

「自吸機能をもつバルブレスマイクロポンプの開発」

明石工業高等専門学校機械工学科

田中 誠一

1 研究の背景と目的

伝熱分野や混合・反応を必要とする分野に微小領域流れを応用すると、熱や物質の拡散距離が小さくなるため、これまでにない高い冷却性能の熱交換器や、極めて反応の早い分析機器が実現可能となる。そこで、微小領域の流体輸送を担うマイクロポンプの開発が課題となり、これまで粘性型・バルブ型・電気浸透流型などのマイクロポンプが提案されてきた。中でも可動部を排したバルブレスマイクロポンプは、耐久性、小型化への優位性が示されている⁽¹⁾。また、申請者は、単一の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た(図1)⁽²⁾。マイクロポンプを小型分析機器等に搭載して運転する場合、使用試薬量削減や利便性向上のため、ポンプ内部に液体が満たされていない状態からでも自ら液体を吸い込み、輸送を開始する自吸機能が必要である。ここでの自吸機能とは、作動流体を気体とした場合にも一定の吸込み圧力を発生することだけでなく、流路が液体で満たされる際に発生する気泡を、滞留することなく排出する機能が必要となる。本マイクロポンプはチャンバーを持つため、起動時のチャンバー内への液体の充てん、さらに気泡がチャンバー内に滞留せずに排出されるかが要点となる(図2)。

本研究では、申請者らが開発したディフューザ型バルブレスマイクロポンプを基礎に、自吸機能をもつバルブレスマイクロポンプを実現する。

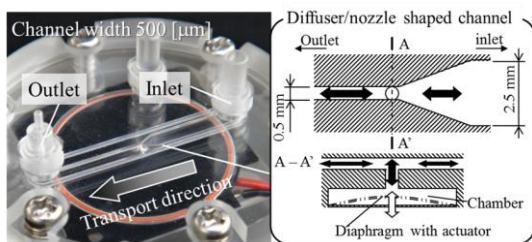


図1 ディフューザ型バルブレスマイクロポンプ

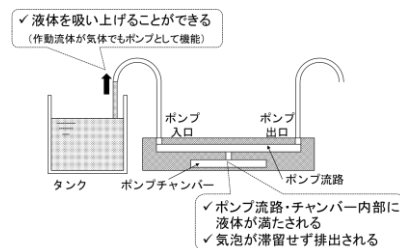


図2 バルブレスマイクロポンプにおける自吸機能

2 研究方法・研究内容

本研究期間における目標は、ディフューザ型バルブレスマイクロポンプの自吸機能の実現である。ディフューザ型バルブレスマイクロポンプの自吸機能の付加による高機能化を目指して以下の項目について実施した。

2.1 数値解析

本マイクロポンプの流路モデルに対して3次元非定常流れ計算を行う。シミュレーション結果から流れの可視化及び、圧力・流速の時間変化を詳細に求める。この解析により、顕著な現象が確認できる条件において計測を中心的に行うこととする。

2.2 実験用ポンプの製作

既存のディフューザ型バルブレスマイクロポンプを流路幅 100 [μm]程度に小型化して製作を行う。製作はマイクロリソグラフィなどの微細加工技術を用いず、アクリル樹脂の切削加工によって行う。流路加工専用仕様に変更した卓上NCフライス盤を用意する。

2.3 ポンプ性能試験

製作したポンプを用いてポンプ性能試験を実施し、空気の輸送を確認する。

2.4 気泡排出性、気泡混入許容性

チャンバー内の流れを半径方向に等しくする目的で断面形状に富士山形状をもつチャンバーを製作し、気泡排出性を確認する。ポンプ内の空気が排出される様子を観察し、

より効率の良く排出する形状を検討する。

3 研究成果

3.1 数値解析

図3に示すようにポンプ入口、出口、流入出部、壁面にそれぞれ境界条件を与え、汎用熱流体解析ソフトを用いてポンプの内部流れを数値解析する。y方向に対する流れは対称なものと仮定し、解析時間を短縮させるためにXZ平面に面を設け対称境界を与えた。図4に作成した計算モデルを示す。

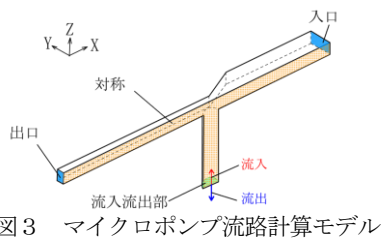


図3 マイクロポンプ流路計算モデル

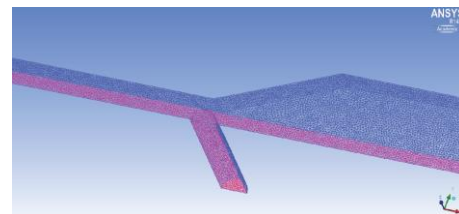


図4 計算メッシュ

計算結果を図5に示す。計算における駆動条件は60 [Hz]、流路出入口の圧力差は0 [Pa]とした。計算結果より、流路の振動流流入流出部から流れが流入した時刻において流路内部で複雑な渦流れが発生し、圧力損失が増大して流体を輸送していることがわかった。一方の流出時の場合には流路に沿った流れとなっている。また、本計算によって、数100 [Hz]程度までは安定したポンプ性能が得られる可能性が示された。

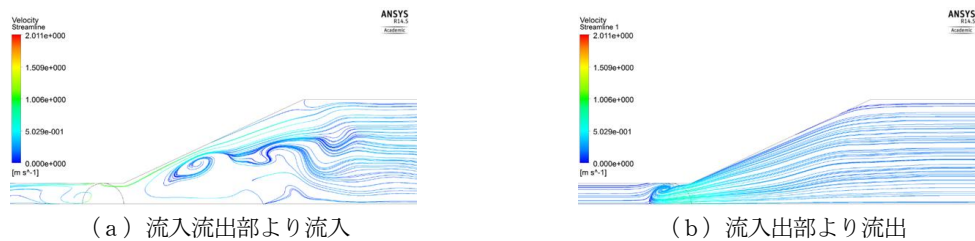


図5 流路内部流れ計算結果 (作動流体: 水, 流速振幅: $v_a = 0.456$ [m/s], 駆動周波数: $f = 60$ [Hz])

3.2 実験用ポンプの製作

マイクロポンプ流路製作用に比較的安価な卓上フライス盤を用いた。標準仕様から高精度な電動スピンドルとボールねじによるxyz軸移動仕様に変更した。アクリル切削に適した加工条件を試行によって決定し、図7のように流路を製作した。加工条件や取り付け方法によってより小さな流路の加工条件について検討中である。

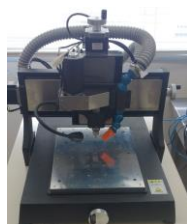


図6 流路製作用卓上NCフライス盤



図7 製作した流路 (幅500 [μm])

3.3 ポンプ性能試験

ポンプの自吸機能の付加のため、流路内部を空気で満たされている場合の吸込み圧力について確認した。図8は、ポンプ内部を空気で満たしたときの入口側の吸込み圧力と周波数の関係を示す。このとき、300 [Vpp]の電圧振幅で異なる波形を持つ信号を投入した。図より、矩形波210 [Hz]の場合で49.7 [Pa]の吸込み圧力が確認できた。

この吸込み圧力では、例えば水を5 [mm]程度吸い上げる程度となる。実際に、ポン

プより低い位置に設置されたタンクから組み上げることは困難であったが、同一の高さにタンクを設置し表面張力で管内に液が止まっている状態ではスタートが可能であった。

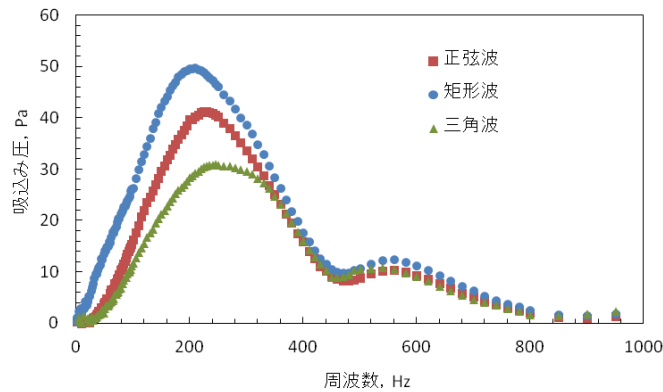


図8 周波数-吸込み圧の関係 (作動流体: 空気, 異なる波形)

3. 4 気泡排出性、気泡混入許容性

(1) チャンバー内の流れに着目したチャンバー形状の提案

ポンプチャンバー形状を検討するためにチャンバー内の流れの概略図を図9に示す。このときの半径方向の流速 $u(r)$ の関係を式(1)に示す。

$$u(r) = \frac{1}{2\pi r z(r)} \frac{dV_{rR}}{dt} = \frac{w_{\max} \omega}{2r z(r)} \left(\frac{R^2}{2} - r^2 \left(1 - \frac{r^2}{2R^2} \right) \right) \cos(\omega t) \quad (1)$$

ここで、 w_{\max} はダイアフラム中心における振幅、 R はチャンバー半径、 ω はダイアフラムの駆動角振動数 ($\omega = 2\pi f$, f は駆動周波数)、 t は時刻である。チャンバー内の気泡の排出には、気泡に作用する抗力が表面張力より大きくなる必要がある。しかし、図9のようなチャンバー高さ z_0 が半径方向で一定の場合、式(1)に示すようにチャンバー外周付近では流速が低くなり、気泡が滞留しやすい。気泡を効果的に揺動させるために、チャンバー内で半径方向流速が等しくなるようチャンバー高さ z_0 を r に対して変化させる。式(1)を変形することにより求めたチャンバー高さ z_0 の分布を図10に示す。

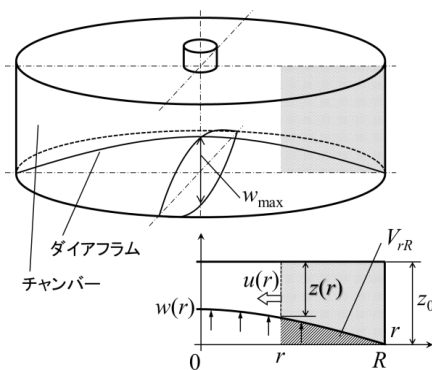


図9 チャンバー内流れの概略図

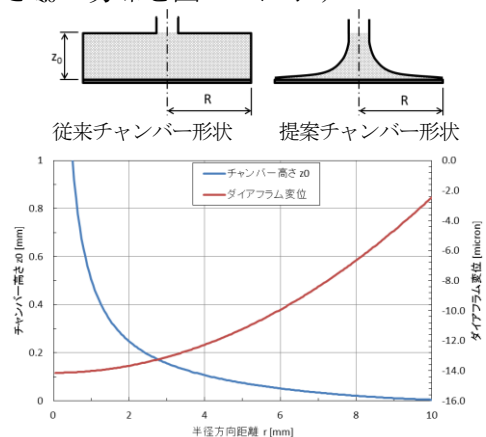


図10 式(1)より得られたチャンバー高さ分布

(2) 気泡排出性の確認

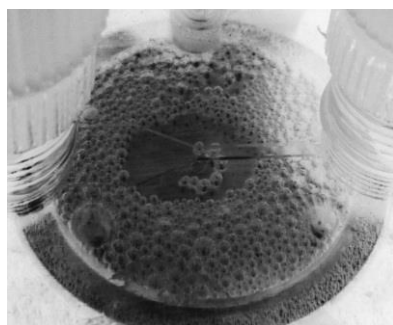
ポンプが流体を自吸後に安定して動作するためには、チャンバー内に液体が充てんされ、気泡がチャンバー外に排出される必要がある。そこで、流路まで液体が満たされた状態からポンプを駆動させ、チャンバー内の空気が排出され液体で満たされるかを観察

した。液体は工業用精製水とした。表1に結果を示す。また、図11に従来形状と提案形状の水の充てん後の様子を示す。Case1では、提案した形状において、高い周波数でチャンバー内に水が充てんされる様子が確認された。Case3ではポンプが駆動している状態ではどの周波数においても水の充てんが確認できた。よって、チャンバーの形状変更によって、チャンバー内の空気は効率よく排出され水で満たされることが確認できた。特に、Case1の高い周波数の条件ではチャンバー内に水が満たされた後、安定してポンプが連続運転を開始した。

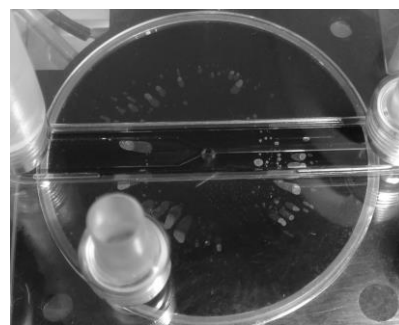
表1 チャンバー内の液体充てん観察結果

駆動周波数 [Hz]	Case 1 出入口両端を開放した状態		Case 2 入口から液を押し出した状態	
	従来形状	提案形状	従来形状	提案形状
0 (停止)	×	×	×	×
1	×	△	×	○
2	×	△	×	○
5	×	△	×	○
10	×	△	△	○
30	×	○	△ (図10 (a))	○ (図10 (b))
60	×	○	△	○

○：気泡が排出されチャンバー内に水が充てんされる。
 △：チャンバー内に水が充てんされるが、気泡が滞留する。
 ×：チャンバー内に水が充てんされない。



(a) 従来チャンバー形状



(b) 提案チャンバー形状

図11 運転後のチャンバー内の様子

4 生活や産業への貢献および波及効果

本研究によって、ディフューザ型バルブレスマイクロポンプの吸い込み性能が確認され、新しいチャンバー形状の提案によって運転開始時に必要な気泡の排出性が確保された。本成果によってバルブレスマイクロポンプの用途拡大が見込める。特に、マイクロ熱交換器、燃料電池、小型分析機器の高性能化・小型化について、その実現が切望されており、ポンプをはじめ、周辺流体機器の小型化が急務である。本研究のマイクロポンプは利用先の性能に合わせた設計が可能であるため、これらの機器の発展に貢献できると考えられる。

(1) D. J. Laser, et al., J. Micromech. Microeng. 14 (2004) pp.35- 64

(2) 田中ら, 機論(B), 74-738(2008), pp.323-328