

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 24 日現在

機関番号：34416

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K21519

研究課題名(和文) 小型高応答空気圧流量比例制御弁の開発

研究課題名(英文) Small proportional flow control valve with high response

研究代表者

廣岡 大祐 (Hirooka, Daisuke)

関西大学・システム理工学部・助教

研究者番号：10634016

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：空気圧システムは安価、軽量などの利点があり、防爆性にも優れ安全性も高く、自動化機械・装置の駆動源として広く使用されている。本研究では、空気圧システムの高精度、高効率化を可能とする圧電素子を用いた新しい制御弁の開発を行っており、現在までに圧電素子の振動により空気管路内部の微粒子を励振させることで流量を調整する制御弁を開発している。本研究では、開発してきた制御弁を発展させ、小型で応答性の高い、流量比例制御弁の開発を目指し、ボルト締めランジュバン型振動子を用いた試作機を作製し、各パラメータの最適化を行った。

研究成果の概要(英文)：A pneumatic actuating system has many advantages, including great power, small weight, safe use, and low cost. Air control devices are needed to control pneumatic actuators. However, the control devices that provide high controllability, such as proportional valves, are heavy and large scale; therefore, a smaller and lighter control valve is desirable. We previously proposed a valve mechanism using particle excitation by a piezoelectric (PZT) vibrator that boasts the advantages of small size, small weight, and continuous airflow control. In this report, we designed prototype using bolt-clamped Langevin-type transducer (BLT). And the parameters are optimised that orifice position, particle condition, and orifice size for proportional, stable flow condition.

研究分野：アクチュエータ

キーワード：流量制御弁 空気圧 圧電素子 空気圧アクチュエータ

1. 研究開始当初の背景

空気圧システムは軽量、安価であることから生産ラインなどに広く用いられている。また、コンプライアンス性の高さから、リハビリテーションツールや医療用のロボットの駆動源としても注目されている。さらに近年では柔軟素材を用いたソフトアクチュエータの研究も盛んに進められている[1]。一方で、空気圧システムは空気圧の圧縮性、空気圧配管での伝達遅れなどの影響により、電磁、油圧などのほかのデバイスと比べて制御性が落ちるといった欠点がある。空気圧システムでは手動の絞り弁が広く使われている。手動の絞り弁は簡単に流量の調整ができ、簡単に目的の出力を得ることが出来る。また、軽量であるため、制御対象に搭載することも容易で、空気の圧縮性や伝達遅れの影響も軽減できる。しかし、手動の制御弁ではシステムの状態に応じて、駆動中に出力を変更することは出来ない。この問題の解決方法として連続的に空気圧や流量を制御できるデバイスもあるがそれらは大型で高価なものが多く一般的にはあまり用いられていない。ON-OFF弁では小型のものがあるが連続的な流量制御は出来ない。空気圧制御機器の現状を図1に示す。

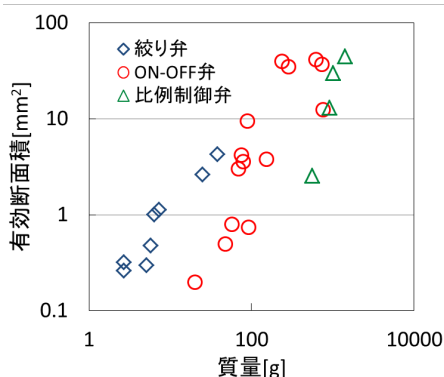


図1 制御機器の現状

一般的に、手動の絞り弁などは小型軽量であるが、連続的な流量調整が可能な比例制御弁などでは大型化する傾向がある申請者は以前より、圧電素子による共振を利用した小型で大流量の制御が可能な流量制御弁の開発を行っている。制御弁の駆動原理を図2に示す。この流量制御弁はオリフィス板、微粒子、圧電素子から構成されている。オリフィス板には複数のオリフィスが設置されており、微粒子はオリフィス板内に配置されている。管路内部に空気が供給されると、図2(a)のように、微粒子がオリフィス開口部に押し付けられ空気の流れを防ぐ。ここで、オリフィス板を振動をさせ微粒子に外力を加えると、図2(b)のように、微粒子がオリフィス開口部より離れ空気が流れる。微粒子がオリフィスを離れる条件は、オリフィス上の微粒子にかかる空気の圧力と、微粒子の振動加速度によって決まる。図2(b)のように、オリフィ

ス板中心が振動の腹になるような構造では、設置位置により、オリフィス開口部の微粒子にかかる振動加速度はそれぞれ異なる。電圧により、振動の強さを制御することで、開口しているオリフィスの個数を変化させ、流量の調整を行うことが出来る。現在までに 2.5g の小型の試作を製作しており、0.7MPa 印加した状態で、0~50L/min まで、連続的に流量を制御できることを示した(図3)。また、試作機の応答性は、立ち上がり時間が5msであり、市販のON/OFF弁と比較しても非常に短い時間となっている(図4)。

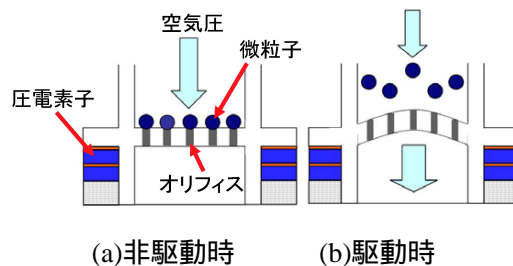


図2 流量制御弁駆動原理

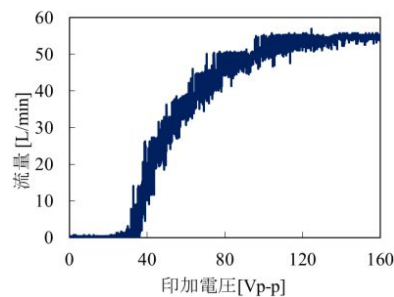


図3 流量特性

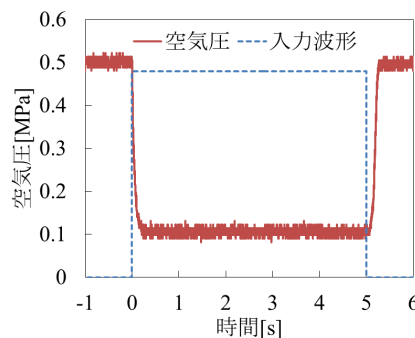


図4 応答性

2. 研究の目的

現在までの研究により、提案している制御弁では、小型軽量で連続的流量制御が可能なが示されている。一方で、流量特性が非線形であり、制御系が複雑になる。また、最大流量時と比べ中間流量でのバラツキが大きくなっている。これらの原因は、制御弁の振動子としての特性、および流量制御弁の構造にあると考えられる。本研究では、応答性の高い小型比例制御弁の実現に向け、流量特性の線形化および、流量特性の安定化を目指す。

3. 研究の方法

本研究では安定的に圧電振動を発生させる試作機を作製し、流量特性に関係する要素である、オリフィス条件、微粒子条件、振動特性の評価を行い流量特性の線形化および安定化を目指す。

実験に用いた制御弁の試作機を示す。試作機は、安定的な振動特性を得るために、ボルト締めランジュバン型振動子を用いて製作する。オリフィス径、オリフィス配置条件を容易に変更できるように、オリフィス板部分を交換可能にするため、ねじ止めにて固定できる構造とする。図5に作製する振動子の構造を示す。この振動子を用い、オリフィス配置条件、微粒子寸法を変化させ、印加電圧、周波数により振動特性を変化させ際の流量特性を評価した。

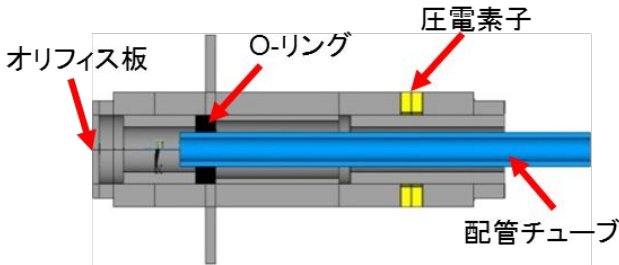


図5 試作機概要

4. 研究成果

まず、流量特性の線形化を目指したオリフィス配置条件について示す。過去の研究において製作した試作機ではオリフィス板の振動特性が予測できず、流量特性が非線形になった。そこで、ボルト締めランジュバン型振動子を用いて振動特性の予測を行い、その予測を基にオリフィス配置条件を決定した。図6に実際に作製した制御弁試作機を示す。

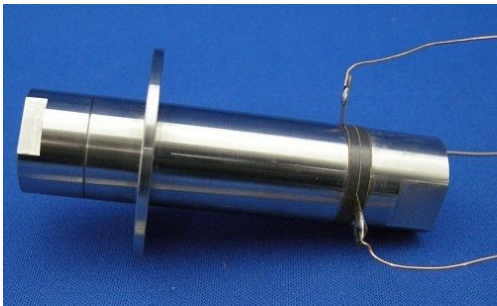


図6 実験用試作機

制御弁の駆動条件となるオリフィスの開口条件を以下に示す[2]。微粒子の質量を m 、オリフィス半径を r 、印加空気圧を P とするとオリフィス上にかかる空気の力 F_1 は以下のようなになる。なお、微粒子径が小さい場合、空気圧による力が支配的になるため、重力の影響は無視できる。

$$F_1 = \pi r^2 P \pm mg \quad (1)$$

次にオリフィス板の振動により微粒子が受ける力は振動の振幅 A 、角速度 ω とすると F_2 は以下のように表せる。

$$F_2 = -A\omega^2 m \sin\omega t \quad (2)$$

F_2 の値が F_1 より大きくなった際に、微粒子はオリフィス開口部を離れる。微粒子にかかる振動の力 F_2 が空気圧による力 F_1 より大きくなるとオリフィスが開口する。ここで式(2)の $A\omega^2$ は微粒子の振動加速度であり、微粒子がオリフィス上にある場合、オリフィス板の振動加速度と等しい。オリフィスごとの開口条件はオリフィスの配置位置によって変化する。そのため、線形的な流量特性を得るためには振動子共振時のオリフィス板の変形形状を明らかにする必要がある。

試作機のオリフィス板での振動特性は有限要素法解析により明らかにした。解析の結果を図7に示す。図7より振動子の共振周波数である 50 kHz において、オリフィス板の中心が振動の腹となるモードが確認された。

ここで、オリフィス板部分の有限要素法により求められた、オリフィス板の振動振幅の比と、実際のオリフィス板での振動振幅を比較した。オリフィス板の振動振幅はレーザードップラー振動計により測定した。実験の結果を図8に示す。振動振幅比はオリフィス板中心の振動を基準とした結果である。図8より、実験値と有限要素法による解析結果が一致していることが明らかになった。以上の結果より、解析によりオリフィス板の変形形状が予測できることが確認された。

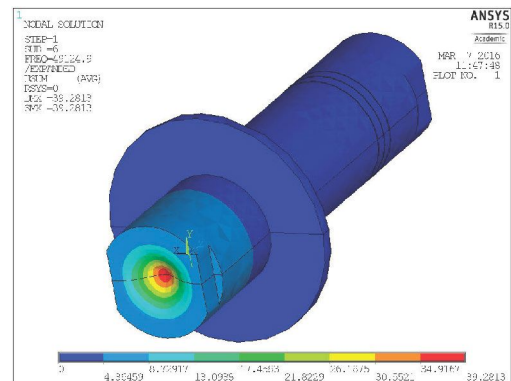


図7 振動子の振動モード形状

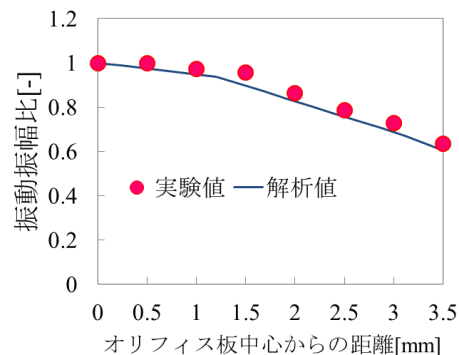


図8 共振時のオリフィス板振動振幅比

ここで、オリフィス板の振動条件を考慮し、オリフィス配置条件を決定した。作製したオリフィス板を図9に示す。今回作製したオリフィス板は直径12mm、厚さ1.2mmとした。中心から1.1mmの位置から、3.0mmの位置まで共振時のオリフィス板の変形形状に合わせて、12個設置した。オリフィス径は0.4mmである。

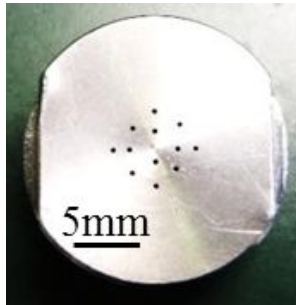


図9 振動条件を考慮したオリフィス配置

この流量制御弁においてでの流量特性の測定を行った。共振周波数は50[kHz]とし、印加空圧は0.5[MPa]、掃引電圧を0~50[Vp-p]、測定時間を90[s]とした。測定結果を図10に示す。結果より、流量発生時から10[L/min]までは変化が小さいがそれ以降は比例的な流量変化が得られていることが確認できる。

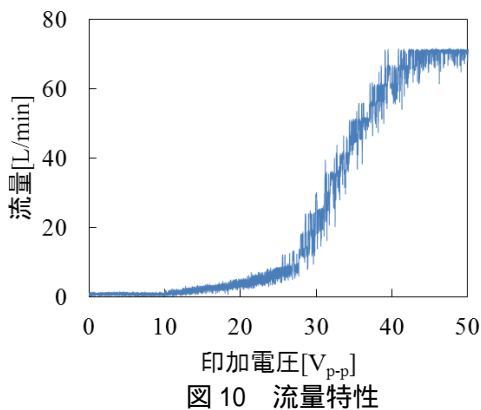


図10 流量特性

実験の結果より、オリフィス板の振動特性を考慮することで、印加電圧に比例した流量特性が得られることが明らかになった。しかし、流量特性は大きくばらついている。これは、各オリフィスの開口条件が近い為、想定外のオリフィスが開口していることが原因であると考えられた。そこで、オリフィスごとの開口条件の差を付けるべく、オリフィス径と微粒子径の変更を行った。式(1)より、オリフィス径を変化させると空気圧による押し付け力が変化する。また、式(2)より、微粒子にかかる力の大きさは微粒子質量によって変化する。この実験ではオリフィス径と微粒子径を変化させた際の影響を確認するため、すべてのオリフィスは中心から等間隔に配置した。実験に用いたオリフィス板を図

に示す。微粒子を変化させた際のオリフィス径は0.4mm(図11(a))、オリフィス径を変化させた際のオリフィス板では0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8mmのオリフィスを用いた(図11(b))。これらのオリフィス板を用いて、それぞれのオリフィスが開口する条件の印加電圧を与えた際の流量特性を測定した。図11(b)のオリフィス板で用いた微粒子はそれぞれ、0.5mm, 0.6mm, 0.7mm, 0.8, 1.0mm, 1.2mmのステンレス球である。微粒子径を変化させた際の流量特性を図12に、オリフィス径を変化させた際の流量特性を図13に示す。

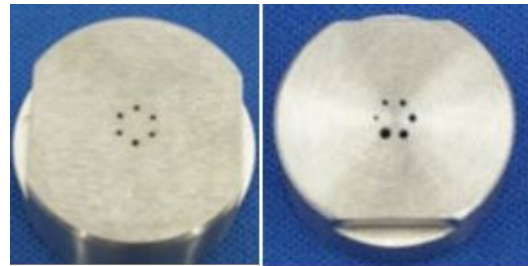


図11 改良したオリフィス板

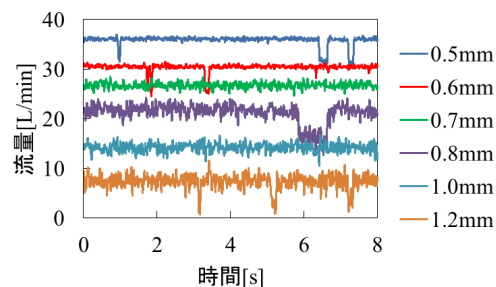


図12 流量特性(微粒子径変化)

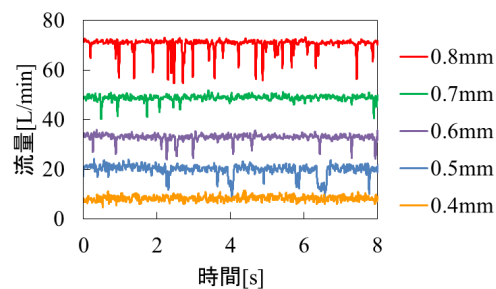


図13 流量特性(オリフィス径変化)

今回の実験には、オリフィスを離れ運動中の微粒子が不規則にオリフィスを塞ぐ現象が確認された。その結果、一部の実験条件において、流量が一時的に低下していることが確認出来る。これは、開口条件の差が十分に開いていれば、オリフィスに発生する振動は大きく、オリフィスを塞いだ微粒子が留まることはなく、無視することが出来る。しかし、図(a)0.8mmなどの結果では、微粒子がオリフィス上にとどまってしまう、流量が回復

するまでに時間がかかっている。これは、0.8mmの微粒子の開口条件が0.7mmの開口条件に近く、十分な加速度が得られなかったためである。一方で、図(b)の実験結果では、径の大きなオリフィスが開く条件において、流量特性が頻繁に低下している。これは、径の大きなオリフィスが開く条件ほど、運動している微粒子数が大きいためである。一方で、流量はすぐに回復しており、開口条件の差が十分であることが確認出来る。これらの結果より、流量特性を安定させるためにオリフィスごとの開口条件に差を付ける方法は有効であると示された。今後、オリフィス径、微粒子質量、振動振幅、オリフィス配置位置のそれぞれのパラメータを最適化することで、流量特性と、応答性の改善につながると考えられる。

<引用文献>

- [1] “[特集]次世代アクチュエータが描く未来像”日本ロボット学会誌 Vol.33 No.9 2015
- [2] Daisuke Hirooka, Koichi Suzumori, Takefumi Kanda, “Flow Control Valve for Pneumatic Actuators using Particle Excitation by PZT vibrator” Sensors and Actuators A155, (2009) pp.285-289

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)

Daisuke HIROOKA, Tomomi YAMAGUCHI, Naomichi FURUSHIRO, Koichi SUZUMORI, Takefumi KANDA: Development of Novel Particle Excitation Flow Control Valve for Stable Flow Characteristics, International Journal of Automation Technology, Vol.10, No. 4, pp. 540-548

[学会発表](計 6件)

廣岡 大祐, 古城 直道, 山口 智実: 微粒子励振型比例制御弁の開発 流量特性の安定を目指したオリフィス条件の改良, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 ビックパレットふくしま(福島県)

三宅 優哉, 廣岡 大祐, 古城 直道, 山口 智実: 微粒子励振型空気流量比例制御弁の流量特性の改善方法の考案 第3報 応答性の改善を目指した新たな駆動方法の提案, 2017年度精密工学会春季大会学術講演会 慶應義塾大学矢上キャンパス(神奈川県)

廣岡 大祐, 古城 直道, 山口 智実, 塩見和樹, 福川 裕也, 鈴森 康一, 神田 岳文: 微粒子励振型空気流量比例制御弁の流量特性の改善方法の考案 第2報 安定流量域の拡大, 2016年度精密工学会春季大会学術講演会 東京理科大学 野田キャンパス(千葉県)

塩見 和樹, 福川 裕也, 廣岡 大祐, 古城 直道, 山口 智実, 鈴森 康一, 神田 岳文: 微粒子励振型空気流量比例制御弁の流量特性の改善方法の考案, 2015年度精密工学会秋季大会学術講演会 東北大学 川内北キャンパス(宮城県)

Daisuke HIROOKA, Tomomi YAMAGUCHI, Naomichi FURUSHIRO, Koichi SUZUMORI, Takefumi KANDA: High Response Proportional Flow Control Valve Using Particle Excitation, Proceedings of 15th International Conference on New Actuators (ACTUATOR 16), pp. 241-244, Bremen, Germany

Daisuke HIROOKA, Tomomi YAMAGUCHI, Naomichi FURUSHIRO, Koichi SUZUMORI, Takefumi KANDA: Highly Responsive and Stable Flow Control Valve using a PZT Transducer, Proceedings of 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS 2016), pp. 399-400, Tours, France

[図書](計 0件)

[産業財産権]

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www2.kansai-u.ac.jp/msl/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

廣岡 大祐 (HIROOKA, Daisuke)

関西大学 システム理工学部 助教

研究者番号: 10634016