

# 衝撃を用いた小型空気圧弁の開発

立命館大学ロボティクス学科 ジエンスマディ\*, 小川洋一郎\*, 高山博\*, 平井慎一\*

## Miniature Pneumatic Valve Using Impact

Keywords: Miniature valve, Unconstrained poppet, Piezoelectric actuator, Vibration, Pneumatics

### 1. 緒言

空気圧人工筋は、追従性や柔らかさ、人と接する時の安全性の点で、電気や油圧を利用したアクチュエータに比べ優れているといわれている [1-2]. これらのアクチュエータの制御には流量制御を必要とする [2]. 一般に、パワーアシストシステム等では、多くの空気圧人工筋を駆動させる必要がある。したがって、それぞれの空気圧人工筋を制御するために必要な空気圧弁を小型化する必要がある。

近年、マイクロ弁の研究が進んでおり、様々なコンセプトの弁が研究されている。マイクロ弁の駆動原理は概して、静電気、圧電気、熱流体、熱機械、形状記憶合金に分類される。ほとんどのマイクロ弁は出力流量が 200-500mL/min と低く、空気圧人工筋に使用することはできない。その一方で、空気圧人工筋に使用できそうな高流量マイクロ弁もある。Rummler らは 200kPa において、およそ 2L/min の流量が流れる磁気式のマイクロボール弁を開発した [3]. Henning は膜を大きな周縁弁座に用いることにより、280kPa で 12L/min という高流量マイクロ弁を提案した。

従来の方式によるマイクロ弁では、熱歪みや小型化による組み付け精度の問題から、空気漏れが発生しやすいという大きな問題がある。この問題を解決するために比較的、高流量であり、高い組み付け精度を要しない無拘束ポペット弁を提案する。

本論文においては、小型無拘束弁が軽量であり、開状態で 100L/min の流量を流すことのできる弁や、開状態でわずか数 10mL/min ほどまでしか流れない弁ができたことを示す。この無拘束弁は圧電アクチュエータの振動とオリフィス、ポペット部の機械的振動との共振周波数で駆動している。そして、この弁の力学特性と高い全体的効率を得るための制御法の研究を行った。

### 2. 無拘束ポペット弁

製作した無拘束弁とその構造を Fig.1 に示す。オリフィス径は 1.5mm から 0.5mm まで実現されている。

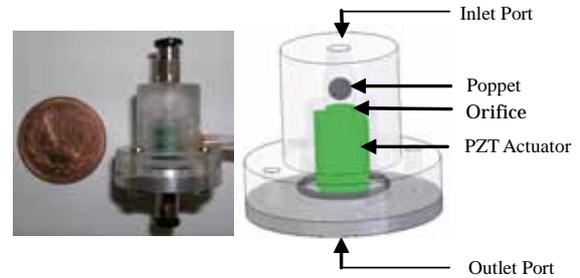


Fig.1 Unconstrained Poppet Miniature Valve

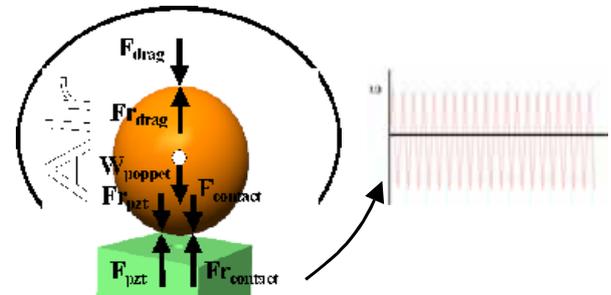


Fig.2 Sum force exerted at the poppet

この方式はON/OFF空気圧弁として非常に良好な動作をすることができ、入力電圧を変化させることで多少の流量制御を行うことも可能である。ON/OFF制御や流量制御を行う主な機能メカニズムはポペットに働く力の総和である。Fig.2 にポペットに働くさまざまな力の関係を示す。ポペットの運動は力 $F_{net}$ により定められる。流量はポペットとオリフィスとの位置関係で決まる。

ポペットに作用する合力 $F_{net}$ はEq.(1)で示され、PZTの加速度により生じる慣性力 $F_{PZT}$ 、ポペットの重量 $W_{poppet}$ 、空気抵抗 $F_{drag}$ 、接触力 $F_{contact}$ により定まる。PZTの加速度により生じる慣性力 $F_{PZT}$ はEq.(2)で示され、ポペットの質量 $M_{poppet}$ 、圧電アクチュエータの内部変位 $u_3$ により定まる。圧電アクチュエータの内部変位 $u_3$ はEq.(3)で示され、 $X$ を振幅とし、角周波数とする正弦波として示される。圧電アクチュエータの内部変位の振幅 $X$ はEq.(4)で示され、圧電ひずみ定数 $d_{33}$ 、入力電圧 $V_{ref}$ 、キャパシタの蓄電板の厚さ $\Phi_{capacitor}$ 、波数 $\beta$ 、圧電アクチュエータの積み重ね方向の長さ $l$ 、コンプライアンス $s$ 、外力に対する剛性 $k_{PZT}$ 、圧電アクチュエータの断面積 $A$ により定まる。ただし Eq.(4)は  $0 < X < l/2$  を条件とする。

\* 立命館大学理工学部ロボティクス学科  
(〒525 8577 滋賀県草津市野路東 1 - 1 - 1)

波数 $\beta$ は圧電アクチュエータの内部変位の角周波数, 圧電材料の密度 $\rho$ , コンプライアンス $s$ により定まる. 外力に対する剛性 $k_{PZT}$ はポペットの重量 $W_{poppet}$ , 空気抵抗 $F_{drag}$ , 接触力 $F_{contact}$ , 圧電アクチュエータの内部変位の振幅 $X$ により定まる. 外力 $F_{dist}$ に対して, Eq.(4), Eq.(6)を連立して解くと, 圧電アクチュエータの内部変位の振幅と外力に対する剛性を求めることができる.

$$F_{net} = F_{PZT} + F_{contact} - W_{poppet} - F_{drag} \quad \text{Eq.(1)}$$

$$F_{PZT} = M_{poppet} \frac{d^2 u_3}{dt^2} \quad \text{Eq.(2)}$$

$$u_3 = X \sin \omega t \quad \text{Eq.(3)}$$

$$X = \frac{d_{33} \frac{V_{ref}}{\phi_{capacitor}}}{\beta \cos \beta l + \frac{s \cdot k_{PZT}}{A} \sin \beta l} \sin \beta l \quad \text{Eq.(4)}$$

$$\beta = \omega \sqrt{\rho s} \quad \text{Eq.(5)}$$

$$k_{PZT} = \frac{-F_{contact}}{X} \quad \text{Eq.(6)}$$

弁の駆動時, 接触と非接触が交互に発生する. 接触時, ポペットは接触力 $F_{contact}$ と圧電アクチュエータからの慣性力 $F_{PZT}$ を受け, オリフィスから跳ね返り, ポペットと弁座が非接触の状態になると気流がオリフィスに流れる.

接触時

$$M_{poppet} \ddot{y} = F_{net} \quad \text{Eq.(7)}$$

$$F_{contact} = K \delta^{3/2} + \mu \delta^{3/2} \dot{\delta} \quad \text{Eq.(8)}$$

$$\delta = f(y - u_3) \quad \text{Eq.(9)}$$

$$K = \frac{4}{3(h_1 + h_2)} \left( \frac{1}{R} \right)^{1/2} \quad \text{Eq.(10)}$$

$$h_i = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}, \quad i = 1, 2 \quad \text{Eq.(11)}$$

$$\mu = \frac{3K(1 - e^2)}{4(V_{poppet}^{(-)} - V_{pzt}^{(-)})} \quad \text{Eq.(12)}$$

非接触時

$$M_{poppet} \ddot{y} = -(W_{poppet} + F_{drag}) \quad \text{Eq.(13)}$$

接触時, ポペットに作用する合力 $F_{net}$ はEq.(1)で示される. 運動方程式Eq.(7)を解くことにより, 時刻 $t$ におけるポペットの変位 $y(t)$ を求めることができる. 接触力 $F_{contact}$ はEq.(8)で示すようにヘルツ接触で定式化し, 弾性定数 $K$ , 粘性定数 $\mu$ , 変形量 $\delta$ によって定められる. 変形量 $\delta$ はポペット位置 $y$ と圧電アクチュエータの内部変位 $u_3$ の差の関数である. 弾性定数 $K$ はEq.(10), Eq.(11)により, ポペットのヤング率 $E_1$ , ポアソン比 $\nu_1$ , PZTのヤング率 $E_2$ , ポアソン比 $\nu_2$ ,

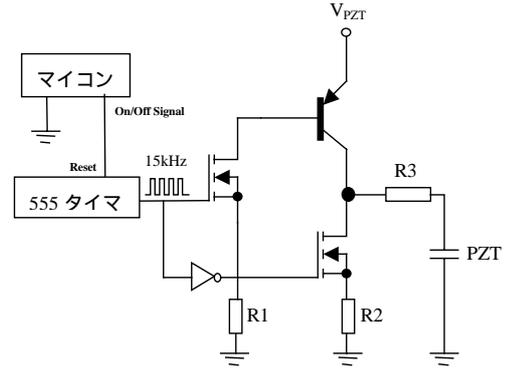


Fig.3 Schematic of Valve On/Off Control

ポペットの半径 $R$ により定まる. 粘性定数 $\mu$ は衝突前のポペットの速度 $V_{poppet}^{(-)}$ , 衝突前の圧電アクチュエータの速度 $V_{pzt}^{(-)}$ , 弾性定数 $K$ , 跳ね返り係数 $e$ により定まる. 非接触時, ポペットにはポペットの重量 $W_{poppet}$ と空気抵抗 $F_{drag}$ の合力の反力が作用し運動方程式Eq.(13)が得られる.

オリフィスへの流れは, 上流側と下流側の圧力比によって決まり, 音速流れから亜音速流れにまで推移する. 等エントロピー過程であると仮定すれば, 体積流量は次のEq.(14)によって求められ, ベルヌーイの定理により, 臨界圧力比は0.5283 ( $k=1.4$ )となる[5].

$$Q = \frac{P_{in} A}{\rho} \sqrt{\frac{2}{RT}} f \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad \text{Eq.(14)}$$

$$f \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right) = \sqrt{\frac{k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}} \quad \left( 0 \leq \frac{P_{out}}{P_{in}} \leq 0.5283 \right)$$

$$= \sqrt{\frac{k}{k-1} \left( \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right)} \quad \left( 0.5283 \leq \frac{P_{out}}{P_{in}} \leq 1 \right)$$

### 3. 駆動回路

Fig.3に本研究で用いたON/OFF駆動回路を示す. 本研究ではFearingによって提案された単純なプッシュプル回路を使用している[6]. 圧電アクチュエータは最大変位・発生力を得るために, 最大共振周波数(15kHz)で駆動され, 出力効率が向上している. Fig.3に示すように, 時間ベースのON/OFF制御を行うため, マイコンを用いる. 入力電圧の変化によって, この弁は流量制御を行っている. オリフィス径0.7mmのときの入力電圧と出力流量の関係をFig.4に示す. 完全な開状態には入力電圧が最低25V, 1A必要であり, 20Vまででは部分的な開状態になっていることがわかる.

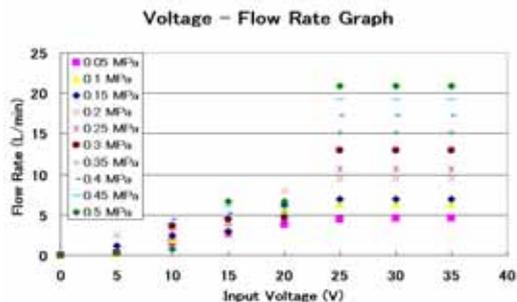


Fig.4 Voltage Controlled Flow Rate

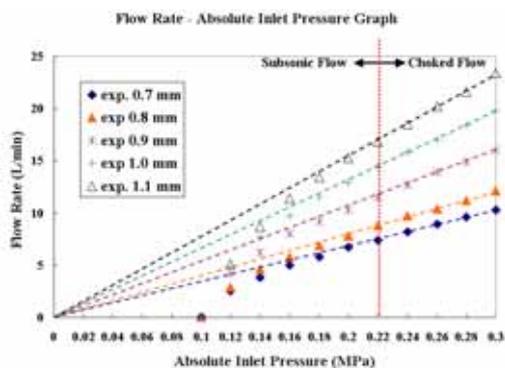


Fig.5 Flow Rate of Different Orifice Sizes

#### 4. 計測結果

ISO 規格 (ISO6358) および JIS 規格 (JIS B 8390) によれば, 空気圧システムの流量特性は音速コンダクタンス, 臨界圧力比によって評価される [7]. Fig.5 にオリフィス径を 0.7mm から 1.1mm まで変化させたときの, 上流圧力と流量の変化を示す. チョーク流れでは, 流量と上流圧力は比例している.

オリフィス径 0.7mm の弁に, 一連の駆動電圧レベルで ON/OFF ラッチを行った. Fig.6 に 0.25Hz で ON/OFF の切り替えを行ったときの出力流量の時間的变化を示す. 上流圧力が 0.1MPa の場合を Fig.6-(a) に示す. 上流圧力が 0.2MPa の場合を Fig.6-(b) に示す. 25V 以上での流量にはパルス比でわずかな出力容積の差異がみられた. また, この弁は 20V 以下の場合には流量調整弁として機能することができることがわかる.

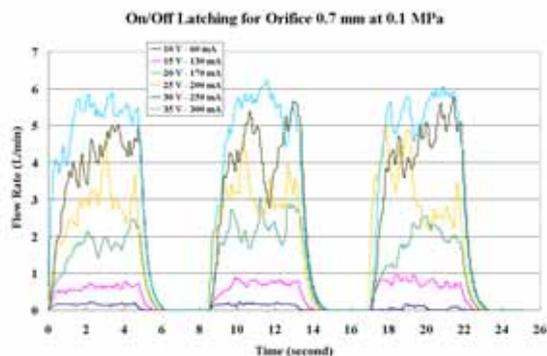
#### 5. 結言

本論文では小型無拘束ポペット弁の製作を行った. その上で, 力学解析を行った. また ON/OFF 制御のための駆動回路を製作し, 流量特性の計測, および ON/OFF 弁としての反応性の計測を行った.

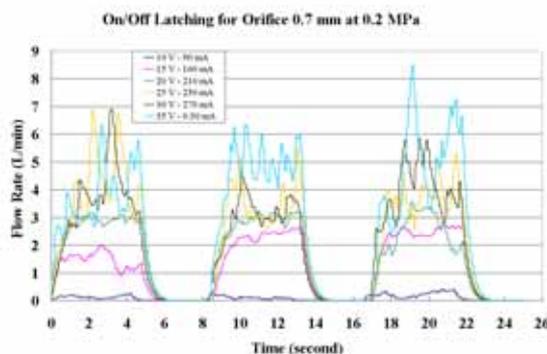
オリフィス径を 0.5mm まで実現することができた. オリフィス径 0.7mm の弁に電流 1A で 25V 以上

の電圧を印加した時に最大流量 20.9L/min が流れることがわかった.

今後は力学解析に基づき, 弁の力学シミュレーションを行う. また, 更なる小型化を行う.



(a) Pressure 0.1 MPa



(b) Pressure 0.2 MPa

Fig.6 Voltage-Control Volumetric Flow Rate

#### 参考文献

- G. Granosik and J. Borenstein, "Minimizing Air Consumption of Pneumatic Actuators in Mobile Robots", Int. Conf. on Robotics & Automation, pp. 3634-3639, New Orleans, April 2004.
- S. Davis, J. Canderle, P. Artrit, N. Tzagarakis, and D.G. Caldwell, "Enhanced Dynamic Performance in pneumatic Muscle Actuators", Int. Conf. on Robotics & Automation, pp.2836-2841, Washington DC, May 2002.
- C. Fu, Z. Rummler and W. Schomburg, "Magnetically driven micro ball valves fabricated by multilayer adhesive film bonding", Journal of Micromechanics and Microengineering, pp.96-102, 2003.
- Albert K. Henning, "Improved Gas Flow Model For Microvalves", 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, Boston, 2003.
- Blaine W. Andersen, "The Analysis and Design of Pneumatic Systems", John Wiley & Sons, Inc, 1967.
- E. Steltz, M. Seeman, and R.S. Fearing, "Power Electronics Design Choice for Piezoelectric Microrobots", Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1322-1328, Beijing, 2006.
- K. Kawashima, Y. Ishii, T. Funaki, and T. Kagawa, "Determination of Flow Rate Characteristics of Pneumatic Solenoid Valves Using an Isothermal Chamber", Journal of Fluids Engineering Vol. 126, pp.273-279, March 2004.