

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：54501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820052

研究課題名(和文) 脈動流型バルブレスマイクロポンプ流路内の非対称な流動特性の評価

研究課題名(英文) Evaluation of unsteady flow characteristic in the flow channel of the valveless micropump

研究代表者

田中 誠一 (TANAKA, Seiichi)

明石工業高等専門学校・その他部局等・講師

研究者番号：00599251

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、脈動流によって駆動するバルブレスマイクロポンプに対し、内部の流動状態とポンプ性能への具体的な影響を調査する。本課題は、開発したバルブレスマイクロポンプに採用されるディフューザ形状流路の内部の流動状態を可視化およびPIVにより観測し、脈動流の駆動条件・流路形状ごとに整理、評価を行った。観測した内部流れは脈動流の吐出し過程において大きな渦が発生し、このときの渦度の2乗がポンプ性能と強い相関をもつことが明らかになった。一方、数値解析による結果からも同様の流れが確認できている。これらの結果より、無次元数で整理したポンプ性能や駆動条件と内部の流動特性を関連付けて評価することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：In this study, PIV measurement of the internal-flow for the diffuser/nozzle based valveless micropump has done. The test channels of 4.0 mm width as large size models of the developed micropump were fabricated in a PMMA plate to make PIV measurement easier. The experiments were done with the 14 types of the test channels and the various drive conditions which evaluated by the dimensionless characteristics of the developed micropump. As a result of the present study, it was found that the pump performance was improved with the growth of the vortex by flow separations in the diffuser/nozzle shaped channel. The vorticity in the channel related to the pump performance for various drive frequencies. The relations of the pump performance and the vorticity in the channel were investigated for the various channel geometries and the drive frequencies.

研究分野：流体力学

キーワード：マイクロ流体力学 マイクロポンプ 非定常流れ 流れの可視化

### 1. 研究開始当初の背景

微小領域における流れは、伝熱等の面支配の物理現象の促進や熱輸送の効率を飛躍的に改善するため、小型な熱交換器、燃料電池、化学分析装置等の開発が行われている。これらの機器開発では微小領域における流体の輸送・制御が課題となる。これまで、粘性型・バルブ型・電気浸透流型のマイクロポンプなどが既に提案・開発されている。特に汎用性の高い粘性型やバルブ型のポンプは可動部を持つため、長時間運転に対して寿命が影響を及ぼす上、複雑な構造は生産性の低下につながる。そこでバルブ排したマイクロポンプが提案され<sup>①</sup>、可動部をもつマイクロポンプに比べて長寿命、小型化への優位性が示されている。

我々はこれまで非対称な流動特性を持つディフューザ形状流路の下部から振動流を与えることで一方向流れを実現するディフューザ型バルブレスマイクロポンプを開発してきた(図1)<sup>②</sup>。このポンプは形状が単純であることから、製作が容易で低価格化が可能である。また、バルブレスであるゆえに、粒子等を含む流体を流しても致命的な損傷に至らない頑健性、作動流体を選ばず適用範囲が広い利便性、といった優位性がある。ところで、マイクロポンプを各小型流体機器に適用するためには、将来的にマイクロポンプの吐出し圧力を 40 kPa 以上にする必要がある。このような要求性能を満たすバルブレスマイクロポンプはほとんど存在しないのが現状である。

ポンプ性能の向上を行うためにポンプの動作機構を正確に把握する必要がある。そこで、3次元非定常流れの数値解析を実施したところ、複数の渦がディフューザ方向流れ(ポンプとしては逆流)を妨げていることが確認できた。また、1周期におけるポンプ入口と出口における全圧差の時間履歴から、一方向へ正味の流体輸送は周期的に非対称な圧力損失によって発生していることが分かった<sup>③</sup>(図2)。一方、民生用のデジタルカメラを用いた簡易な PIV(Particle image velocimetry)計測を試みた結果、数値解析と同様の流れが定性的に観測できた(図3)。これらの結果は、一般に粘性力支配となるマイクロ流路内においても、渦や剥離を積極的に発生させることによって流体制御が十分に可能であることを示唆している。したがって、開発したマイクロポンプの特徴的なディフ

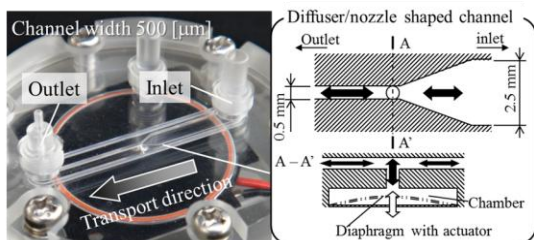


図1 ディフューザ型バルブレスマイクロポンプ

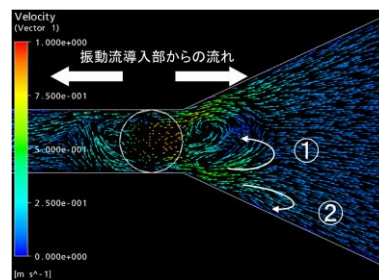


図2 CFDによるポンプ内部流れの様子(30 Hz)

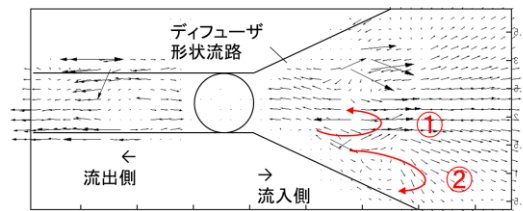


図3 簡易な PIVによる内部流の様子(10 Hz)

ューザ形状流路において、断面積の拡大方向の圧力損失を増大させることでポンプの高性能化を狙える。以上のようにこれまで、脈動流の非定常流れと流路形状による逆圧力勾配が起こす渦による非対称な流動特性が流体輸送を担っていると分かっているが、その発生条件やポンプ性能への具体的な影響など不明な点も多い。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、シンプル形状のバルブレスマイクロポンプに対し内部流路の渦や剥離の発生条件やポンプ性能への具体的な影響を調査する。本研究は、開発したバルブレスマイクロポンプに採用されるディフューザ形状流路の内部において脈動流による流動状態の変化を PIVにより観測し、脈動流の駆動条件・流路形状によって整理・評価を行う。これらの測定データをマイクロポンプの設計にフィードバックすることでマイクロポンプの性能向上・用途拡大を目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) 実験装置製作

本研究では PIV 測定を前提とした実験装置製作と CFD による流れ解析、PIV 測定による内部流れの観察および考察に分けられる。

ポンプの内部流動の観察をするにあたって、本ポンプの力学的相似を利用し、数倍の流路幅で本ポンプのディフューザ形状流路を製作する。同一の無次元周波数および Reynolds 数で実験を行えるため低い周波数(数 Hz 程度、実際のマイクロポンプは数 100 Hz 程度)で同様の流れを再現できる。このときカメラのフレーム数は数 100 fps 程度のもので十分である。

#### (2) ポンプ性能試験

駆動周波数、振幅、流路の形状によるポンプ性能の変化を測定する。ポンプに接続された圧力トランスデューサおよび流量計によ

り、流路入口・出口における圧力・流量の時間履歴を測定する。測定結果は数値解析結果と比較し数値解析の妥当性について検討を行う。

### (3) 内部流れの可視化と PIV 解析

製作した模型ポンプの実験装置を用いてポンプ内部流れの可視化を行い、得られた画像データを用いて PIV 解析を実施する。本実験では、解析方法として画像相関法を用いた。可視化実験で撮影した映像から PIV 解析ソフトによって速度ベクトル、渦度の分布を表示し、ポンプ内の流れの様子について考察した。

### (4) 数値解析

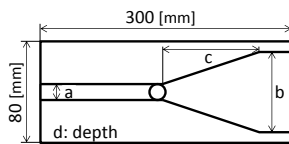
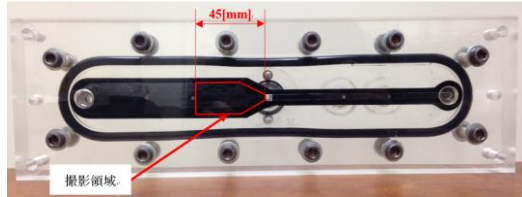
ポンプ流路をモデルに対して 3 次元非定常流れ解析を行う。計算は非圧縮性層流流れとして実施する。特に Reynolds 数が高くなる条件では乱流モデルによる解析も併せて実施しその結果を比較する。計算結果は測定結果と併せて整理する。計算に利用する汎用流れ解析ソフトは機関内で現有するものを利用する。

## 4. 研究成果

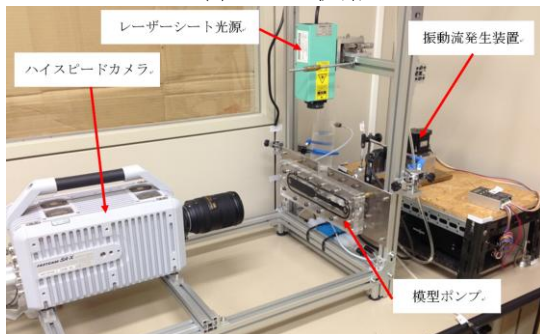
### (1) 模型ポンプ可視化実験装置

図 4 に実験装置の全体図を示す。本実験では可視化の容易さを考慮し、4 mm の流路幅（試作したマイクロポンプ流路幅は 500  $\mu\text{m}$ ）で本ポンプのディフューザ形状流路を製作した。ポンプ流路は異なる流路高さ、幅、ディフューザ長さで合計 14 種類を用意した。

実際のマイクロポンプはダイアフラムに圧電素子を使用するが、本実験で使用した模型ポンプはステッピングモータとクランク機構により振動流を与えた。圧電素子は周波数によって振幅が変化するが、ステッピング



(a) ポンプ流路



(b) 装置全体図

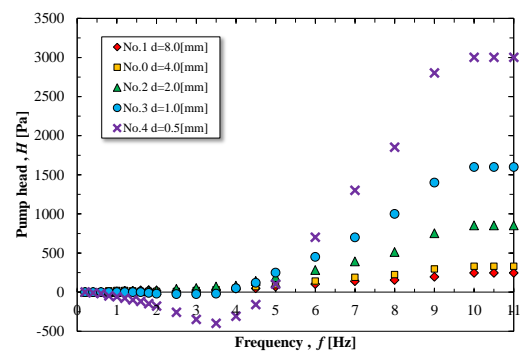
図 4 模型ポンプ可視化実験装置

モータとクランク機構を用いることで一定の振幅を保って駆動することができる。またピストンの変位をレーザ変位計で測定する。直動スライドを用いてピストンのぶれを無くし、シリンダをアクリルで作ることでシリンダ内の気泡の混入を簡単に確認できるようにした。流量は吐き出された流体の質量から、揚程はポンプ出口から繋がったチューブを立て、その中の液柱の水面とポンプ入口側に設置されたリザーバの水面の高さの差から求めた。作動流体である精製水は実験前に真空ポンプを用いて脱気を行った。

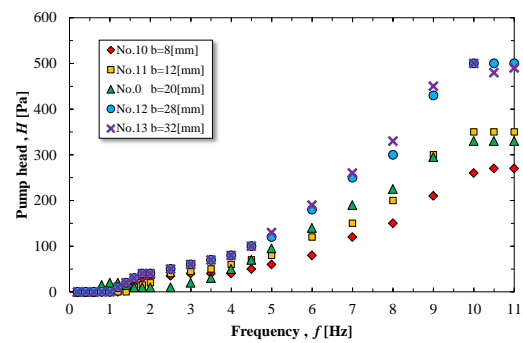
可視化の際には精製水にトレーサ粒子（粒子径 50  $\mu\text{m}$ ）を混入し、レーザーシート光源を流路横から照射した。撮影にはハイスピードカメラを用い、図で示した領域を撮影した。レーザーシート光源は流路厚さが薄い場合は流路内を十分に照らすことができなかつたためメタルハライド光源によって斜め方向から照射した。

### (2) 模型ポンプ性能試験

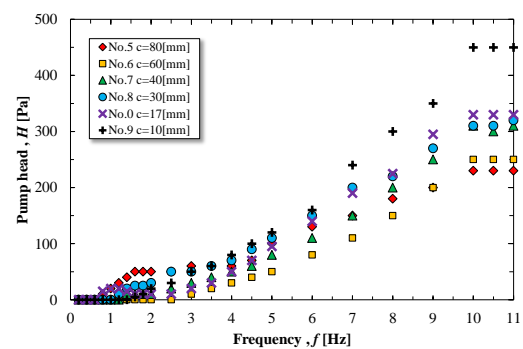
図 5 に異なる流路形状におけるポンプ揚程の周波数特性を示す。図は流路深さ、流路



(a) 流路深さ  $d$



(b) 流路幅  $b$



(c) ディフューザ長さ  $c$

図 5 ポンプ揚程駆動周波数特性



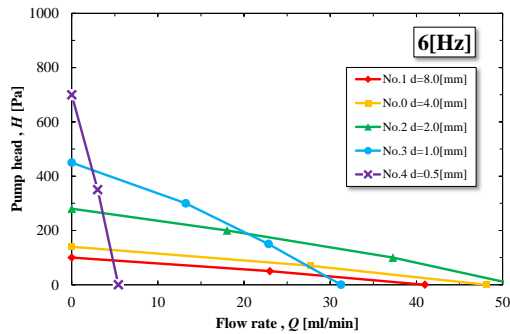


図6 ポンプ性能曲線 (異なる流路深さ)

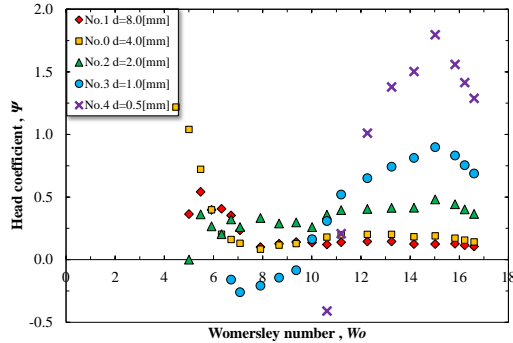


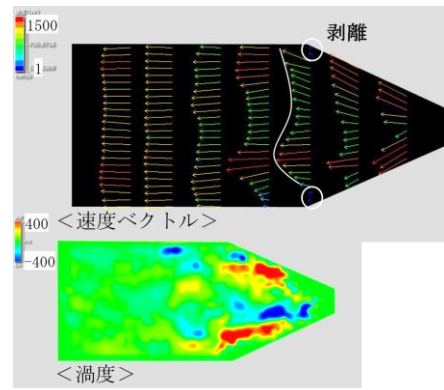
図7  $Wo - \psi$ 特性

幅, ディフューザ長さごとに示す. ポンプ揚程は流路深さに最も影響され, 次いでディフューザ長さに影響されることがわかった. また, 異なる流路深さのポンプ性能曲線を図6に示す. ポンプ性能から流路深さを変更することで流量と揚程の関係が大きく変化していることが分かる. また, 図5(a)の周波数特性を無次元数  $Wo$  数と揚程係数  $\psi$  で表したグラフを図7に示す. 無次元の特性より, 周波数に対し特に揚程の増加が確認された小さな流路高さの条件で  $Wo$  数の増加に対し  $\psi$  の増加が確認できた. この特性は従来のマイクロポンプでも確認している特性と同様の特性を示す.

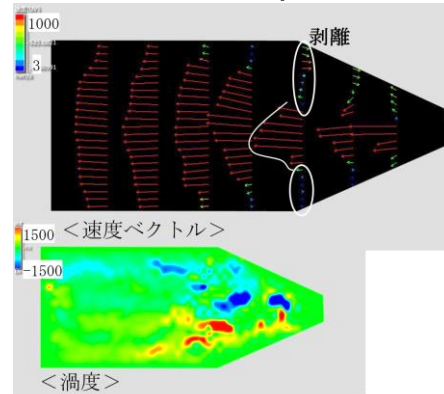
これらのポンプ特性の結果より, ポンプ内部流れの可視化およびPIV解析は駆動周波数とポンプ流路深さの違いについて詳細に検討した.

### (3) 可視化およびPIV解析

図8に流れの可視化およびPIV解析を行った代表的な結果として, 図8に流路深さが  $d = 1.0, 0.5 \text{ mm}$  の場合の速度ベクトルと渦度の分布を示す. 流れは脈動流発生装置からの周期的 (周期  $T$ ) な流れにおいて, ポンプ流路に吐出されている時間  $t/T = 0.3$  の結果である. 速度ベクトルの分布より, 流れが壁面から剥離する領域が流路厚さによって変化している様子が分かる. また, このときの渦度分布より, 発生した渦の領域と回転方向が異なることがわかる. これらの解析結果を定量的に評価するために, 渦度の2乗の1/2であるエンストロフィ  $Q$  で評価を行った. 図9に図8(a)(b)のケースの1周期における  $Q$  の最大値の時間履歴を示す. 図より, ポンプの吐出し

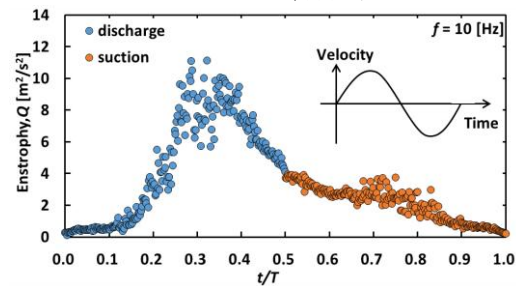


(a)  $d = 1.0 \text{ mm}, f = 10 \text{ Hz}$

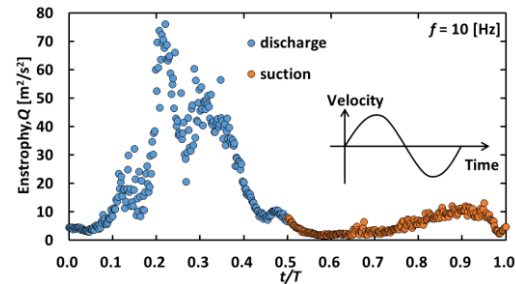


(b)  $d = 0.5 \text{ mm}, f = 10 \text{ Hz}$

図8 PIV解析結果



(a)  $d = 1.0 \text{ mm}$



(b)  $d = 0.5 \text{ mm}$

図9  $Q$  の1周期時間履歴

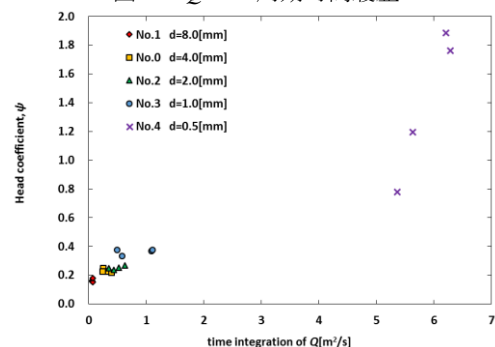
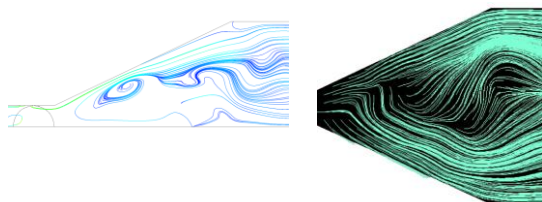


図10 吐出し過程の流路内部  $Q$  と  $\psi$  の関係

過程における渦度の高い流れがポンプの出口方向への吐き出される要因となっていると考えられる。ポンプ流路内部の渦流れの大きさを吐出し流れ  $t/T = 0 \sim 0.5$  の時間で積分した  $Q$  として評価し、ポンプ無次元性能である揚程係数  $\psi$  との関係を図 10 に示す。図より、ポンプ内部の  $Q$  とポンプ性能には明らかな相関関係があることがわかる。従って、本バルブレスマイクロポンプ流路内の非対称な流動特性の評価が可能である。

#### (4) 数値解析

数値計算に用いたモデル形状はポンプ流路部分を対称に切り出した一部を用いた。計算は非定常計算とし、ポンプ性能試験における駆動条件に合わせて境界条件を設定した。計算したポンプ性能は概ね測定値と一致したが、流量については十分に周期安定するまで計算を実施できなかったため測定値より低い値を示した。図 11 に計算したポンプ内部流れの様子と流れの可視化によって得られた流線を示す。図より、両者の流れの特徴的な流れや渦が一致していることがわかる。



(a) 数値計算 (b) 可視化実験  
図 11 ポンプ内部流れの比較 ( $f = 10 \text{ Hz}$ )

#### (5) 成果の位置づけと今後の展望

本成果は、マイクロポンプのもつ特徴的なディフューザ形状流路について、脈動流による圧力損失の非対称性の増大要因となる内部の渦やはく離の発生を可視化によって定量的に評価し、マイクロポンプの性能向上につなげようとするものである。本成果ではバルブレスマイクロポンプの流体輸送の根本である脈動流による圧力損失の発生について内部流れの渦の発生とその定量的な評価を行い、ポンプ性能との明確な相関関係について指摘した。本研究の今後の展望として、これらの結果に基づき当初の目標数値であるポンプ揚程  $40 \text{ kPa}$  を達成するポンプの開発に取り組む予定である。一方で、流路内部の非定常な渦流れについて、流路にの圧力損失の関係についてより詳細に調査する。

#### <引用文献>

- ① Stemme, E., et al., Sens. Act. A ,39 (1993), 159-167
- ② 田中ら, 機論(B), 74-738(2008), pp.323-328
- ③ 田中ら, 機論(B), 76-765(2010), pp.839-844

#### 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)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 5 件)

- ① 三宅昂平, 田中誠一, 藤原誠之, “バルブレスマイクロポンプ内部流れの数値解析”, 日本機械学会関西学生会平成 26 年度学生員卒業研究発表会, 2015 年 3 月, 京都大学 (京都府京都市)
- ② 林智宏, 田中誠一, 藤原誠之, “模型バルブレスマイクロポンプ内における非定常流の定量的理解”, 日本機械学会関西学生会平成 26 年度学生員卒業研究発表会, 2015 年 3 月, 京都大学 (京都府京都市)
- ③ S. Tanaka, K. Nakama, S., Fujiwara, and K. Miyazaki, “PIV Measurement of Internal-Flow for Valseless Micropump”, the 25th International Symposium on Transport Phenomena, 2014 年 11 月, クラビ (タイ)
- ④ 中間光太, 田中誠一, 藤原誠之, “バルブレスマイクロポンプ内部流れの可視化”, 日本機械学会関西学生会平成 25 年度学生員卒業研究発表会, 2014 年 3 月, 大阪府立大学 (大阪府堺市)
- ⑤ 田中誠一, 北子雄大, 藤原誠之, 宮崎康次, “バルブレスマイクロポンプ内部の振動流れの可視化”, 第 91 期日本機械学会流体工学部門講演会, 2013 年 11 月, 九州大学 (福岡県福岡市)

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

田中誠一 (TANAKA, Seiichi)

明石工業高等専門学校・機械工学科・講師  
研究者番号 : 00599251

##### (2)研究分担者

( )

研究者番号 :

##### (3)連携研究者

( )

研究者番号 :