

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：32678

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25889057

研究課題名(和文) シンセティックジェットを利用したマイクロポンプの開発

研究課題名(英文) Development of the micro pump using synthetic jet

## 研究代表者

西部 光一 (NISHIBE, Koichi)

東京都市大学・工学部・講師

研究者番号：10707277

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、流体輸送及び混合促進機能を併せ持つ新しいマイクロポンプ開発にむけた基礎的研究として、小型化・軽量化に適したシンセティックジェットを利用したジェットポンプ(ファン)の性能特性について、数値計算並びに実験の両面からの解明を試みた。主に、ポンプ内部の流れ場と性能曲線に与えるシンセティックジェットの駆動条件とポンプ幾何形状の関係について調べた。さらに、連続噴流を利用した従来型ジェットポンプとの同異について議論した。

研究成果の概要(英文)：It is proposed that a new jet pump (fan) using a synthetic jet which has both fluid transport and enhancement of fluid mixing function. In addition, the present study clarifies the performance characteristic of the pump (fan) by conducting an experiment and numerical simulations. As the main results, it is found that the effect of relation between the driving condition of the synthetic jet and the pump geometry on the flow pattern inside the pump duct and the performance curves. Furthermore, the these results are compared with that of the pump using a continuous jet.

研究分野：流体工学

キーワード：流体機械 噴流 シンセティックジェット 振動流

### 1. 研究開始当初の背景

今日に至るまで噴流研究には長い歴史があり、空気の壁で空間を仕切るエアカーテン、ロケットや航空機等の推力生成および境界層・失速制御など日常生活から航空宇宙分野まで幅広く応用されている。その中でも、噴流を駆動流体としたジェットポンプは古くから使用され、その効率向上に関して盛んに研究も行われてきた。ジェットポンプはスロットから流体をスロット内に噴射し、同時に周囲の流体を吸引して駆動流体と共に吐出するポンプである。特徴として、回転部などの可動部が無く、構造が簡単である為に信頼性・安全性の面から原子炉緊急冷却用ポンプ等に使用されている。しかしながら、駆動源である連続噴流生成には遠心ポンプ等の大型回転機械が用いられ、システム全体としては複雑になることから、昨今の地球的課題である省エネルギー化の推進を実現するために与えられている小型化・軽量化の要求を十分に満たしているとは言い難い。

そこで、近年、連続噴流の代替としてシンセティックジェットが注目され、盛んに研究が行われている。シンセティックジェットとは噴出と吸引を交互に繰り返すことで、スロット出口での時間平均速度・流量がゼロであるにもかかわらず、出口付近で渦対あるいは渦輪が形成され、下流ではエントレインメントにより連続噴流と類似の速度分布・実質流量が生成される流れである。アクチュエータにはダイアフラム、スピーカ、ピエゾ素子、プラズマアクチュエータなど、回転部が無いため小型化・軽量化に適している。これまでの研究では、翼負圧面にアクチュエータを取り付け、翼の失速制御が行なわれてきた他、シンセティックジェットの発生条件や生成メカニズム等の基本流動特性の解明もしている。その一方でシンセティックジェットを駆動源としたポンプ及びミキサーに関する研究例は殆ど無く、詳細なポンプ性能評価や性能に対する幾何形状の影響に関しては全く検討されていないが、プラントむけジェットポンプをはじめ、 $\mu$ TAS(Micro Total Analysis System)、マイクロ宇宙推進器の燃料供給、医療用流体輸送器など様々な分野での応用が予想される。

### 2. 研究の目的

上述の通り、シンセティックジェットを利用したポンプは様々な分野において応用が期待されるにも関わらず、シンセティックジェットの原理に基づくジェットポンプについての研究は殆ど見られない。したがって、応用時に極めて重要であるポンプの性能特性と流れ場との関係には未だに不明な点が多く残され、そのために流体機械としての最適な駆動条件やポンプ形状に関する議論もなされていない。本研究はシンセティックジェットを利用したマイクロポンプ・ミキサー開発のための基礎的研究であり、ポンプ性能に影響を及ぼすシンセティックジェットの振動条件とポ

ンプ幾何形状の関係について、実験と数値シミュレーションの両面から解明を試みる。さらに、連続噴流を駆動源とした従来型のジェットポンプの特性との同異についても議論する。なお、本研究では実験を容易にするため作動流体を液体の代わりに空気としたジェットファンの流動特性について議論する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 実験装置及び方法

本実験で用いた実験装置の概略を Fig.1 示す。作動流体には空気、シンセティックジェット・アクチュエータにはスピーカ (Diecook D-15L) を使用した。スピーカには二次元ノズル (スロット幅  $b_0 = 5 \text{ mm}$ , 高さ  $H_0 = 100 \text{ mm}$ ) が取り付けられており、流路上下端にはアクリル板が配されているため、ノズル近傍では概ね二次元流れとみなすことができる。本実験装置の流路高さは  $H = 100 \text{ mm}$ , 入口流路幅は  $W_{in} = 25 \text{ mm}$  であり、ダクト流路幅  $W_s = 25 \text{ mm}$  である。したがって、ここではスロット幅とダクト幅の比  $W_s / b_0 = 5$  の結果について報告する。また、ポンプ出口幅  $W_{out}$  を  $0 \text{ mm}$ ,  $6 \text{ mm}$ ,  $12.5 \text{ mm}$ ,  $18 \text{ mm}$ ,  $25 \text{ mm}$  と変更することで流量  $Q$  を調整した。シンセティックジェットは、シグナルジェネレータ (MCP LG1100D) とアンプ (classic Pro V3000) によりスピーカを駆動することで生成されている。本研究では  $y/b_0 = \pm 17.5$  を便宜上のポンプ入口、下流  $x/b_0 = 30$  をポンプ出口と定義して 2 点の差圧を微差圧計 (岡野製作所 DMP3000) で計測することにより吐出圧  $\Delta P$  求めた。流量  $Q$  は便宜上、 $x/b_0 = 37$  において I 型熱線流速計 (KANOMAX 0251R-25) により計測した速度  $U_{out}$  に出口断面積  $A_{out}$  を掛けて求めた。本研究では、スロット出口代表速度  $U_0 = 7.5 \text{ m/s}$ , レイノルズ数  $Re = U_0 b_0 / \nu = 2400$  ( $\nu$ : 粘性係数) での結果を示す。また、結果については無次元ストローク  $L_0 = l / b_0$  ( $l$ : ストローク), 流量係数  $\Phi = U_{out} A_{out} / b_0 H_0 U_0$ , 圧力係数  $\Psi = \Delta P / 0.5 \rho U_0^2$  ( $\rho$ : 作動流体の密度) を用いて整理した。

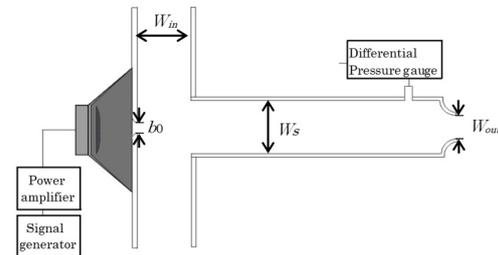


Fig. 1 Experimental apparatus

#### (2) 数値シミュレーション

数値シミュレーションには、非構造格子系熱流体解析システム SCRYU/Tetra for windows (ソフトウェアクレイドル) を用いた。乱流モデルには  $k-\epsilon$  モデルを採用し、2 次元非圧縮非粘性流れを仮定して流れ場の解析を行った。Fig.2 にシンセティックジェットを利用したポンプ (ファン) モデルの計算領域及び境界

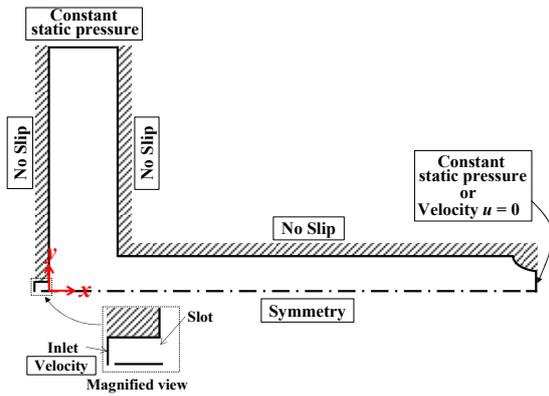


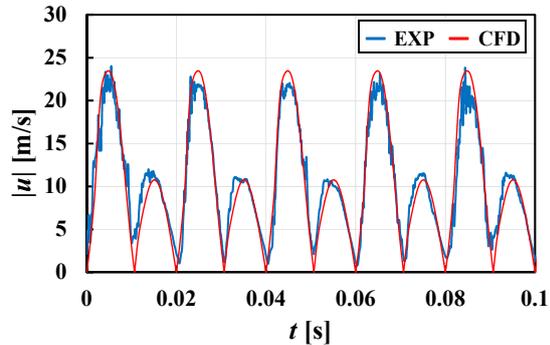
Fig. 2 Numerical simulation domain and boundary condition

条件を示す. 境界条件としてスロット (駆動体出口) とゼロ流量時における装置出口では流速規定を与え, 被駆動体入口部とゼロ流量時以外での装置出口では圧力規定 (大気圧一定), スロット中心線上では対称境界, その他の固体表面は滑り無し条件とした. なお, 本研究では実験条件に合わせてレイノルズ数  $Re = 2400$  で計算を行った. 全体のメッシュ数は約 130,000 である.

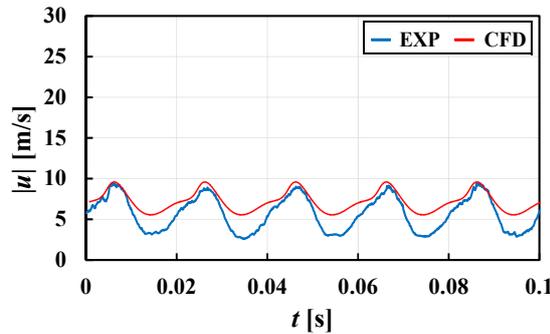
#### 4. 研究成果

Fig.3 に無次元ストローク  $L_0 = 30$ , 無次元ポンプ出口幅  $W_{out}/b_0 = 2.5$  の条件下で実験並びに数値解析により得られた噴流中心位置 ( $y/b_0 = 0$ ) における  $x$  方向速度の絶対値  $|u|$  の時間波形を示す. (a), (b) はそれぞれスロット出口近傍 ( $x/b_0 = 0.6$ ), 装置出口 ( $x/b_0 = 37$ ) の位置で計測された結果である. 本図でのシンセティックジェット振動数は 50 Hz であり, 周期は 0.02 s となる. スロット出口近傍の (a) では噴出過程における正の流速と吸引過程における負の流速が交互に与えられるが, 絶対値  $|u|$  を示した本図では噴出過程の大きな山と吸引過程の小さな山の繰り返しとして観察される. したがって, 大きな山のピークとピークの間隔が 0.02 s を示している. (a)  $x/b_0 = 0.6$  の位置では実験, 数値解析ともに吸引時の最大流速絶対値 (小さい山の最大値) は噴出時 (大きい山の最大値) の約 1/2 になっており, 実験結果と数値解析結果が良好に一致していることがわかる. (b) 装置出口  $x/b_0 = 37$  に対する結果では, 速度絶対値時間波形の周期が 0.02 s として読み取れる. すなわちこの位置ではシンセティックジェット吸引過程においても流れの向きが変化することなく, 速度  $u$  は常に正を示すことがわかる. 実験結果と数値解析結果とは定性的に一致しているものの, 定量的には差異が見られる. 実験では下流に行くにしたがって二次元構造が崩れるのに対して, 数値解析では計算領域全体で二次元流れを仮定していることが主な原因のひとつとして考えられる. ポンプ性能としては, この速度波形の差異はエントレインメントの違いと捉えることができる.

Fig.4 に数値解析で得られた時間平均ベクトルおよび時間平均圧力分布を示す. この時



(a) Slot exit ( $x/b_0 = 0.6$ )



(b) Exit of the experimental device ( $x/b_0 = 37$ )

Fig. 3 Velocity waveform along the centerline ( $L_0 = 30, W_{out}/b_0 = 2.5, \Phi \approx 2$ )

のレイノルズ数は  $Re = 2400$  (シンセティックジェット, 連続噴流ともにスロット出口速度は  $U_0 = 7.5$  m/s) で無次元ポンプ出口幅は  $W_{out}/b_0 = 2.5$  である. (a) は  $L_0 = 30$ , (b) は  $L_0 = 150$ , (c) は連続噴流に対する流れ場であり, このとき結果として得られた流量係数はそれぞれ  $\Phi = 2.3, 2.0, 1.4$  (連続噴流の場合, 総流量は噴流流量の 1.4 倍) であった. 時間平均をした本ベクトル図では, いずれの場合においても噴流構造がダクト内でも確認でき, 下流になるにしたがって噴流幅が増加する様子が伺える. また, ダクト入口付近には渦領域が観察される. ベクトル図と圧力分布を対比すると, スロットから下流になるほど, 噴流幅が増加し, それとともに静圧回復する過程が確認でき, (a), (b), (c) とも噴流幅がダクト幅と概ね等しくなる位置で最大圧力を示している. ただし, 最大圧力となる位置は (a), (b), (c) の順に下流側へ移っていることがわかる. なお, (a), (b), (c) の吐出圧力係数はそれぞれ,  $\Psi = 0.72, 0.68, 0.26$  となっており, シンセティックジェットの  $\Psi$  は同程度, 連続噴流の  $\Psi$  はシンセティックジェットの値の 4 割程度であった. 連続噴流 (c) のダクト内での挙動と広く知られている自由噴流の挙動を比較すると, 噴流幅の拡大角 (拡大率) に明白な違いは認められない. 一方, シンセティックジェットの無次元ストロークが異なる (a)  $L_0 = 30$  と (b)  $L_0 = 150$  の流れ場を比べると, (a) の噴流幅拡大角は (b) よりも大きく, それに伴い (a) はより上流側で静圧回復している様子が観察できる. このことは自由噴流状態のシンセティックジェットにおいて,  $L_0$  が小さくなるにしたがって噴流幅拡大角が大きくなるという過去の研究報告と対応

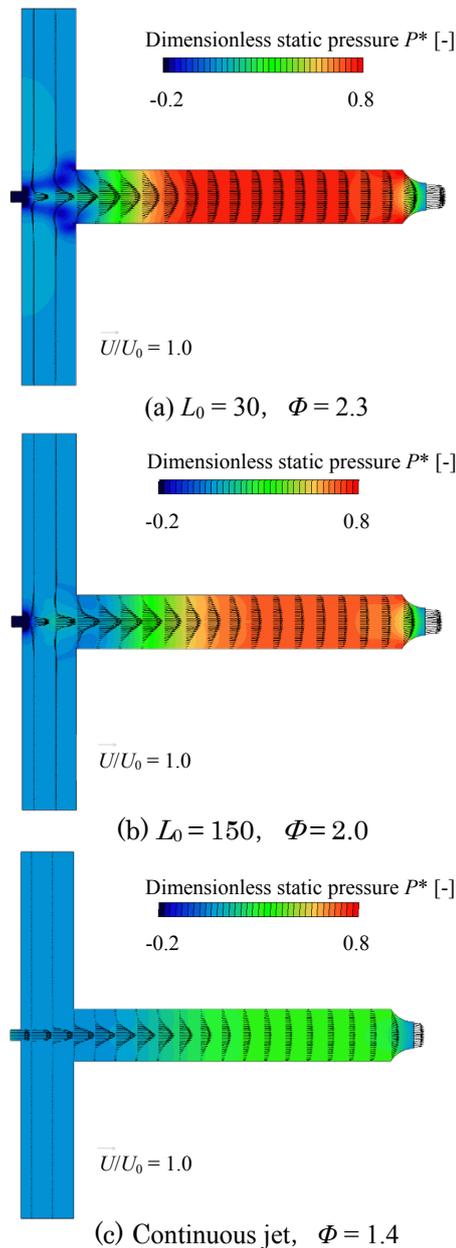


Fig. 4 Time-mean velocity vectors and static pressure distribution ( $W_{out}/b_0 = 2.5$ ) している．ところで、シンセティックジェット(a), (b)と連続噴流(c)の流れ場を比較すると、スロット近傍の様子が異なっている．本図において、連続噴流ではスロット近傍の逆流領域が極めて限定的であるのに対して、シンセティックジェットでは正味の流量がゼロであることから、スロット近傍に大きな逆流領域が形成され、時間平均で見るとこの逆流（上流側に向かう流れ）により噴流構造の平均流が生成されていることがわかる．なお、本研究では正味の流量がゼロであるシンセティックジェットと流量を伴う連続噴流を同一代表速度の下で比較している．そのため、両者では吸引流量が大きく異なり、必要エネルギーにも差異があるものと考えられる．ポンプ性能を比較する上で揃える条件等については、今後検討が必要である．

Fig.5 は  $Re = 2400$  の条件において実験および数値計算より得られたシンセティックジ

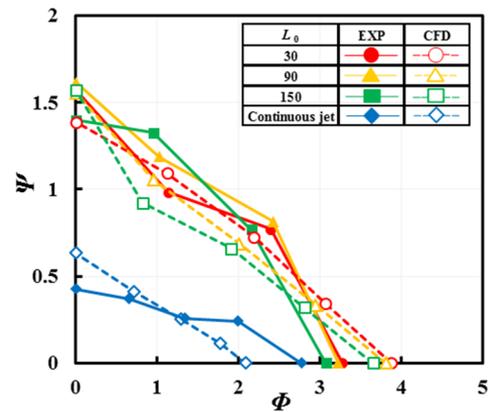


Fig. 5 Static pressure – flowrate performance curves

ェットを利用したジェットポンプの性能曲線である．なお、図中には連続噴流を駆動源とする従来型ジェットポンプの結果も併せて示す．本図からシンセティックジェット  $L_0 = 30, 90, 150$ 、並びに連続噴流のいずれの場合も概ね単純な右下がり特性を示していることがわかる．同一流速条件下でのシンセティックジェットと連続噴流の結果を比較すると、シンセティックジェットの値が連続噴流の値を大きく上回っており、ゼロ流量でのシンセティックジェットの  $\Psi$  は連続噴流の  $\Psi$  の2倍程度に達している．また、シンセティックジェットの性能曲線は  $L_0$  にわずかに依存するものの、本条件範囲では明白な違いは確認できない．最大流量時における実験結果でも同様の傾向を示しているが、性能曲線に及ぼす  $L_0$  の影響の詳細については今後の検討課題である．

#### 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)

[雑誌論文] (計 1 件)

① Koichi Nishibe, Tamio Fujiwara, Hiroshi Ohue, Hideki Takezawa, Kotaro Sato and Kazuhiko Yokota, Synthetic jet actuator using bubble produced by electric discharge, Journal of Fluid Science and Technology, 査読有, Vol.9 (2014), pp.1-12, DOI 10.1299/jfst.2014jfst0033.

[学会発表] (計 4 件)

① Konosuke Sasaki, Koichi Nishibe, Tamio Fujiwara, Hiroshi Ohue and Kotaro Sato, Influence of Oscillation Characteristics on Synthetic Jet Structure, International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (ICJWSF2015), 2015.6.16, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sverige.

② Tomoaki Ishizawa, Kotaro Sato, Koichi Nishibe and Kazuhiko Yokota, Performance Characteristics of A Fan Using Synthetic Jets, International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (ICJWSF2015), 2015.6.16, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sverige.

③ 牛窪一樹, 西部光一, 富士原民雄, 大上浩, 佐藤光太郎, シンセティックジェットポンプのための基礎的研究, 日本機械学会第92期流体工学部門講演会, 2014.10.25, 富山大学, (富山市)

④ Naoya Takahashi, Koichi Nishibe, Tamio Fujiwara, Hiroshi Ohue and Kotaro Sato, Influence of the characteristics of Velocity Oscillation at the Exit on the Flow Structure of Synthetic Jets, 16th International Symposium on Flow Visualization (IFSV16), 2014.6.24, Okinawa Convention Center, Okinawa

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

〔その他〕

研究室ホームページ :

<http://www.fel.me.tcu.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西部 光一 (NISHIBE, Koichi)  
東京都市大学・工学部・講師  
研究者番号 : 10707277