

# 自己保持機能を有するウェアラブル流体制御弁の解析

赤木 徹也・正子 祐輔<sup>\*</sup>・張 瑩<sup>\*</sup>・堂田 周治郎・上田 宗史<sup>\*\*</sup>

岡山理科大学工学部知能機械工学科

<sup>\*</sup> 岡山理科大学大学院工学研究科知能機械工学専攻

<sup>\*\*</sup> SMC株式会社

(2012年9月28日受付、2012年11月1日受理)

## 1. 緒言

ウェアラブル空気圧駆動システム<sup>1)</sup>の実現には、流体制御弁の小型化・省エネルギー化は大きな課題である。現在主流の制御弁は、圧力差による大きな力が加わったポペットをソレノイドで駆動するため弁の容積や重量が大きくなるという問題点がある。そこで、著者らは振動モータや磁石を用い、ポペット等に管路に直交する方向から小さな力を加え、弁の開閉を行う制御弁の開発について検討してきた<sup>2)</sup>。本論文では、開閉の状態を保持するためにエネルギーを必要としない自己保持型制御弁の最適設計のための弁解析モデルについて述べる。

## 2. 自己保持機能を有する小型制御弁

図1に自己保持機能を有する弁の構造の模式図と動作原理を示す。構造はチューブ内に入れた球状磁石とオリフィスから構成されるチェック弁の外に、ソレノイドを二つ用い、円柱状の永久磁石を挟むように配置する。弁のサイズは18×11×39mm、質量は12.7gである。動作原理は鉄心に磁着したシリンダ状磁石(①参照)が、右側にあるソレノイドを8msだけ励磁することで反発力を生じる(②参照)。その後、円柱状磁石は左側の鉄心に磁着し、同時に弁管路を塞いでいる球状磁石を引き付け、弁を開口した状態を保持する(③参照)。この際、電気的な入力を加えなくても開口が保持できる。また、弁を閉める場合は同様に左側のソレノイドを励磁し、反発力を生じ(④参照)、円柱状磁石を右側の鉄心に磁着させることで、球状磁石を引き付ける力が外れ、チェック弁の原理により自動的に弁を閉じる。また、500kPa供給時の最大流量は13.4ℓ/minと市販の小型弁(㈱KOGANEI G010)と同程度である。この弁の動特性の改善や小型化を目指す場合、球状磁石や円柱状磁石の動特性を含む解析モデルが必要である。そこで次節で弁解析モデルについて述べる。

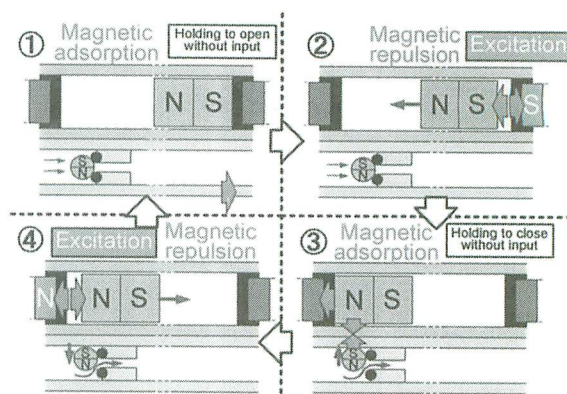


図1 自己保持弁の動作原理

## 3. 弁のモデル化

図2に提案する自己保持弁のモデル図を示す。モデルはA、B二つのソレノイドの電気回路式、円柱状磁石と球状磁石の運動方程式と流れの関係式からなる。円柱状磁石の運動方程式とソレノイドの電気回路式は以下の式で与えられる。

$$m_c \frac{d^2 x_c}{dt^2} + C_c \frac{dx_c}{dt} = F_{CA} + F_{CB} \quad (1)$$

$$L_A \frac{di_A}{dt} + R_A i_A = e_A \quad (2)$$

$$L_B \frac{di_B}{dt} + R_B i_B = e_B \quad (3)$$

ここで、 $m_c$ :円柱状磁石の質量、 $x_c$ :円柱状磁石の変位、 $C_c$ :粘性抵抗係数、 $F_c$ :ソレノイドにより円柱状磁石に加わる力、 $L$ :インダクタンス、 $i_A$ 、 $i_B$ :電流、 $R_A$ 、 $R_B$ :ソレノイドA、Bのコイル抵抗、 $e_A$ 、 $e_B$ :ソレノイドA、Bへの印加電圧である。添字のAはA側、BはB側のソレノイドを示す。

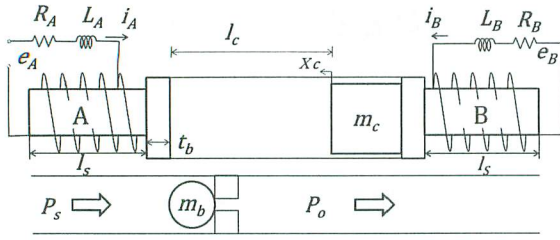


図2 自己保持弁の解析モデル

式(1)における力 $F_{CA}$  [N]、 $F_{CB}$  [N]は距離の関数として以下の実験式で与えることにする。

$i_A = 0$ ,  $0 < l_c - x_c + t_b < 3 \times 10^{-3} \text{ m}$ のとき

$$F_{CA} = \frac{0.001}{l_c + t_b - x_c} + 0.2449 \quad (4-1)$$

$i_A > 0$ ,  $0 < l_c - x_c + t_b < 3 \times 10^{-3} \text{ m}$ のとき

$$F_{CA} = -\frac{0.0006}{l_c - t_b + x_c} - 0.079 \quad (4-2)$$

$i_A = 0$ ,  $l_c - x_c + t_b \geq 3 \times 10^{-3} \text{ m}$ のとき

$$F_{CA} = 0 \quad (4-3)$$

$i_B = 0$ ,  $0 < x_c + t_b < 3 \times 10^{-3} \text{ m}$ のとき

$$F_{CB} = -\frac{0.001}{x_c + t_b} - 0.2449 \quad (5-1)$$

$i_B > 0$ ,  $0 < x_c + t_b < 3 \times 10^{-3} \text{ m}$ のとき

$$F_{CB} = \frac{0.0006}{x_c + t_b} + 0.079 \quad (5-2)$$

$i_B = 0$ ,  $x_c + t_b \geq 3 \times 10^{-3} \text{ m}$ のとき

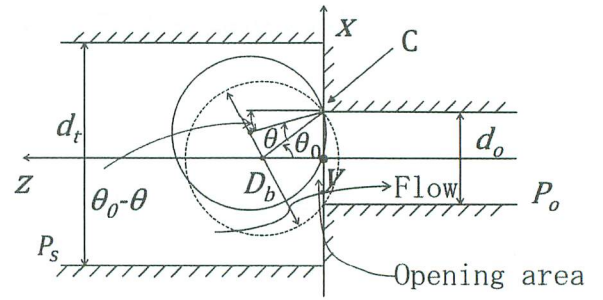
$$F_{CB} = 0 \quad (5-3)$$

図3(a)に球状磁石による弁の開口部のモデルを示す。弁の開口つまり球状磁石の移動は図3(a)の点Cを支点として、回転するものと考え、支点Cの周りのトルクのつり合いにより球状磁石の運動モデルを考えることができる。

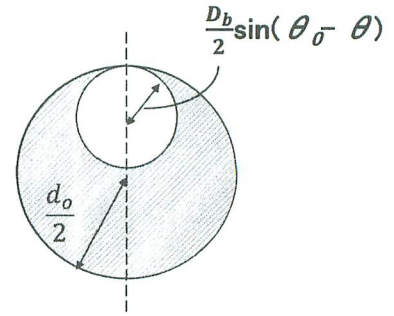
まず、球状磁石がオリフィス部分を塞いでいる状態(図の破線状態)において、球状磁石中心とC点を結ぶ直線がオリフィス軸となす角度を $\theta_0$ (初期角度と呼ぶことにする)とすると、幾何学的関係から初期角度 $\theta_0$ は次式で与えられる。

$$\theta_0 = \sin^{-1}(d_o/D_b) \quad (6)$$

ここで、 $d_o$ はオリフィス内径、 $D_b$ は球状磁石の直径である。



(a) モデル図



(b) 開口断面形状

図3 球状磁石による弁開口部のモデル

次に、円柱状磁石の力 $F_b$ による球状磁石へのトルク $\tau_{fb}$ (時計回りを正とする)は図3より次式で与えられる。

$$\tau_{fb} = \frac{D_b}{2} F_b \cos(\theta_0 - \theta) \quad (7)$$

ここで $\theta$ は初期値 $\theta_0$ 時からの角度変化分である。なお、 $F_b$  [N]は以下の実験式で与えることにする。

$$F_b = 0 \quad (X_c < X_{c \max}) \quad (8-1)$$

$$F_b = 0.1 \quad (X_c > X_{c \max}) \quad (8-2)$$

また、圧力差によって生じる力 $F_p$ によるトルク $\tau_{fp}$ は次式で与えられるものとする。

$$\tau_{fp} = \frac{\pi}{4} d_o^2 (P_s - P_o) \frac{d_o}{2} \quad (9)$$

また、弁が開口した時に流れる流体が球状磁石に作用する力 $F_o$ は、流体の運動量から計算でき、以下の式で表される。

$$F_o = \frac{4 \cdot Q_{ob}^2}{\rho \pi D_b^2} \quad (10)$$

ここで、質量流量 $Q_{ob}$ は、球状磁石に当たる流れの流量であり、オリフィス部を流れる流量を $Q_o$ とすると $Q_{ob}$ は



管路断面積と球状磁石の断面積の比で表されると考え  
ると、以下の式で与えられる。

$$Q_{ob} = \frac{D_b^2}{d_t^2} Q_o \quad (11)$$

ここで、 $d_t$  はチューブ内径である。

上記の関係から、流体の運動量によるトルク  $\tau_{FQ}$  は  
以下の式で与えられるものとする。

$$\tau_{FQ} = \frac{4D_b^2}{\rho\pi d_t^4} \cdot Q_o^2 \frac{d_o}{2} \quad (12)$$

$\theta$  の最大角度  $\theta_{max}$  は図3において球状磁石がチューブ  
壁にぶつかる時の角度で、幾何学的関係から、次式で  
表される。

$$\theta_{max} = \theta_0 + \sin^{-1}\left(\frac{d_t - D_b - d_o}{D_b}\right) \quad (13)$$

以上の関係式より、球状磁石に加わる合計トルク  $\tau =$   
 $\tau_{Fb} - \tau_{FP} - \tau_{FQ}$  は次式で与えられる。

$$\tau = \frac{D_b}{2} F_b \cos(\theta_0 - \theta) - \frac{\pi}{4} d_o^2 (P_s - P_o) \frac{d_o}{2} \\ - \frac{4}{\rho\pi} \frac{D_b^2}{d_t^4} \cdot Q_o^2 \frac{d_o}{2} \quad (14)$$

次に、球状磁石の回転の運動方程式は次式で与えら  
れる。

$$\frac{7m_b}{5} \left(\frac{D_b}{2}\right)^2 \frac{d^2\theta}{dt^2} + C_b \frac{d\theta}{dt} = \tau \quad (15)$$

次に、弁の開口面積  $S_o$  について考える。弁の開口面  
積  $S_o$  は球状磁石の角度  $\theta$  によって変化し、簡単のため、  
図3(b)に示すようにオリフィス断面積から球状磁石で  
隠れる面積を引いた面積とすると、次式で与えられる。

$$S_o = \frac{\pi}{4} \{d_o^2 - D_b^2 \sin^2(\theta_0 - \theta)\} \quad (16)$$

次に、開口時のオリフィス内を流れる質量流量  $Q_o$  は  
次式で与えられる。

$$Q_o = S_o P_s \sqrt{\frac{2}{RT}} f\left(\frac{P_o}{P_s}\right) \quad (17)$$

ここで、 $P_s$  はオリフィス上流側圧力、すなわち供給圧  
力、 $f(z)$  は流れの状態を示す関数で以下の式で与えら  
れる。

$$f(z) = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \left( z^{2/\kappa} - z^{(\kappa+1)/\kappa} \right) \quad (0.528 \leq z \leq 1) \quad (18)$$

$$f(z) = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa + 1}} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{2/(\kappa-1)} \quad (0 \leq z < 0.528)$$

図4に示すように弁の下流に一定容積の容量と固定開  
口面積を有する排気絞りが接続されているものとする  
と、容積内の圧力変化は供給流量  $Q_o$  と排気流量  $Q_a$  の差  
から以下の式で与えられる。

$$\frac{dP_o}{dt} = \frac{\kappa RT}{V_o} (Q_o - Q_a) \quad (19)$$

ここで、 $Q_o$  はオリフィスの質量流量である。また  $Q_a$  は  
排気絞りの質量流量であり、以下の式で与えられる。

$$Q_a = S_a P_o \sqrt{\frac{2}{RT}} f\left(\frac{P_a}{P_o}\right) \quad (20)$$

ここで、 $S_a$  は排気絞りの断面積、 $P_a$  は排気絞りの下流  
圧力(大気圧)である

以上の式(1)～(20)を用いて自己保持弁の圧力応答  
などの動特性を計算することができる。

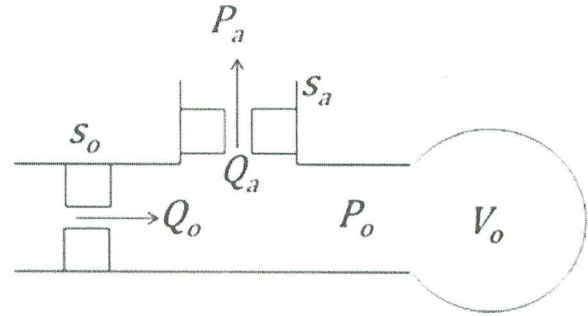


図4 弁排気部のモデル

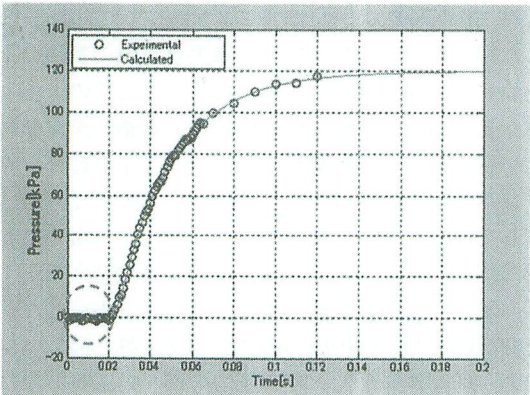
#### 4. 実験結果

表1にシステムパラメータの値と同定法を示す。同  
定法としては、ソレノイド間距離  $\theta_c$  や円柱状および  
球状磁石の質量  $m_c$ 、 $m_b$  など直接測定できる形状パラメ  
ータは測定することで求めた。また、直接測定が困難  
な粘性抵抗係数  $C_b$ 、 $C_c$  は弁にステップ状の電圧を印加  
した場合のシミュレーション結果と実際の実験結果が  
一致するように推定した。また、おおよその大きさが  
分かる容積  $V_o$  は同様に圧力応答の計算結果が実験結果  
と一致するように微調整した。ソレノイドのインダク  
タンス  $L_A$ 、 $L_B$  は計算により求めた。図5(a)、(b)に提  
案した解析モデルと同定したパラメータを用いた弁の  
圧力応答のシミュレーション結果と実験結果を示す。  
図5(a)は一定の排気絞りを有する容積を接続した状態  
で弁をONにした時の圧力のステップ応答、図5(b)は弁  
をON/OFF動作させたときの圧力のパルス応答結果(パ  
ルス幅0.1s)である。○は実験結果、実線は計算結果

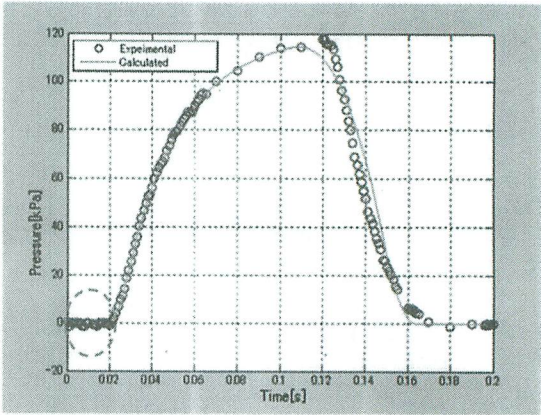
である、いずれの図も、ON時の円柱状磁石や球状磁石の挙動に伴うむだ時間(0.02s)の大きさや圧力の応答が一致しており、提案した解析モデルの有効性が確認できる。なお、図5(b)の弁OFF時の応答は計算結果と実験結果に差が見られる。この原因として、OFF時の球状磁石の挙動の違いが考えられるが、原因究明と解析モデルの改良は今後の課題である。

表 1 システムパラメータの値と同定法

パラメータ	値	同定法
球状磁石の粘性抵抗係数 $C_b$ [kg・m <sup>2</sup> /s]	4	シミュレーションから調整
円柱状磁石の粘性抵抗係数 $C_c$ [kg/s]	0.21	シミュレーションから調整
球状磁石の直径 $D_b$ [m]	2x10 <sup>-3</sup>	測定
オリフィス内径 $d_o$ [m]	5x10 <sup>-4</sup>	測定
チューブ内径 $d_t$ [m]	2.5x10 <sup>-3</sup>	測定
比熱比 $\kappa$	1.4	定数
ソレノイド間距離 $\ell_c$ [m]	8x10 <sup>-3</sup>	測定
ソレノイドのインダクタンス $L_A, L_B$ [H]	7.25x10 <sup>-3</sup>	計算による
円柱状磁石の質量 $m_c$ [kg]	0.8x10 <sup>-3</sup>	測定
球状磁石の質量 $m_b$ [kg]	0.033x10 <sup>-3</sup>	測定
大気圧 $P_a$ [Pa]	101.3x10 <sup>3</sup>	定数
気体定数 $R$ [J/(kg・K)]	287	定数
コイル抵抗 $R_p, R_B$ [Ω]	1.2	測定
排気絞りの断面積 $S_a$ [m <sup>2</sup> ]	0.535x10 <sup>-6</sup>	測定
絶対温度 $T$ [K]	300 (27℃)	定数
容積 $V_o$ [m <sup>3</sup> ]	3x10 <sup>-5</sup>	測定し、シミュレーションで微調整
ゴム板の厚さ $t_b$ [m]	1x10 <sup>-3</sup>	測定



(a) ステップ応答結果



(b) パルス応答結果 (パルス幅: 0.1s)

図5 シミュレーション結果と実験結果

5. 結 言

自己保持機能を有する流体制御弁の解析を目指した本研究は以下のように要約される。

- 1) 円柱状磁石および球状磁石の挙動やソレノイドの電気回路、流体の挙動を含む自己保持弁の解析モデルを提案した。
- 2) 提案した解析モデルと同定したパラメータを用いた弁圧力応答の計算結果と実験結果を比較し、磁石の挙動による弁のむだ時間や圧力応答がよく一致していることを確認した。

提案解析モデルを用いた弁の性能改善や最適設計は今後の課題である。

参考文献

- 1) 長田義仁編：ソフトアクチュエータ開発の最前線～人工筋肉の実現をめざして～, NTS, (2004), pp.294-321(2004)
- 2) Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta and Hirofumi Ueda: Development of Small-sized Fluid Control Valve with Self-holding Function using Permanent Magnet, Journal of System Design and Dynamics, Vol.4, No.4, pp.552-513 (2010)
- 3) Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta and Hirofumi Ueda: Improvement of Fluid Control Valve with Self-holding Function using Permanent Magnet, Journal of System Design and Dynamics, Vol.5, No.6, pp.1251-1263 (2011)



## Analysis of Wearable Fluid Control Valve with Self-holding Function

Tetsuya AKAGI, Yusuke MASAGO<sup>\*</sup>, Ying ZHANG<sup>\*</sup>,

Shujiro DOHTA and Hirofumi UEDA<sup>\*\*</sup>

*Department of Intelligent Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,*

*\* Graduate School of Engineering,*

*Okayama University of Science,*

*1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan*

*\*\* SMC Corporation,*

*4-14-1 Sotokanda, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0021, Japan*

(Received September 28, 2012; accepted November 1, 2012)

For the realization of the wearable pneumatic driving system, the miniaturization and the saving energy of the fluid control valve are very important problems. We have developed a small-sized pneumatic control valve with a self-holding function to keep the valve open or close as a control valve which can be driven for a long time. This valve consists of a flexible tube, a brass valve seat (orifice), a permanent magnetic ball, a cylindrical permanent magnet, a thin plastic cylinder and two handmade solenoids. In this paper, an analytical model of the control valve with self-holding function is proposed for the optimal design of the valve. And the calculated dynamics of the valve is compared with the experimental result.

**Keywords:** analytical model; wearable valve; self-holding function; lower energy consumption.