

報告日 2016年(平成28年)6月1日
報告者 関西大学 システム理工学部 機械工学科
助教 廣岡 大祐

1. 研究概要

(和文)

(1)課題名 (日本語)

ねじり振動を利用した高応答比例制御弁の開発

(2)研究者氏名

廣岡 大祐

(3)研究概要 (日本文)

本研究では、ねじり振動を利用した新しい原理の流量制御弁の開発を行っている。開発している流量制御弁は、弁内の微粒子をねじり振動より励振させることで流量の調整を効率的に行うことが可能と考えられる。駆動源に圧電素子を用いていることで小型・軽量で応答性も期待される。また、複数のオリフィスを用い、オリフィス上の微粒子をそれぞれ制御することにより、オリフィスの開口面積を調整することで印加電圧に比例した連続的な流量の変化を実現させることができると考えられる。本研究では試作機を作製しねじり振動を用いた制御弁の有効性を示す。

(4)キーワード

空気圧アクチュエータ, 空気圧制御弁, 圧電素子, ねじり振動

(英文)

(1) Research title

Development of highly responsive proportional control valve using torsional vibration

(2) Name of researcher with title of position

Daisuke HIROOKA Assistant professor

(3) Summary

The purpose of this study is development of the new flow control valve using torsional vibration. This valve can control air flow continuously and drive by power saving. In this report, firstly we show basic mechanism of the valve and expound the advantage to drive by low power. We designed the prototype of this valve using FEM and confirmed the principle of the valve. Using this prototype, we considered this structure is suitable for driving. In addition, a change in the flow rate of the control valve was confirmed by experiment.

(4) Key Words Pneumatic valve, Pneumatic actuators, PZT

2. 本研究の意義・特色

本研究で開発している流量制御弁は圧電素子によるねじり振動を利用した新しいもので、弁体の駆動に必要なエネルギーを低減し、効率の良い流量制御弁を開発することが可能と考えられる。また、圧電素子を駆動源に用いているため、高い応答性も見込まれる。

本研究で開発している流量制御弁は圧電素子による振動のモードとオリフィスの配置条件の組み合わせにより単純な ON/OFF ではなく、印加電圧により段階的な流量調整が実現できる。また、圧電素子を用いることで高い応答性を持つ。

以上のような特性から、本研究で開発している流量制御弁は空気圧システムの制御性を大きく高め、自動機械の省エネルギー化、高効率化に大きく貢献できると思われる。

3. 実施した研究の具体的内容、結果 (本文)

まず、開発を行った制御弁の開閉の基本原則について説明する。図 1 に、微粒子励振型流量制御弁の基本的な構造を示す。制御弁の駆動部は弁体として働く微粒子とオリフィス板で表せる。空気圧を印加している状態では、微粒子は、空気圧によりオリフィス開口部に押し付けられ、弁は閉じた状態となる(図 1(a))。この駆動原理では、弁体の位置決め、固定を空気圧による押しつけ力により行うので、制御弁の構造の簡略化が見込まれる。弁開口時には、微粒子に図 1(b)に示すように空気圧と直行する力を加え、微粒子を開口させる。このように微粒子空気圧と直行する力を利用することで、オリフィスを小さな力で開口することが可能になると考えられる。このような微粒子とオリフィスを複数用いて、微粒子の運動をそれぞれ操作することが出来れば連続的な流量調整が可能となる。本研究では圧電素子の共振を用いたねじり振動による、オリフィス板の回転運動により、空気圧に対して直行する外力を微粒子に与えることでオリフィスの開口を目指す。微粒子の駆動の力の関係を以下に示す。オリフィスが開くためには、オリフィス開口部の微粒子にかかる空気の押しつけ力よりも大きな外力を加える必要がある。微粒子の質量を m 、空気圧を P 、オリフィスの半径を r 、としたとき微粒子がオリフィス開口部に押し付けられる力は以下のように表される。

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

このため、印加空圧と平行な力で微粒子の開口させるためには、 F_1 より大きな力を発生させる必要がある。次に、ねじり振動により微粒子がオリフィス開口部より離れる際の条件を求める。駆動条件は図 2 に示すように、点 O に対するモーメントのつり合いで考えられる。オリフィス半径を r とし、微粒子の半径を R とすると、点 O 周りのモーメントを考えると、圧力により発生するモーメント N_1 は以下のようなになる。

$$N_1 = (\pi^2 P + mg)R \sin \theta \quad (2)$$

ここで外力 F_2 が微粒子の中心に働くとして、外力により微粒子に働くモーメントを求めると以下ようになる。

$$N_2 = F_2 R \cos \theta \quad (3)$$

ここで、開口に必要な力 F_2 は以下のように表される。

$$F_2 = (\pi^2 P + mg) \tan \theta \quad (4)$$

微粒子がオリフィスを塞いでいる状況では、 $\theta > 90^\circ$ であるので、式(1)と比較し、開口に必要な力が小さくなることが確認される。次に流量を比例的に制御するための原理について述べる。微粒子の開口は圧電素子によるねじり振動を利用する。

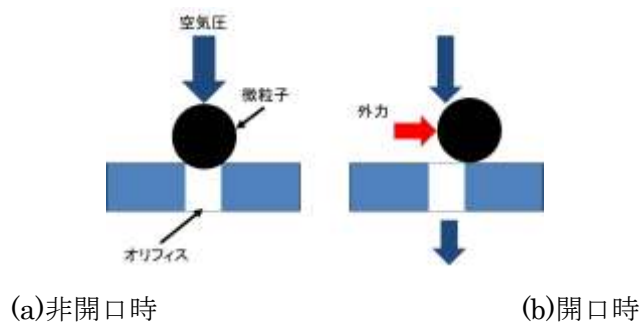


図 1 制御弁の駆動原理

図 3 はねじり振動を発生させた際のオリフィス板の概略図である。図 3 に示されるように、ねじり振動を発生させオリフィス板を円周方向に振動させると、オリフィス板に加わる外力は中心からの距離に比例し遠い場所で大きくなる。この結果、オリフィス板外側に設置されたオリフィス上の微粒子ほど、発生する外力が大きくなる。この結果、オリフィスの配置条件を変更することにより微粒子に働く外力に差をつけることができるため、オリフィスの開口面積および開口時間の制御が可能となる。オリフィスに発生する外力は中心からの距離に比例するため、容易に比例的な流量特性を得ることが見込まれる。また、外側ほど発生力が大きいため、複数のオリフィスを発生力の大きな箇所を設置することが可能となり、効率の良い駆動が可能となる。

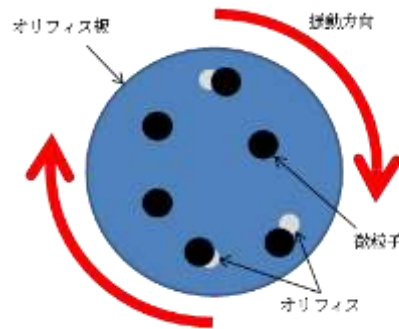
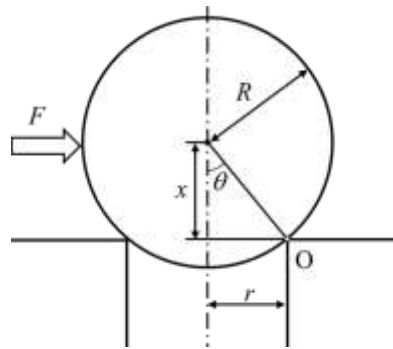


図2 オリフィス部での力の関係

図3 ねじり振動による微粒子の駆動

次に開発した制御弁の基本構造を示す。本研究では振動子としてボルト締めランジュバン型振動子を用いる。図4に開発する制御弁の断面図を示す。制御弁の寸法は直径40mm、全長80mmである。圧電素子は外径40mm、内径20mm、厚さは4mmである。圧電素子の分極方向を図5に示す。圧電素子は分極方向が円周方向となるように、8分割して分極処理を行った後、接着されている。振動子では、圧電素子はそれぞれの分極方向が対向するように取り付けられており、交流電圧を印加することで大きなねじり振動を発生させることが可能となる。オリフィス板部分の直径は30mmであり、厚さは1.2mmとした。この振動子では、オリフィス板が設置してある振動子先端で振動の腹となる。振動の節となる位置には固定用のフランジと空気圧配管を接続するための空圧継手を取り付けてある。圧電素子は振動の節にあたる箇所にもボルト締めで固定されている。図6に有限要素法のモーダル解析で求めた振動モードを示す。図6に示すように30kHz付近で、ねじり振動のモードが確認され、オリフィス板のある振動子先端で最も大きく変位が発生していることが確認できる。

この解析をもとに試作機を作製した。作製した振動子の組立図を図7に、振動子に用いたオリフィス板を図8に示す。オリフィス板には12個のオリフィスが設置されており、中心から7.5mmから13.0mmの位置まで0.5mm間隔で配置されている。オリフィスの直径

は 0.4mm である。本研究ではねじり振動の有用性を示すべく、ねじり振動を発生させる振動子と、空気圧と平行な振動を合わせて発生させる振動子を開発した。空気圧と平行な振動はオリフィス板のたわみ振動により発生させる。図 9 にたわみ振動のモーダル解析を示す。このモードは約 27kHz 付近で発生しており、オリフィス板の剛性を変化させることで、ねじり振動発生時にたわみ振動を合わせて発生することが可能となる。ねじり振動を主体とした振動子を振動子 A、たわみ振動とねじり振動を用いた振動子を振動子 B とする。それぞれの振動子でオリフィス板上のもっともたわみ振動の変位が大きな箇所での振動形状を図 10 に示す。振動形状の測定はレーザードップラー振動計により測定を行った。ねじり振動はオリフィス板の角で測定し、たわみ振動の測定箇所と一致するように位置情報より変換した。測定の結果より、振動子 A ではねじり振動が、振動子 B ではたわみ振動が主体的になっていることが確認された。

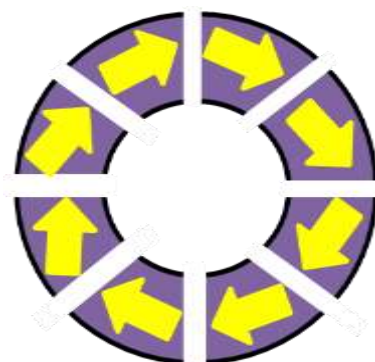
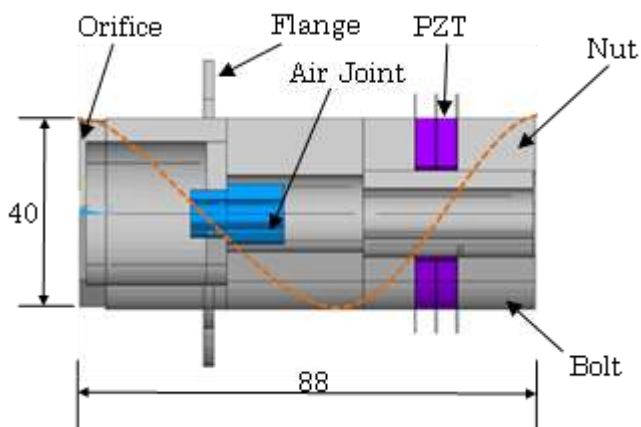


図 4 制御弁試作断面図

図 5 圧電素子分極方向

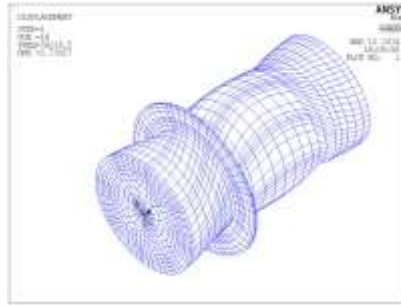


図 6 制御弁振動モード形状



図 7 制御弁試作機

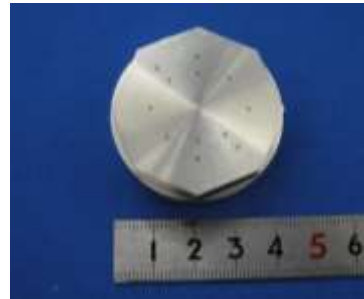


図 8 オリフィス板

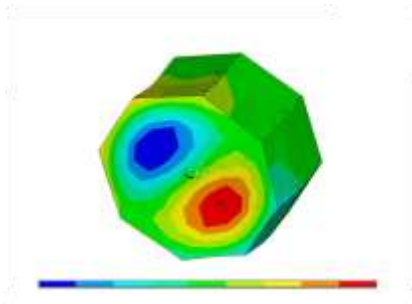


図 9 たわみ振動の形状

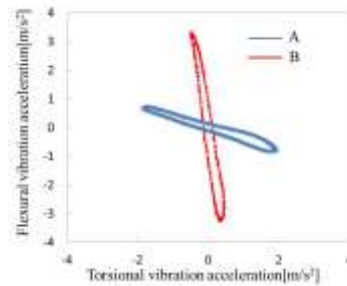


図 10 振動振幅比率

次に振動子による制御弁の駆動条件を確かめるために振動印加時の微粒子の動きを確認した。微粒子の確認のために、オリフィス板上に微粒子を並べ、配管側より真空ポンプで負圧を与え、微粒子をオリフィス上に固定した(図 11)。オリフィス板に共振周波数の駆動電圧を印加し、印加電圧を増加し、オリフィスが開口した際のねじり振動とたわみ振動の振動加速度を測定した。ねじり振動の有効性を確認するため、発生した振動の合力と合力に占めるねじり振動の関係を求めた(図 12)。測定の結果より、印加空圧と平行なたわみ振動のみの駆動より、ねじり振動が混ざった駆動条件の方が開口に必要な振動加速度が減少していることが確認できる。一方で、ねじり振動のみで駆動する場合オリフィスと微粒子間ですべりが発生し、駆動に必要な振動加速度が大きく増加することが確認された。以上の

結果より、ねじりとたわみ振動を組み合わせることで駆動効率を高めることが可能なが示された。

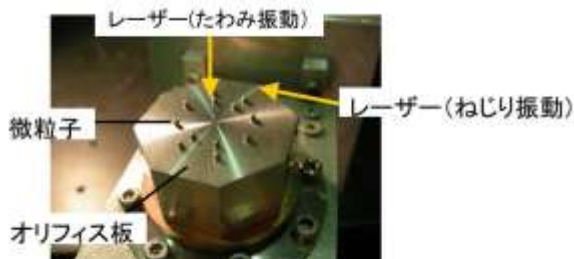


図 11 駆動条件確認実験

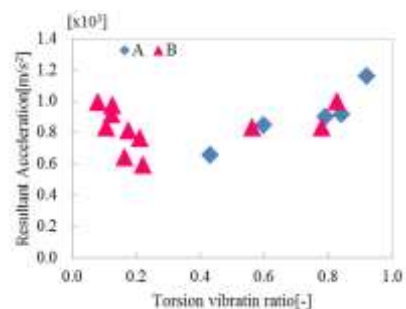
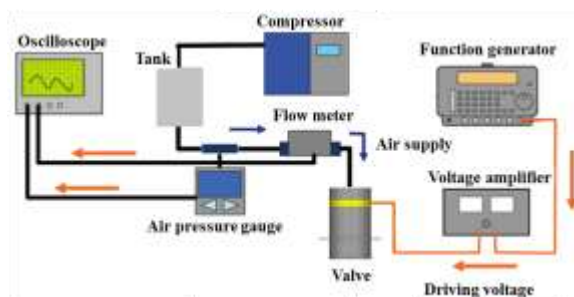


図 12 ねじり振動と合成加速度の関係

最後に駆動の合力が大きく低下した振動子 B を用いて、共振周波数において、印加電圧を増加させ、流量の変化を測定した。実験システムを図 13 に示す。空気圧は制御弁に印加され、弁駆動時には大気圧化に放出される。流量の測定には流量計(CKD FSM-2)を用いて、空気圧を 0.1MPa で固定し、電圧を 0 から 100V_{pp} まで変化させた時の流量特性を測定した。実験の結果を図 14 に示す。図 14 より 20V_{pp} 付近より、流量増加が始まっていることが確認された。電圧を増加させることで、流量変化量の増加が確認されている。今回の実験結果よりねじり振動とたわみ振動を組み合わせた振動子を用いることで流量制御が可能なが確認された。この振動方式では縦方向の駆動よりも効率のより駆動が可能であると示された。



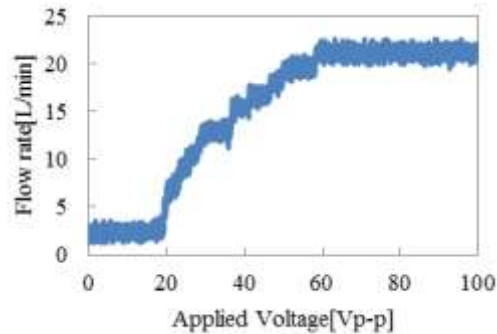


図 13 流量特性実験システム

図 14 流量特性測定結果

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

廣岡 大祐・関西大学 助教

5. 研究実施時期

2015 年（平成 27 年）3 月 1 日から 2016 年（平成 28 年）3 月 31 日

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

- [1] 向田 篤史, 廣岡 大祐, 山口 智実, 古城 直道, 鈴森 康一, 神田 岳文: ねじり振動を用いた微粒子励振型空気流量制御弁—ねじり振動の有用性の確認—, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015
- [2] 廣岡大祐, 山口智実, 古城直道, 鈴森康一, 神田岳文, “ねじり振動を用いた微粒子励振型空気流量制御弁” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014
- [3] 廣岡 大祐, 山口 智実, 古城 直道, 鈴森 康一, 神田 岳文: 微粒子励振型流量制御弁を用いた空気圧シリンダの速度制御, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 46 巻, 2 号, pp. 7-13 (2015.3).
- [4] Daisuke HIROOKA, Tomomi YAMAGUCHI, Naomichi FURUSHIRO, Koichi SUZUMORI, Takefumi KANDA: Small Size Pneumatic Valve for Smooth Flow Control using PZT Vibrator, Proceedings of 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS 2015), 15601455 , Taipei (2015)
- [5] Daisuke HIROOKA, Tomomi YAMAGUCHI, Naomichi FURUSHIRO, Koichi SUZUMORI, Takefumi KANDA: Research on Controllability of the Particle Excitation Flow Control Valve, Proceedings of the 6th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT2015), pp. 136-137,

Okinawa, Japan (2015)

7. 内外における関連研究の状況

K.P.Fritz らは、弁体に空気圧と直行する力を加えることで、開口が可能な制御弁の開発を行っている^[1]。また T.Akagi らは、微粒子に空気圧と直交する外力を振動により加えることが可能な制御弁の開発を行っている^[2]。これらの駆動に必要な力は従来の制御弁と比較よりも空気圧の影響を受けづらいため、省電力化が見込まれる。しかし、これらは On-Off 弁であり、この駆動原理を用いた連続的な流量制御が可能な制御弁の研究は行われていない。過去に筆者らは微粒子に空気圧と垂直方向の振動を与え、連続的に流量を変化させることが可能な制御弁を開発してきた。ねじり振動を用いた場合でも同様の機能を持った制御弁が作製できると期待される。

[1] T.Akagi : Development of Small-Sized Flexible Pneumatic Valve Using Vibration Motor and Its Application for Wearable Actuator, 15th International conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP08), (2008)

[2] K.-P.Fritz : Switching Valve with Isolated Impact Actuator, 12th International Conference on New Actuators, 242-245, (2010)

8. 今後の発展に対する希望

現在までの研究により、制御弁の駆動に必要な力を低減させる条件を、実験的に明らかにすることが出来た。しかし、空気圧流量の比例的な流量制御、駆動に必要な電氣的なエネルギーの低減には至っていない。今回明らかにされた振動条件を効率的に発生することが可能な振動子を開発することで、効率的なシステムの実現を目指す。