

報告日 2019年(令和元年) 6月28日

報告者 東京工業大学 理工学研究科 博士後期課程(平成30年9月修了)

浮田 貴宏

1. 研究概要

(和文)

(1)課題名(日本語)

微粒子励振型制御弁の多チャンネル化に関する研究

(2)研究者氏名

浮田 貴宏, 東京工業大学, 理工学研究科, 博士後期課程

(3)研究概要(日本文)

微粒子励振型制御弁は小型だが2ポートの流量制御弁であるため, 油圧アクチュエータの制御には複数個必要である. 本研究ではより小型な制御系の実現を目的として, 微粒子励振制御弁による複数出力ポートの独立制御の有効性を評価した. 複数の出力ポートの独立制御には, 各ポートの固有振動数の違いを用いる. 本制御弁の出力ポートは振動子を形成しており, 共振により開口する. そのため, 各ポートの固有振動数が異なると, 駆動周波数の違いでポートを独立制御できると期待される. そこで長さの異なる片持ち梁状の出力ポートを複数試作し, 駆動周波数を掃引する実験において, それぞれのポートを独立して制御することに成功した. これにより, 駆動周波数による複数出力ポートの独立制御の有効性を示した.

(4)キーワード

油圧, 流量制御弁, マイクロメカニズム, 圧電素子, 共振

(英文)

(1) Research title

Study on the Small Multi-Channel Particle Excitation Control Valve

(2) Name of researcher with title of position

Takahiro Ukida, Doctoral student, Graduate School of Science and Engineering,
Tokyo Institute of Technology

(3) Summary

Particle excitation control valves are 2-port flow control valves. Although they are small, they cannot control hydraulic actuators by one unit. In this research, we developed a multi-channel particle excitation control valve to make a smaller control system. Outlet ports of the valves which form vibrators are opened by resonant vibration. Therefore, the outlet ports of the valves are controlled independently by each resonant frequency when the valve have multi outlet ports whose natural frequencies are different. In order to verify the mechanism of independent port control, we have fabricated the prototype

valve, which has two different length cantilever type outlet port. In an experiment to sweep driving frequency, we have succeeded to control each outlet port independently. This result indicates the feasibility of the independent outlet port control of the particle excitation valves.

(4) Key Words

Hydraulics, Flow Control Valve, Micro-Mechanism, Piezoelectric Element, Resonance

2. 本研究の意義・特色

ロボットのような移動体に油圧を用いる場合、システムを構成する機器の重量は重要な要素である。微粒子励振型制御弁は小型・軽量・ノーマリークローズタイプの流量制御弁であり、ロボット等への応用が期待される。

これまでの微粒子励振型制御弁には入出力ポートが 1 箇所ずつであり、油圧アクチュエータを制御するためには複数の制御弁使用が必要となる。これら複数使用された制御弁の機能を 1 箇所に集約することができれば、システムとしてより小型の制御弁を実現することができる。また、ポートを制御する方法に振動を用いたため、1 箇所の振動アクチュエータ（圧電振動子）で多数のポートを制御できるという特徴がある。

3. 実施した研究の具体的内容、結果（本文）

本研究では、微粒子励振型制御弁の出力ポート多チャンネル化による制御弁の設計として、有限要素法によるモーダル解析、CFD による弁内の圧力分布の計算を行い、試作機の評価として、駆動周波数による出力ポートの流量測定を行った。

3. 1. 微粒子励振型制御弁の動作原理

微粒子励振型制御弁は、オリフィス前後の差圧と圧電素子の振動によって制御弁を開閉させる流量制御弁である。その構成は、オリフィス、微粒子、圧電素子からなり、単純な構造という特徴を有する。図 1 に本研究で用いた動作原理を示す。円筒状の振動子の先端にオリフィスが配置され、円筒を通った先に出力ポートがある。弁体となる微粒子は制御弁内に封入されており、弁内に圧力が印加されるとオリフィス上の弁座まで吸引されてオリフィスを塞ぐ。微粒子を弁座から移動させる力には、振動により微粒子に発生する慣性を用いる。外部に配置された圧電素子の振動が伝達された円筒状の振動子は片持ち梁のようにたわみ方向に振動し、微粒子に慣性を発生させる。圧力により弁座に押し付けられる力以上の慣性が微粒子に発生すると、微粒子は弁座から離れる。これにより、オリフィスを通して流体が流れる。開口に必要な振動速度は高く、振動子が共振した場合に限り、制御弁は開口する。そのため、複数の出力ポートそれぞれが異なる固有振動数で設計されると、駆動周波数の変化で出力ポートを独立制御できる。

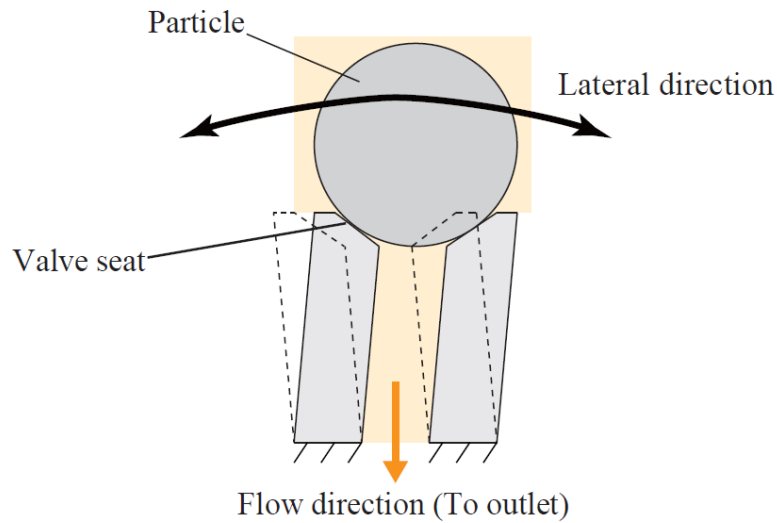


図 1 たわみ振動を用いた微粒子励振型制御弁の動作原理

3. 2. 設計

設計方法として、出力ポートと圧電素子の配置、1箇所出力ポートが共振した際のほかの出力ポートの振動状態、出力ポートが開いた際に発生する弁内の圧力低下について検討した。

本制御弁の動作には圧電素子による振動が用いられる。振動を圧電素子から各ポートに伝達する配置には、各ポートの振動方向と圧電素子の振動方向と同一方向にした図 2 に示す構造を用いた。この配置では圧電素子の振動を各ポートへ均等に伝搬され、一方のポートのみ開口が容易という状態を避けられる。また、出力ポートの形状には、円筒状振動子を用いた。これは複数のポートを集積しやすく、各ポートの固有振動数を振動子の長さで容易に設計できるからである。

本研究では、この振動子の長さを 0.1 mm 刻みで変更した出力ポートを 9 個製作した。製作した出力ポートの形状を図 3 に示す。この出力ポートは交換できるように、制御弁のボディにねじで固定できるようにした。出力ポートを図 2 に示した配置となるよう具体的に圧電素子と各ポートの配置を示した概念図を図 4 に示す。

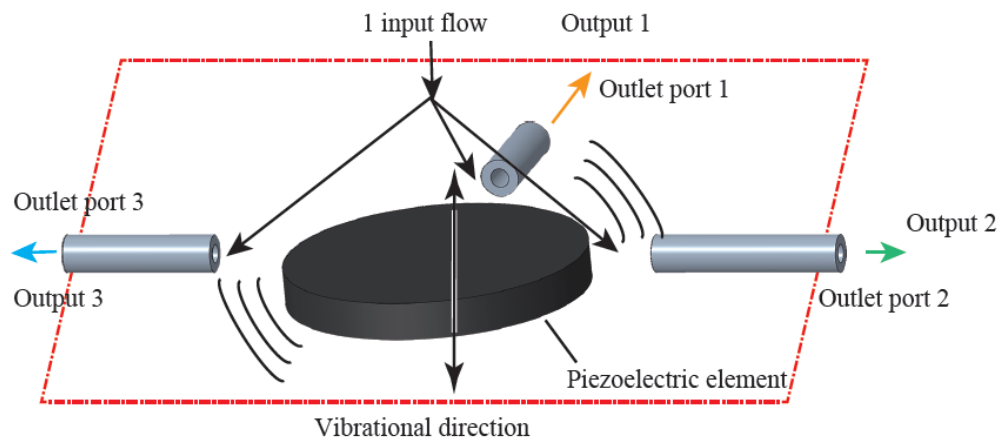


図 2 圧電素子と出力ポートの配置

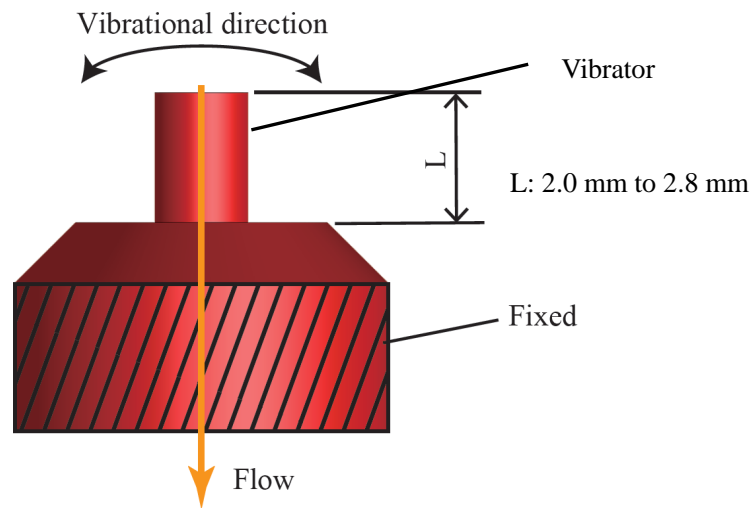


図 3 出力ポートの形状

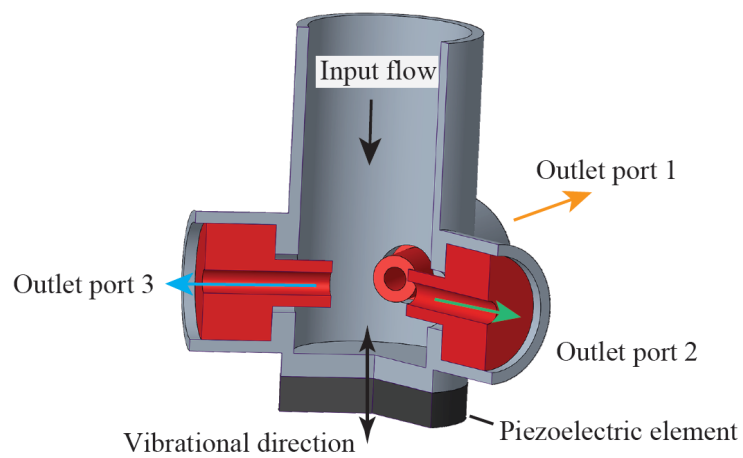


図 4 多チャンネル構造の概念図

これらの構想をもとに 2 箇所出力ポートを有する制御弁を試作した。試作された制御弁を図 5 に示す。六角柱状の本体の側面に 2 箇所出力ポートが配置される。制御弁の寸法は外径 31.2 mm、高さ 28.0 mm、質量は 88.6 g である。構造部の材料には、ステンレス鋼 (SUS303) を使用する。駆動に用いる圧電素子には、縦 4.0 mm、横 14.5 mm、厚さ 0.2 mm のチタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) を 8 枚使用する。PZT は、同形状に加工された厚さ 0.1 mm のリン青銅 (C5210) と交互に積層され、予圧用ネジにより固定される。

図 6 にモーダル解析による計算結果を示す。解析には、直径 1.2 mm の微粒子と弁座が一体となって振動するモデルを用いた。2 箇所出力ポートには、例としてそれぞれ梁の長さが 2.0 mm と 2.8 mm の振動子を取り付けられた。一方の弁座が振動する周波数では、他方の弁座が振動していないことが確認できる。表 1 に 1 箇所出力ポートが単独で駆動するそれぞれの共振周波数を示す。

加えて、入力ポートにホース用継ぎ手を接続したモデルについても計算を行った。制御弁のみの解析結果と同様に振動子のみが振動する振動モードがあり、その共振周波数の変化は 1%以内であった。ただし、振動子の長さが 2.5 mm の場合には、継ぎ手を含む制御弁の固有振動数と一致し、振動子以外の箇所も振動する結果となった。

次に出力ポートの開口に伴う制御弁内の圧力低下について、検討する。一方の出力ポートが開口すると、制御弁内の圧力は低下する。この圧力低下が大きい場合、その他の出力ポートを塞ぐ微粒子の押し付け力が低下し、すべての出力ポートが開口する。そこで、制御弁の入力ポートに接続されたホース継手から制御弁の出力ポートまでの流路で発生する圧力低下を計算した。CFD による計算の結果を図 7 に示す。ここで、供給圧力は 1 MPa とした。

開口されたポートが完全に開口した場合、もう一方の出力ポート周辺の圧力は供給圧力の 80%に低下する。図 6 の結果では、駆動されていない振動子先端の振幅は、もう一方の 2%以下であった。出力ポートの開口に必要な振動加速度はどちらのポートも等しいとすると、一方のポートが開口する動作電圧では、もう一方のポートは開口しないことが示された。

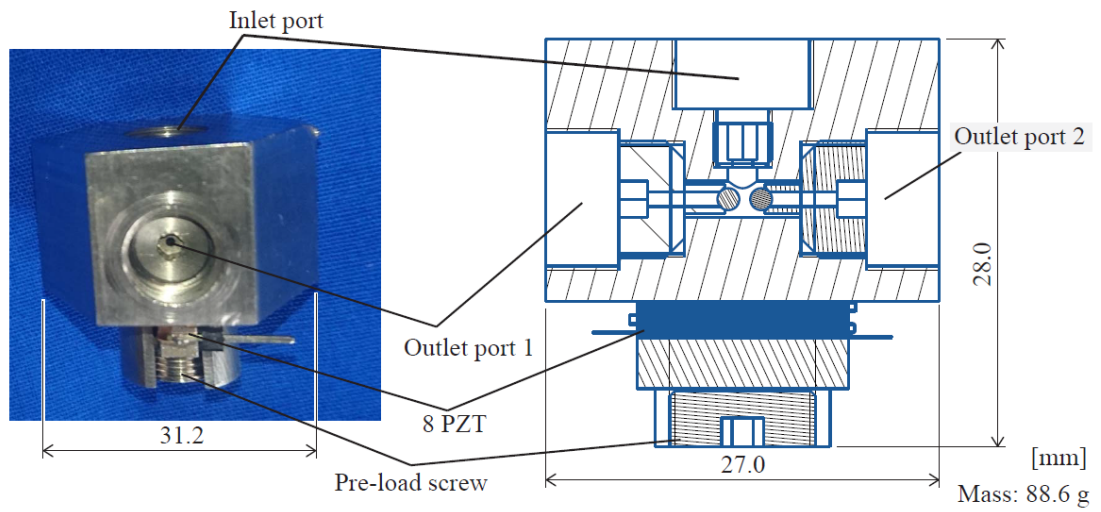


図 5 試作制御弁の外観図および断面図

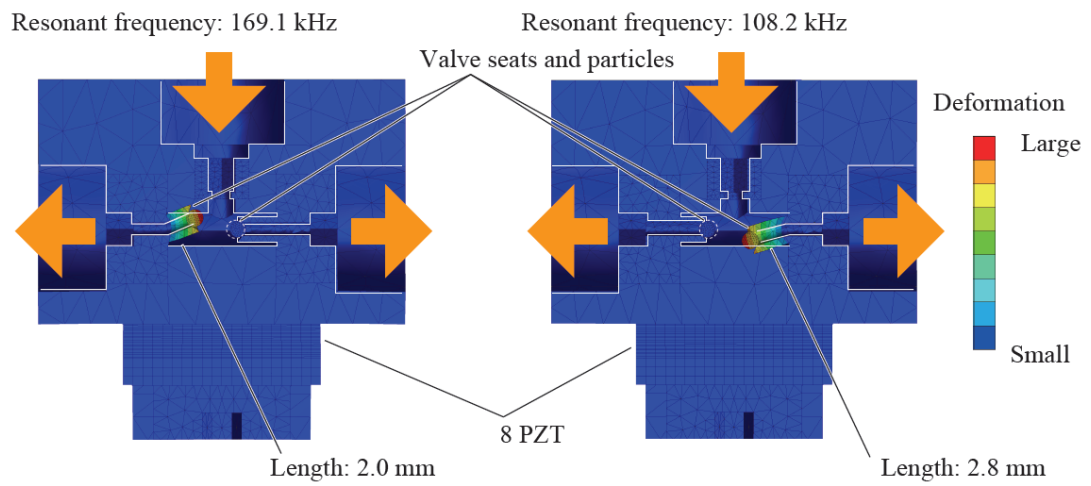


図 6 モーダル解析の結果. 左図：左出力ポートのみ振動，右図：右出力ポートのみ振動

表 1 出力ポートの振動子の長さと同共振周波数

Length [mm]	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
Frequency [kHz]	169.1	158.9	150.6	142.8	135.0	128.6	122.8	114.1	108.2

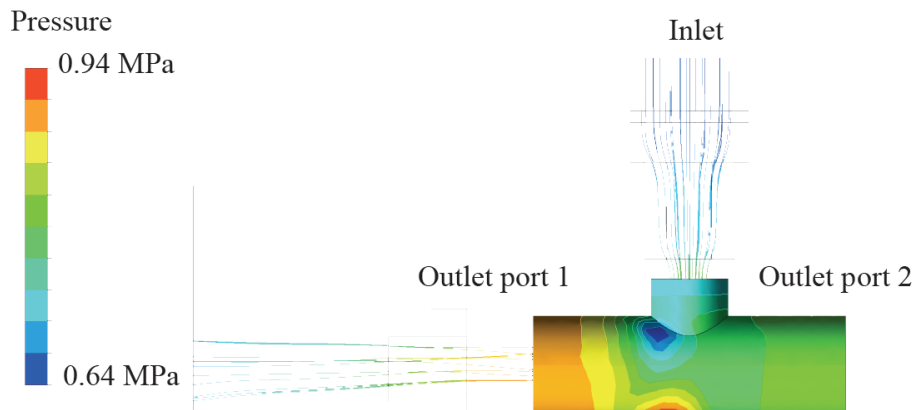


図 7 開口に伴う制御弁内の圧力低下

3. 3. 独立制御の動作実験

試作した制御弁を用いて、出力ポートの独立制御を評価した。実験では出力ポートに振動子の長さが異なる 2 種を様々な組み合わせで取り付け、出力ポートの組み合わせによる動作への影響を評価した。評価方法には駆動周波数を掃引した際の流量を測定する方法を用いた。

2 箇所出力ポートの内、ポート 1 に梁の長さが 2.5 mm の振動子、ポート 2 に梁の長さが 2.7 mm の振動子を実装した際の流量変化を図 8 に示す。作動流体には動粘度 $10 \text{ mm}^2/\text{s}$ のシリコンオイルが用いられ、0.1 MPa の圧力で印加された。振幅 $110 \text{ V}_{\text{pp}}$ の電圧の周波数を掃引した結果、ポート 1 は 121 kHz、ポート 2 は 141 kHz でそれぞれ独立して開口することに成功した。それぞれの流量を比較すると駆動周波数 121 kHz の最大流量が、駆動周波数 141 kHz の最大流量の 5 倍多かった。

この原因には継ぎ手を含む制御弁全体の振動の影響が推測される。121 kHz 付近の周波数では、その他の振動子でも開口が多く確認された。このことは、振動子の長さに関係なく振動子が大きく振動したことを示す。振動子の長さが 2.5 mm のモーダル解析の結果で述べたように、121 kHz 付近には継ぎ手を含めて制御弁全体が振動する振動モードがある。このことから、この周波数では制御弁全体が振動した結果、振動子のみの共振で発生する振動より高い振動が発生したと考えられる。高い振動速度によって大きな慣性が発生した微粒子はより遠くオリフィスから離れ、流量は増加した。

動作周波数についてモーダル解析の結果と比較すると、解析結果はそれぞれ 114.1 kHz および 128.6 kHz であり、最大 13 kHz の誤差が発生した。どちらも実際の動作周波数より低い結果となったが、この理由には作動流体の影響のほかに微粒子とオリフィスの接触状態が挙げられる。

ある程度大きな振動が出力ポートに発生した場合、数 ml 以下の非常に少ない流量が発生することがある。このとき、微粒子と弁座は接触しているが、完全に固定されていない

い状態になる。この状態では、微粒子は弁座に固定された状態と離れた状態の中間の状態となるため、共振周波数は微粒子が離れた状態に近づくと推測される。微粒子が弁座から完全に離れた場合、振動子の固有振動数は高くなるため、駆動周波数が高くなるという実験の結果と傾向が一致する。

なお、振動子の組み合わせによっては、図 9 に示すように、2 箇所のポートが同時に開口する現象が発生した。出力ポートが同時開口する現象はどの振動子の組み合わせでも同じ周波数帯で発生した。そのため、この現象は 2 箇所のポートが同時に振動する制御弁全体の共振が原因と考えられる。

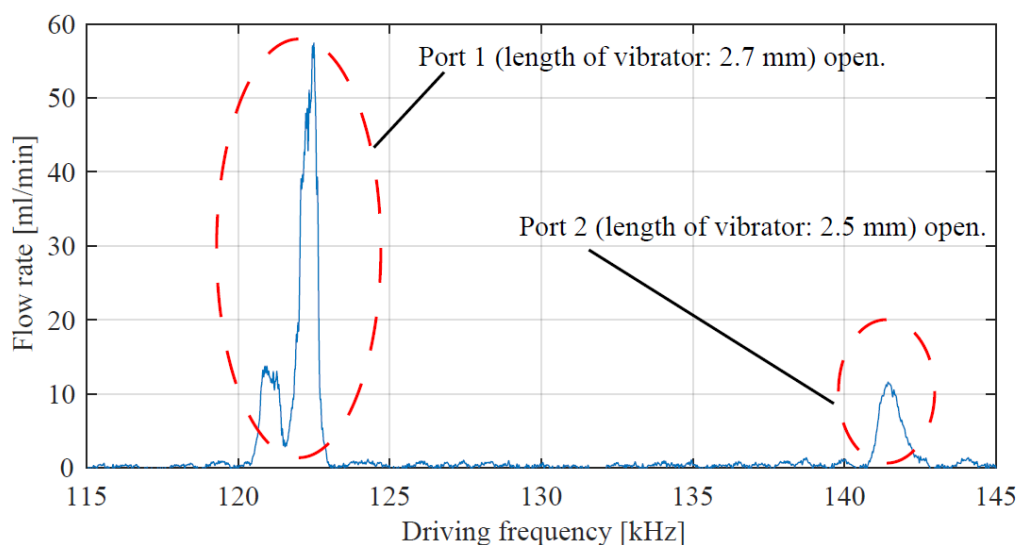


図 8 駆動周波数と流量の関係。ポート 1: $L = 2.7$ mm, ポート 2: $L = 2.5$ mm

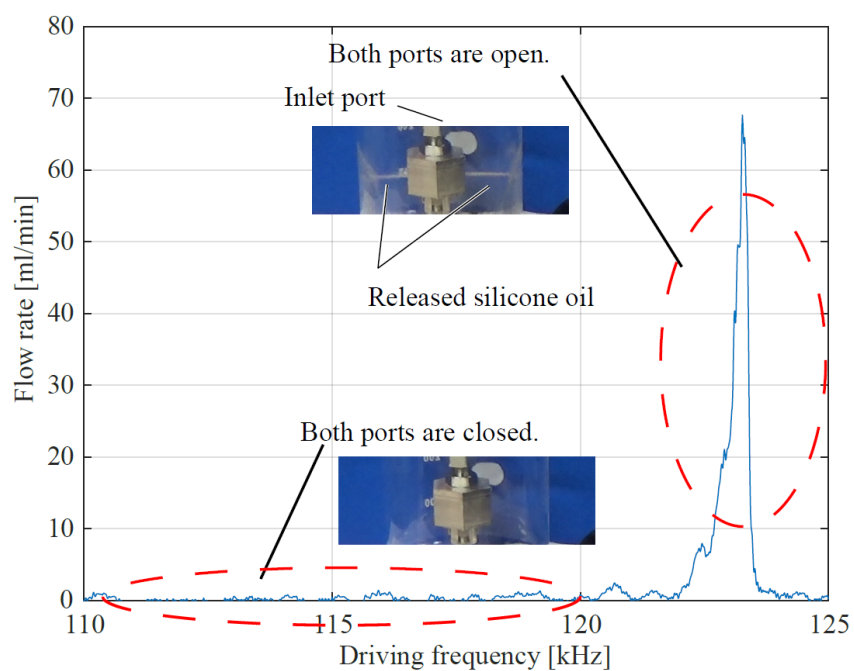


図 9 駆動周波数と流量の関係。ポート 1: $L = 2.2$ mm, ポート 2: $L = 2.6$ mm

4. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

浮田貴宏，東京工業大学，理工学研究科，博士後期課程

鈴木康一，東京工業大学，工学院，教授

難波江裕之，東京工業大学，工学院，助教

神田岳文，岡山大学，自然科学研究科，教授

5. 研究実施時期

2017年（平成29年） 4月 1日から 2019年（平成31年） 3月31日

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

浮田貴宏，圧電振動子を用いた微粒子励振小型油圧制御弁の研究，東京工業大学，2018，博士論文

7. 内外における関連研究の状況

微粒子励振型制御弁の動作原理を油圧制御に用いた研究は，本研究グループ以外に行われていない．本研究では複数の出力ポートを独立制御することを目的として行ったが，このほかに入力ポートと出力ポートにオリフィス板を配置し，それぞれを独立制御することを行っている^[1]．

[1] Hayato Osaki, Takefumi Kanda, Shoki Ofuji, Norihisa Seno, Koichi Suzumori, Takahiro Ukida, Hiroyuki Nabae ; “A small three-way valve using particle excitation with piezoelectric transducers for hydraulic actuators”, Advanced Robotics, Vol.32, No.9, pp.500-510, 2018

8. 今後の発展に対する希望

アクチュエータを制御する場合，複数のポートを同時に開口する機能も有効と考える．このための方法として，周波数の合成や周波数の連続切り替えなどが挙げられるが，制御弁全体を振動させることも，有効な方法であることがわかった．今後はこれらの動作モードも含めた設計指針を評価するとともに，より安定した動作の実現を目指す．