圧電振動による微粒子励振型空気流量制御弁

—第8報 オリフィス配置条件の最適化による連続的流量調整の実現—

Flow Metering Valve for Pneumatic Actuators Using Particle Excitation by PZT Vibrator

-8th report Realization for continuous flow rate control by optimization orifice pattern -

○正 廣岡大祐（岡山大） 正 鈴森康一（岡山大）
正 神田岳文（岡山大）

Daisuke HIROOKA, Okayama University, hirooka@act.sys.okayama-u.ac.jp
Koichi SUZUMORI, Okayama University
Takefumi KANDA, Okayama University

The purpose of this study is development of the flow control valve which is small in size, lightweight and can control air flow continuously. In this report, we decided the optimum design of the orifice arrangement and orifice diameter for this valve to achieve continuous flow control. And we designed new flow control valve prototype that the orifices were arranged from the center at 0.2-mm intervals. We have measured flow rate characteristics, hysteresis characteristics and observed vibrational acceleration. We conclude that the orifice pattern arranged from the center at 0.2-mm intervals with $\phi 0.4$ -mm orifices is most suitable for continuous flow control.

Key Words: Pneumatic valve, Pneumatic actuators, PZT

1. 緒言

小型の速度制御弁は、空気圧シリンダ駆動時の衝撃緩和のために広く用いられている。小型の速度制御弁はシリンダに取り付けて使用することができ、シリンダの近くで制御できるという利点があるが、手動のものが多く、シリンダ駆動時に連続して流量を調整することができない。この速度制御弁に変わるものとして新しい原理の小型の流量制御弁も開発されている [1-3]。

本研究では、流路に封入した微粒子を圧電素子による励振で制御し、流量を調整する新しい原理の流量制御弁を開発している。この制御弁では、複数のオリフィスを流れる空気量を圧電素子に与える電圧により制御することで、小型軽量で連続的な流量調整が可能となる。

現在までに、動作原理を証明するための試作1号機の製作 [4]、小型化と高効率化を目指して、ボルト締めにより圧電素子を取り付けた流量制御弁2号機の作製と、その性能の確認を行ってきた [5-6]。また、流量変化時の微粒子の動きを観察することにより、開発している流量制御弁の駆動原理が連続的流量調整に適していることを示した [7-8]。

本報では、連続的な流量調整を目的とし、オリフィス配置条件、オリフィス寸法の最適化を行うことで、連続的な流量調整を実現した。

2. 流量制御弁概要

本研究で開発している流量制御弁を図1に示す。流量制御弁の基本的な構成要素は、オリフィス板、圧電振動子、微粒

子である。圧電振動子はオリフィス板の底面にボルト締めで取り付けられている。流量制御弁の直径は10mmで、高さは9mmである。圧電素子にはPZT(lead zirconate titanate)のバルク材を使用し、外径10mm、内径8.2mm厚さは0.2mmとした。図1に示すように、圧電素子に電圧を印加するための電極が2枚取り付けられている。微粒子には直径0.8mmの鉄球を用いることとする。流量制御弁全体の質量は2.5gである。

Fig.1 Flowing quantity control valve assembly figure

3. 流量制御弁駆動原理

3.1 連続的流量変化の条件

本研究で開発している流量制御弁の動作原理を図2に示す。図2(a)のように外部から、空気が流量制御弁内に供給されると、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。このため、流量制御弁は通常時に閉じた状態となる。このとき、圧電振動子に電圧を印加すると、図2(b)に示すように、オリフィス上の微粒子が励振され、オリフィスより離れる。この際、空気はオリフィスを通して外に流れる。流量

制御弁を流れる、時間当たりの空気の流量はオリフィスの開口面積と開口時間で決まる。オリフィスが開く条件は、オリフィス開口部の微粒子にかかる空気の押し付け力と、振動によって与えられる力によって決まる。微粒子がオリフィス板を離れる際に必要な条件を計算により求める。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より離れる際に必要なオリフィス板の振動加速度 a は次の式で表せる。

$$a > \frac{\pi r^2 p \pm mg}{m} \quad (1)$$

ただし、 $\pm$ はバルブの設置の向きによって変化する。振動加速度は、圧電素子に印加する電圧に比例して大きくなる。

ここでオリフィス板管壁内分の運動について考える。本研究では、管壁の外側にオリフィス板に圧電素子で振動を与えることにより、管壁内部に図3に示すように管壁部分が振動の節となり、オリフィス板中心が振動の腹となるような振動モードを発生させる。振動加速度は変位に比例するので、オリフィス板中心付近では印加電圧が低い状態で微粒子がはなれ、管壁付近のオリフィスほど必要な振動加速度に達するには、大きな電圧が必要となる。その結果、オリフィスを中心付近より、等間隔で配置することで、連続的な流量調整が可能となる。

Fig.2 Structure of particle-excitation variable

Fig.3 Orifice plate displacement

3.2 オリフィス条件の決定

本報で使用するオリフィスの配置条件を図に示す。このオリフィスパターンは9個のオリフィスから構成されている。オリフィスはオリフィス板中心から0.4 mmの位置より、0.2 mm間隔で2.0 mmまで並んでいる。この条件化では、中心に近いオリフィスから順に開いていくこととなり、連続的な流量の変化が起これと考えられる。実際にオリフィス径を0.5mm, 0.4mm, 0.3mmの3種類のオリフィス板を製作した。

Fig.4 Orifice pattern of the flow control valve

製作したオリフィス板を使用した流量制御弁の共振周波数と最大流量を測定した。共振周波数はFRA(Frequency response analyzer)とレーザードップラー振動計を用い、アドミタンスと位相及び、オリフィス板の振動速度の変化より測定した。測定の結果をTable 1に示す。Table 1より共振周波数は190kHz付近であり、オリフィス径により大きな違いがないことが確認された。

Table 1 Resonance frequency of flow control valve

Radius of an orifice (mm)	Resonance Frequency [kHz]
0.5	192.3
0.4	192.1
0.3	191.2

4. 新オリフィス板を用いた流量制御弁の評価

実験により求めた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。流量の測定には流量計(CKD FSM-2)を用いて、空気圧をそれぞれ0.7、0.6、0.5MPaで固定し、電圧を0から160V_{p-p}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5に示す。図5より、すべてのオリフィス径において連続的な流量の変化が確認された。オリフィス径が大きくなると微粒子が引き離されるのに必要な電圧が大きくなり、変化する流量の割合も大きくなることが確認できる。次にそれぞれのオリフィス板に対してヒステリシス特

性の測定を行った。空気圧は 0.7MPa として、電圧を 0 から 160V_{p-p} まで増加させた際の流量特性と、160 から 0 V_{p-p} まで減少させた際の流量特性を比較した。測定の結果を図 6 に示す。

図 6 より、オリフィス径 0.5 mm, 0.4 mm ではヒステリシス特性が 10%以内となっていることが確認された。一方, 0.3 mm では、電圧を降下させていく際、流量が 0 l/min になるまでに、時間がかかることが確認された。これは、オリフィス径が小さいため、押し付け力が弱く、微粒子がオリフィスを塞ぐまでに時間がかかるためである。

(a) Orifice diameter: $\phi 0.3$ mm

(b) Orifice diameter: $\phi 0.4$ mm

(c) Orifice diameter: $\phi 0.5$ mm

Fig. 5 Relationship between flow rate of the flow control valve and applied voltage

(a) Orifice diameter: $\phi 0.3$ mm

(b) Orifice diameter: $\phi 0.4$ mm

(c) Orifice diameter: $\phi 0.5$ mm

Fig.6 Hysteresis of the flow control valve

次に、オリフィス径 0.5mm、0.4mm の流量制御弁に関して流量変化時の振動加速度の変化の観測を行った。測定は流量制御弁に空気圧を印加した状態で、流量制御弁に加える電圧を一定速度で増加させた際のオリフィス板の振動加速度を測定した。印加空気圧は 0.7, 0.6, 0.5 MPa とした。オリフィス板の振動加速度の測定には、レーザードップラー振動計を用いて、オシロスコープにより印加電圧との同期を取っている。図 7 に実験の結果を示す。

測定の結果、オリフィス板の振動加速度は空気圧印加による影響を受けていることが確認された。特にオリフィス径 0.5 mm の際は印加空気圧による影響が大きく、中心付近のオリフィス開口部の微粒子が離れると振動加速度が大きく影響を受けていることが確認された。特に影響が大きいため、加速度の増加が 2 段階で発生していることが確認される。一方で、オリフィス径 0.4 mm 際には中心付近の微粒子がオリフィス開口部を離れると、空気圧無印加時と同様の加速度変化を起こすことが確認された。以上の結果より、ヒステリシス特性、

加速度の変化の測定結果より、オリフィス径 0.4 mm が最も安定的に流量変化の実施が可能であると考えられる。

(a) Orifice diameter: $\phi 0.4$ mm

(b) Orifice diameter: $\phi 0.5$ mm

Fig.7 Vibration characteristics under air pressure

ここで、流量変化時の微粒子の動きをアクリル内部に空気圧印加用の経路を持った治具を用いて観察した。観測時はすべてのオリフィスが観察できるように、斜め方向より動画撮影を行った。観測の結果を図 8 に示す。

Fig. 8 Change of particle motions for increasing the drive voltage

図 8 (a)では、空気圧が印加されたことにより、微粒子がオリフィスを塞いでいる事確認できる。図 8(b)から(d)に示すように、印加電圧を上げていくことにより、中心付近のオリフィス上の微粒子から順番に離れていくことが確認された。以上の結果よりオリフィスを中心より等間隔で並べることにより連続的な流量の制御が可能なが確認された。

5. 結言

本研究では、オリフィス板を励振させることで、オリフィスを塞いでいる微粒子を制御し、流量を調整する小型の流量制御弁の開発を行っている。本報では、連続的な流量変化の実現を目指し、オリフィス板中心から 0.4 mm の位置より、0.2 mm 間隔で 9 個のオリフィスが並んでいるオリフィスパターンを製作した。流量特性測定の結果、オリフィス径 0.3mm、0.4mm、0.5mm において連続的な流量変化を確認した。さらに、ヒステリシス特性と空圧印加時の振動特性よりオリフィス径 0.4mm を最適な条件であると確認した。

謝辞

流量制御弁の試作機製作に関し、株式会社コガネイ様にご協力いただきました。

文献

- [1] S. Jien, S. Hirai, and K. Honda "Miniaturization Design of Piezoelectric Vibration-Driven Pneumatic Unconstrained Valves" Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.22, No.1 P91-99, 2010
- [2] T. Akagi, S. Dohda and S. Katayama, "Development of Small-sized Flexible Control Valve Using Vibration Motor" Proc.7th JFPS International Symposium on Fluid Power, TOYAMA 2008 P2-25
- [3] S. Yun, K. Lee, H. Kimb, H. Sob, "Development of the pneumatic valve with bimorph type PZT actuator" Materials Chemistry and Physics 97 (2006) P1-4
- [4] D. Hirooka, K. Suzumori, T. Kanda, "Flow control valve for pneumatic actuators using particle excitation by PZT vibrator" Sensors and Actuators A155(2009) 285-289
- [5] D. Hirooka, K. Suzumori, T. Kanda, "Pneumatic Flow Control Valve Using Particle Excitation by PZT Vibrator", 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium, P1-P-02
- [6] D. Hirooka, K. Suzumori, T. Kanda, "Experimental Analysis on Pneumatic Flow Control Valve Driven by PZT Vibrator" IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, FA1.5.
- [7] D. Hirooka, K. Suzumori, T. Kanda "Continuous Air Control Using Particle Excitation Valve" 2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronic
- [8] D. Hirooka, K. Suzumori, T. Kanda, "Design and Evaluation of Orifice Arrangement for Particle-Excitation Flow Control Valve" Sensors and Actuators A171 (2011), P283-291