter [mm]	10	4
	Thickness [mm]	1	
	Length [mm]	100	
	Installation interval of PZT [mm]	15	
PZT	Element material	Bulk piezoelectric material C-9	
	Outside diameter [mm]	13.5	7.25
	Inside diameter [mm]	12.5	6.25
	width [mm]	5	
	Number of PZT	4	

本研究で用いる Small pump の PZT 素子の寸法は現在製作が可能なリング型 PZT 素子の最小径である外径 7.25 [mm], 内径 6.25 [mm], 幅 5 [mm]とし, 中空管外径は PZT 素子の寸法に合わせ, 6 [mm]とする. PZT 素子は両ポンプとも高圧電定数($d_{33}=718$ [pm/V])を示す富士セラミックス社製圧電材料 C-9 材とし, PZT 素子の個数は 4 個とする. 中空管上に PZT 素子が $m=4i+4$ 個($i=0,1,2,\dots$), 等間隔に設置されている中空管マイクロポンプ内に発生する進行波の理論モデル式を式(1)に示す.

$$y(t) = 2\sqrt{2} \operatorname{asin}\left(\frac{\pi f}{Eh} l + \frac{3}{4}\pi\right) \times \cos\left(\frac{2\pi f}{Eh} l + \omega t\right) \quad \dots(1)$$

a : Amplitude, f : Frequency, l : Installation interval, E : Young's modulus of tube, h : Thickness of tube, R : Outer radius of tube, ρ : Density of liquid, ω : Angular frequency, t : Time

Large pump と中空管外径を 6 [mm]にし, PZT 設置間隔 l , 中空管厚み h , PZT 素子の個数を Large pump と同様にした Small pump の液送機能



を行なう. 初期流量(1.0 [ml/s])となる一定の高さから流体を 20 秒間供給し, PZT 素子に交流電圧を印加してマイクロポンプを駆動させた場合の流量を 5 回測定する. 評価値は初期流量からの流量変化率とする. 評価流体は純水, ポンプへ印加するは電圧, 周波数は Ch1, Ch2 共に同振幅(40, 80 [Vp-p], マイナス側へオフセット), 同周波数で, Ch2 の位相を 90°変更する. 共振周波数は Large pump, Small pump それぞれ, 64 [kHz], 96 [kHz]である.

Fig.2 Experimental system of the flow ability.

4. 研究成果

本章では式(1)より進行波理論振幅値 $y(t)$ が最大となる小型中空管マイクロポンプの寸法を \sin, \cos 項に着目し, PZT 設置間隔 l , 中空管厚み h を数値解析にて算出し, 中空管実験結果を図 3 に示す. Small pump の流量変化率は初期流量に対して, 印加交流電圧 40 [Vp-p]時に 0.35 [%], 80 [Vp-p]時に 0.76 [%]の増加を確認した. また, Small pump の流量変化率は Large pump の流量変化率に比べ, 印加交流電圧 40 [Vp-p]時に 28.04 [%], 印加交流電圧 80 [Vp-p]時に 38.25 [%]増加した. Small pump の進行波理論振幅値 $y(t)$ は 0.81 [nm]と Large pump に比べ, 26.34 [%]向上しており, 進行波理論振幅値 $y(t)$ の増加に伴い, 流動性が向上している. しかしながら, 中空管外径を Large pump の半分にした Small pump の輸送量は十分でないため, 進行波理論モデル式内の中空管外径以外の因子に着目し, 流動性が向上する最適な中空管マイクロポンプの構造を決定する必要がある. マイクロポンプの最適化を行う.

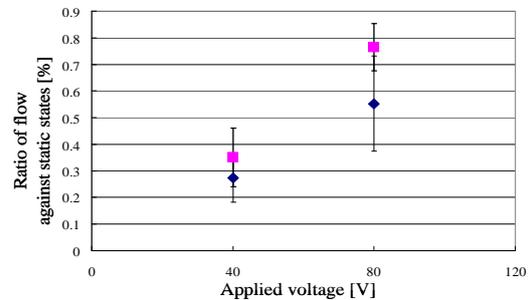


Fig.3 Ratio of flow against static states [%].

式(1)より, 進行波理論振幅値 $y(t)$ が最大となる組み合わせは, \sin 項と \cos 項がともに, ± 1 の値をとるときである. ここで, \cos 項に着目すると \cos 項は時間関数なので, ± 1 の値を交互に取りながら変化する. したがって, 進行波理論振幅値 $y(t)$ が最大となるのは, 式

a	Amplitude [nm]	1
m	Number of PZT	4
f	Frequency [kHz]	96
E	Young's modulus [GPa]	106.4
R	Outer radius of tube [mm]	3
ρ	Density [kg/m^3]	1000

(2)中の cos 項以前の sin 項が±1 または±1 近傍の値を取るときである。よって、この上記の条件を満たす PZT 設置間隔 l , 中空管厚み h の組み合わせを数値解析により算出する。ここで表 2 に数値解析に用いるパラメータを示す。

Table2 Analysis conditions.

PZT 素子の厚みは Large pump, Small pump 共に同じため, PZT 素子の変位 $a=1$ [nm]とし, Small pump の共振周波数である 96 [kHz]を用いる。

進行波理論モデル式内の sin 項の値を評価値として, Small pump の PZT 設置間隔 l , 中空管厚み h を算出する。PZT 設置間隔 l を 5 [mm]から 30 [mm]まで, 中空管厚み h を 0.1 [mm]から 2.9 [mm]まで変化させた場合の sin 項の値を算出し, 図 4 にそのグラフを示す。グラフの縦軸は評価値の sin 項の値を示す。図 4 より, sin 項の値が-1 近傍を示す PZT 設置間隔 l と中空管厚み h の組み合わせが複数確認された。そこで PZT 設置間隔 l , 中空管厚み h の関係を検討する。sin 項の値が-0.995 以下を取るとき PZT 設置間隔 l と中空管厚み h の関係は次式(2)で示される。

$$l = -23.701h^2 + 48.201h + 5.7381 \quad \dots(2)$$

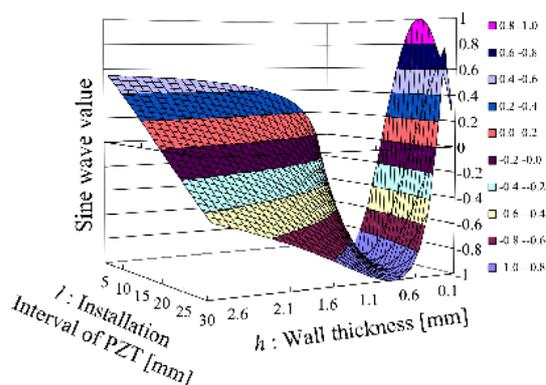


Fig.4 Sine wave value of installation interval and thickness.

中空管厚み $h=0.3$ [mm], PZT 設置間隔 $l=18$ [mm]の組み合わせとなり, sin 項の値は-0.999であった。よって、この寸法を最適な中空管マイクロポンプの寸法とする。このときの進行波理論振幅値 $y(t)$ は 2.83 [nm]と Small pump の $y(t)$ に比べ, 251 [%]向上する。上述により Small pump の初期流量に対する流量変化率は印加交流電圧 80 [Vp-p]時に 0.76 [%]の増加をしているため, 進行波理論振幅値 $y(t)$ との比を用いて最適な中空管マイクロポンプの初期流量に対する流量変化率を算出すると, 2.68 [%]となる。したがって, PZT 設置間隔 l と中空管厚み h を最適化することで, Small pump よりもさらなる流動性の向上が示唆さ

れる。

中空管マイクロポンプの小型化, 流動性向上を目的とし, 液送機能実験および進行波理論モデル式に基づいた構造設計を行い, 以下の知見を得た。

- (1) 中空管マイクロポンプの小型化による進行波理論振幅値 $y(t)$ の増加に伴い, 中空管マイクロポンプの流動性が向上していることを確認した。
- (2) PZT 素子が4個のときの進行波理論モデル式において, sin 項の値に着目することで, PZT 設置間隔 l と中空管厚み h の関係式を求めることが可能となる。
- (3) 進行波理論振幅値 $y(t)$ と流量変化率の比を用いて, 最適な中空管マイクロポンプの初期流量に対する流量変化率を算出すると, 2.68 [%]となり, Small pump よりも流動性が向上することが見込める。

今後は, 数値解析で算出した最適な中空管マイクロポンプを製作し, 流量変化率が進行波理論振幅値 $y(t)$ の増加率と対応しているか, また, 進行波理論モデル式に減衰や摩擦の項を考慮し, 流動性にどの因子がどれほど寄与するか検討する必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 7 件)

1. Design of biocompatible high piezoelectric BaTiO₃ with Additives, Kazuyoshi Tsuchiya, Yuya Akagawa, Yasutomo Uetsuji, SPIE' s International Symposium on Smart Materials, Nano-and Micro-Smart Systems in Melbourne Proc SPIE Int. Soc. Opt. Eng. Vol.8204, p. 82042A-1 - 82042A-8(2011).
2. Design of high functional ring type PZT for micropump by using FEM analysis, Eiichi Aizawa, Kazuyoshi Tsuchiya, Yasutomo Uetsuji, IEEE 2011 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science(MHS) P.279-284, 6-9 November(2011).
3. Design of High functional ring type PZT by using FEM analysis, Eiichi AIZAWA, Kazuyoshi TSUCHIYA and Yasutomo UETSUJI, International Conference on Materials Processing Technology 2011, International Conference on Materials Processing Technology 2011, Abstract

book, P.32-35(2011).

6. 研究組織

(1)研究代表者

槌谷 和義(Kazuyoshi Tsuchiya)

東海大学・工学部・准教授

研究者番号：50399086