パイロット形空気圧用2ポート電磁弁の動特性*

新 井 正 彰^{*1}Dynamic Behavior of a 2-Port Pilot-Operated Solenoid Valve
for Pneumatic Use

Masaaki ARAI

In this study, the dynamic behavior and operating condition of a 2-port pilot-operated solenoid valve were examined. The experiments were done by changing the upstream pressure or the diameter of the pilot orifice. Steady or unsteady thrusts of the valve were analyzed by the control volume determined by the discharge chamber. From comparison of the experimental results with the calculated value, the following conclusions were obtained. The pressure p_{2o} and p_{2s} defined by eq. (5), (6) gave an indication of the design for the operation of the valve. As a time-lag response of p_3 , the characteristics of unsteady thrust which significantly affects the dynamic behavior of the valve is different from that of steady thrust. The dynamic behavior was considerably affected by the pressure distribution at the valve seat when the displacement of the valve was very small.

Key Words: Fluid Power Systems, Compressible Flow, Solenoid Valve, Pilot Valve, Dynamic Behavior, Thrust of Valve

1. ま え が き

近年、各種電磁弁の高速化の要求が高まるに従って、それらの動特性を知ることが大変重要になっている。本研究では、比較的大きな流量を必要とする空気圧回路の方向制御に良く用いられるパイロット形電磁弁を扱った。いわゆるパイロット弁には種々の形式があるが、2ポートの場合の大部分のパイロット圧は給排気同時に制御され、弁作動の可否は主にその圧力に左右される。また作動後の弁の運動は非定常スラストによりほぼ定まる。圧縮流体に関する弁のスラストの報告は非圧縮と比べると非常に少なく⁽¹⁾⁽²⁾、それも定常でしかも簡単な形状に限られ、また非定常についてのそれは見受けられない。さらに、パイロット圧を制御する給排気オリフィスと弁作動の関係についての報告も見当たらない。以上の事情により、この種の弁についてはいまだ明らかでない点が多い。

実験には弁変位の測定を容易とする構造に設計した2ポート、通電開形のパイロット弁を用い、上流側の圧力やパイロットオリフィスの径を種々変えて作動

条件あるいは動特性を調べた。解析はまず弁の作動を支配する諸因子を明確にし、また等温変化におけるむだ時間は定積分で提示した。次に排気側弁室を検査体積として定常あるいは非定常におけるスラスト特性を解析し、弁の動特性を解明した。

2. 解 析

2・1 主な記号 A : 面積, C : 流量係数, C_c : オリフィス A_{34} における収縮係数, C_d : 流体力損失係数, C_f : スラスト係数, d : 内径, F : スラスト, F_d : 流体力損失, F_g : 静止摩擦力, F_r : 動摩擦力, g : 重力加速度, k : 弁ばね定数, $m: 1, 2, \dots, \dot{m}$: 質量流量, m_v : 弁質量, $n: 1, 2, \dots, p$: 圧力, p_d : 検査面 A_3-A_{34} に及ぼす圧力, p_u : 検査面 A_2-A_5 に及ぼす圧力, r : 半径, R : 気体定数, t : 時間, t_d : むだ時間, T : 絶対温度, u : 流速, V : 容積, y : 弁変位, y_d : 弁ばね初期ひずみ, y_m : 弁最大変位, x : 比熱比, ρ : 密度

添字, 1: 弁室, 2: パイロット室, 3: 排気室, 4: 大気, a : 平均圧力, i : 非圧縮, mn : m から n へ流れるときの質量流量等か, 検査面 A_m-A_n におけるスラスト, o : 弁が開き始めるとき, s : 圧力 p_2 が定常のとき, t : 全圧あるいは全温度, z : 弁変位が零

* 平成元年6月3日 ロボティクス・メカトロニクス講演会'89において講演, 原稿受付 昭和63年7月7日。

^{*1} 正員, 東京農工大学工学部 (〒184 小金井市中町2-24-16)。

表 1 各ケースにおける $\bar{P}_4$ と $\bar{A}_{24}$ の範囲

Case	Range of $\bar{P}_4$	Range of $\bar{A}_{24}$
1 $\bar{P}_{2s} > \bar{P}_c, \frac{\bar{P}_4}{\bar{P}_{2s}} > \bar{P}_c$	$\bar{P}_c \leq \bar{P}_4 < 1$ $\bar{P}_4^2 < \bar{P}_4 < \bar{P}_c$	$0 < \bar{A}_{24} < \infty$ $\bar{P}_c \varphi^*(\bar{P}_4/\bar{P}_c)/(\bar{P}_4 \bar{K}_c) < \bar{A}_{24} < \bar{K}_c/(\bar{P}_c \varphi^*(\bar{P}_4/\bar{P}_c))$
2 $\bar{P}_{2s} > \bar{P}_c, \frac{\bar{P}_4}{\bar{P}_{2s}} \leq \bar{P}_c$	$\bar{P}_4^2 < \bar{P}_4 < \bar{P}_c$ $0 < \bar{P}_4 \leq \bar{P}_4^2$	$0 < \bar{A}_{24} \leq \bar{P}_c \varphi^*(\bar{P}_4/\bar{P}_c)/(\bar{P}_4 \bar{K}_c)$ $0 < \bar{A}_{24} < 1/\bar{P}_c$
3 $\bar{P}_{2s} \leq \bar{P}_c, \frac{\bar{P}_4}{\bar{P}_{2s}} > \bar{P}_c$	$\bar{P}_4^2 < \bar{P}_4 < \bar{P}_c$ $0 < \bar{P}_4 \leq \bar{P}_4^2$	$\bar{K}_c/(\bar{P}_c \varphi^*(\bar{P}_4/\bar{P}_c)) \leq \bar{A}_{24} < \infty$ $\bar{P}_c/\bar{P}_4 < \bar{A}_{24} < \infty$
4 $\bar{P}_{2s} \leq \bar{P}_c, \frac{\bar{P}_4}{\bar{P}_{2s}} \leq \bar{P}_c$	$0 < \bar{P}_4 \leq \bar{P}_4^2$	$1/\bar{P}_c \leq \bar{A}_{24} \leq \bar{P}_c/\bar{P}_4$

$$\bar{A}_{24} = C_{24} A_{24} / (C_{12} A_{12})$$

$$\bar{K}_c = [x \{2/(x+1)\}^{(x+1)/(x-1)} / 2]^{1/2}$$

$$\bar{P}_c = \{2/(x+1)\}^{x/(x-1)}$$

$$\bar{P}_n = p_n/p_1, \bar{P}_{n1} = p_n/p_{21}, \bar{T}_2 = \sqrt{T_2/T_1}$$

$$\tau = 3/(2x), \mu = \sqrt{2RT_1} C_{12} A_{12} / V_{2x}$$

$$\varphi(\bar{P}) = \{x(\bar{P}^{2/x} - \bar{P}^{(x+1)/x}) / (x-1)\}^{1/2}$$

$$\varphi^*(\bar{P}) = \sqrt{(1-\bar{P})(1-\tau+\tau\bar{P})}$$

2.2 作動条件とむだ時間 t_d 実験に用いた弁を
図 1 に示す。また以下の解析は弁開時のみとし、閉時
は割愛する。仮定 1: 弁の運動は短時間で終了するの
で弁室内圧力 p_1 は一定とする。弁の運動方程式は

$$m_v \ddot{y} + k(y + y_d) + m_v g + F_r \\ + A_2(p_2 - p_4) - C_f A_1(p_1 - p_4) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $C_f = F_r / \{A_1(p_1 - p_4)\}$ と与えられる。パイロ
ット室 V_2 内のエネルギー式と連続の式から $\dot{p}_2$, $\dot{T}_2$ は
次式で表される。

$$\dot{p}_2 = x \{R(T_1 \dot{m}_{12} - T_2 \dot{m}_{24}) + p_2 A_2 \dot{y}\} / V_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\dot{T}_2 = T_2 \{R(x T_1 - T_2) \dot{m}_{12} - R T_2 (x-1) \dot{m}_{24} \\ + (x-1) A_2 p_2 \dot{y}\} / (V_2 p_2) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

$$\dot{m}_{12} = \sqrt{2/(RT_1)} C_{12} A_{12} p_1 \varphi(\bar{P}_2)$$

$$\dot{m}_{24} = \sqrt{2/(RT_2)} C_{24} A_{24} p_2 \varphi(\bar{P}_4/\bar{P}_2)$$

$$V_2 = V_{2x} - A_2 y, \bar{P}_4 = p_4/p_1, p_2 \doteq p_{21}$$

また圧力比が $\bar{P}_c$ 以下のときは φ を $\bar{K}_c$ で置けば良い。

t_d は p_2 が変動を開始してから弁が動き出すまでの
時間であるから、この間は $\dot{y} = \ddot{y} = 0$ である。また φ
のテイラー展開による近似式⁽³⁾ φ^* の最大誤差は圧力
比が $\bar{P}_c$ のときで、 $x=1.4$ の場合は 0.2% と小さい。そ
こで、これを用いて式(2)を整理すると次式となる。

$$\dot{\bar{P}}_2 = x \mu \{\varphi^*(\bar{P}_2) - \bar{A}_{24} \bar{T}_2 \bar{P}_2 \varphi^*(\bar{P}_4/\bar{P}_2)\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式(1)から弁が開き始めるときの無次元パイロット
圧力 $\bar{P}_{2o}$ が次の条件を満足すれば、弁は作動する。

$$\bar{P}_{2o} = \{C_{f2} A_1 (1 - \bar{P}_4) - (k y_d + m_v g \\ + F_r) / p_1\} / A_2 + \bar{P}_4 > \bar{P}_{2s} \quad \dots\dots\dots (5)$$

図 1 実験に用いたパイロット弁

給排気が定常となる無次元パイロット圧力 $\bar{P}_{2s}$ は式
(4) より、 $\bar{P}_2$ に関する 2 次方程式の根として求まる。
また同式は両者の圧力比が $\bar{P}_c$ より大のときであるが、
これらの関係は $\bar{P}_4$ あるいは $\bar{A}_{24}$ によって定まり、表
1 に分類して示した。表中のケース 1~4 を表すのに上
側添字 c_{1-4} を付すと $\bar{P}_{2s}^{c_{1-4}}$ は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{P}_{2s}^{c_1} &= \frac{-(2\tau-1)(\bar{A}_{24}^2 \bar{P}_4 - 1) + \sqrt{Z_1}}{2\{\bar{A}_{24}^2(1-\tau) + \tau\}} \\ \bar{P}_{2s}^{c_2} &= \frac{(2\tau-1) + \sqrt{1+4(\bar{K}_c \bar{A}_{24})^2(1-\tau)}}{2\{(\bar{K}_c \bar{A}_{24})^2 + \tau\}} \\ \bar{P}_{2s}^{c_3} &= \frac{-\bar{A}_{24} \bar{P}_4 (2\tau-1) + \sqrt{Z_3}}{2\bar{A}_{24}(1-\tau)} \\ \bar{P}_{2s}^{c_4} &= 1/\bar{A}_{24} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、

$$Z_1 = (\bar{A}_{24}^2 \bar{P}_4 - 1)^2 + 4\bar{A}_{24}^2(1-\tau+\tau\bar{P}_4)^2, \\ Z_3 = (\bar{A}_{24} \bar{P}_4)^2 + 4\bar{K}_c^2(1-\tau)$$

今, パイロット室内温度 T_2 の変動を省略してこれが T_1 に等しいと仮定すると, $\bar{T}_2=1$ となる. これらを考慮して式(4)を $\bar{P}_2$ で積分すると t_d^{c1-c4} は次式で与えられる.

$$\left. \begin{aligned} t_d^{c1} &= \frac{1}{\chi\mu\{\bar{A}_{24}^2(1-\tau)+\tau\}} \left[\sqrt{\tau} \sin^{-1}\phi_1 + \bar{A}_{24}\sqrt{\tau-1} \sin^{-1}\phi_2 + \frac{1}{\bar{P}_{2s}^{c1}-\bar{Q}_{2s}^{c1}} \right. \\ &\quad \times \left\{ f_1(\bar{P}_2, \bar{P}_{2s}^{c1}) + \bar{P}_{2s}^{c1}\bar{A}_{24}f_1\left(\frac{\bar{P}_4}{\bar{P}_2}, \frac{\bar{P}_4}{\bar{P}_{2s}^{c1}}\right) - f_2(\bar{P}_2, \bar{Q}_{2s}^{c1}) - \bar{Q}_{2s}^{c1}\bar{A}_{24}f_2\left(\frac{\bar{P}_4}{\bar{P}_2}, \frac{\bar{P}_4}{\bar{Q}_{2s}^{c1}}\right) \right\} \left. \right] \frac{(\bar{P}_2)_2}{(\bar{P}_2)_1} \\ t_d^{c2} &= \frac{1}{\chi\mu\{(\bar{K}_c\bar{A}_{24})^2+\tau\}} \left[\sqrt{\tau} \sin^{-1}\phi_1 + \frac{1}{\bar{P}_{2s}^{c2}-\bar{Q}_{2s}^{c2}} \left\{ f_1(\bar{P}_2, \bar{P}_{2s}^{c2}) - f_1(\bar{P}_2, \bar{Q}_{2s}^{c2}) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{\bar{A}_{24}\bar{K}_c(\bar{P}_{2s}^{c2}+\bar{Q}_{2s}^{c2})}{2} \ln\left(\frac{\bar{P}_2-\bar{Q}_{2s}^{c2}}{\bar{P}_2-\bar{P}_{2s}^{c2}}\right) \right\} - \frac{\bar{A}_{24}\bar{K}_c}{2} \ln\{(\bar{P}_2-\bar{P}_{2s}^{c2})(\bar{P}_2-\bar{Q}_{2s}^{c2})\} \right] \frac{(\bar{P}_2)_2}{(\bar{P}_2)_1} \\ t_d^{c3} &= \frac{1}{\chi\mu\bar{A}_{24}(1-\tau)} \left[\sqrt{\tau-1} \sin^{-1}\phi_2 + \frac{1}{\bar{P}_{2s}^{c3}-\bar{Q}_{2s}^{c3}} \left\{ \bar{P}_{2s}^{c3}f_1\left(\frac{\bar{P}_4}{\bar{P}_2}, \frac{\bar{P}_4}{\bar{P}_{2s}^{c3}}\right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \bar{Q}_{2s}^{c3}f_1\left(\frac{\bar{P}_4}{\bar{P}_2}, \frac{\bar{P}_4}{\bar{Q}_{2s}^{c3}}\right) + \frac{\bar{K}_c}{\bar{A}_{24}} \ln\left(\frac{|\bar{P}_2-\bar{Q}_{2s}^{c3}|}{\bar{P}_2-\bar{P}_{2s}^{c3}}\right) \right\} \right] \frac{(\bar{P}_2)_2}{(\bar{P}_2)_1} \\ t_d^{c4} &= \frac{1}{\chi\mu\bar{K}_c\bar{A}_{24}} \left[\ln(\bar{A}_{24}\bar{P}_2-1) \right] \frac{(\bar{P}_2)_2}{(\bar{P}_2)_1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

ここに,

$$\begin{aligned} \phi_1 &= 2\tau\bar{P}_2 - 2\tau + 1, \quad \phi_2 = 2(\tau-1)\bar{P}_2/\bar{P}_4 - 2\tau + 1, \quad \varphi_a^*(\chi) = \sqrt{1-(1-\chi)(1-\tau+\tau\chi)} \\ f_1(\chi_1, \chi_2) &= \varphi_a^*(\chi_2) \ln \left\{ \frac{2\varphi_a^*(\chi_1)\varphi_a^*(\chi_2) + (2\tau-1)(\chi_1+\chi_2) - 2(\tau\chi_1\chi_2 + \tau-1)}{|\chi_1-\chi_2|} \right\} \\ f_2(\chi_1, \chi_2) &= \varphi_a^*(\chi_2) \sin^{-1} \left\{ \frac{(2\tau-1)(\chi_1+\chi_2) - 2(\tau\chi_1\chi_2 + \tau-1)}{|\chi_1-\chi_2|} \right\} \end{aligned}$$

なお, $\bar{Q}_{2s}^{c1-c3}$ は式(6)の平方記号の前の符号を負としたもう一つの根を表す. また, $(\bar{P}_2)_{1,2}$ は積分区間を表す.

2.3 弁に及ぼすスラスト F_2 の解析 図2に排気室 V_3 のコントロールボリューム(以下 C.V と表す)を示す. ただし, 出口面積 A_{34} は $16 \times \phi 6$ 穴である. 式を導くに当たり次の仮定を設ける.

仮定2: 検査面 A_4 - A_5 に及ぼす圧力は平均圧力 p_{ua} に等しい. 仮定3: 定常での C.V 上, 下面それぞれの平均圧力 p_{ua} と p_{da} は p_3 にだいたい等しいなるので, V_3 における密度の積分は ρ_3 の一様近似とする.

式(2), (3)と同様に, 排気室 V_3 内のエネルギー式と連続の式より $\dot{p}_3$, $\dot{T}_3$ は次式で与えられる.

$$\dot{p}_3 = \chi \{ R(T_1\dot{m}_{13} - T_{3t}\dot{m}_{34}) - A_3 p_3 \dot{y} \} / V_3 \quad \dots (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{T}_3 &= T_3 \{ R(\chi T_1 - T_3)\dot{m}_{13} - R(\chi T_{3t} \\ &\quad - T_3)\dot{m}_{34} - (\chi-1)A_3 p_3 \dot{y} \} / (V_3 p_3) \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

ここに,

$$\dot{m}_{13} \doteq \sqrt{2/(RT_1)} C_{13} \pi d_1 y p_1 \varphi(\bar{P}_3)$$

$$\dot{m}_{34} \doteq \sqrt{2/(RT_{3t})} C_c A_{34} p_{3t} \varphi(\bar{P}_{4t})$$

$$V_3 \doteq A_3(y+y_3), \quad C_{34} \doteq C_c, \quad \dot{u}_3 \doteq 0$$

また圧力比が $\bar{P}_c$ 以下のときは前節と同様である.

圧縮を考慮した一次元運動量の式は次式となる.

$$\begin{aligned} \int_{c.s} u_y (\rho v' \cdot n) dA + \frac{\partial}{\partial t} \int_{c.s} \rho u_y dV \\ = - \int_{c.s} p l dA \quad \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ここに, n : 面素 dA の外向き法線ベクトル, v : 流速ベクトル, v' : 面素 dA の移動速度に対する相対流速ベクトル, l : n の y 軸方向余弦, u_y : y 軸方向成分流速

2.3.1 定常の場合 式(10)より検査面 A_2 - A_5 における平均圧力 p_{ua} は次式で与えられる.

$$\begin{aligned} p_{ua} &= \{ u_{34}\dot{m}_{34} - u_{13}\dot{m}_{13} \cos \theta + (A_3 - A_{34})p_{da} \\ &\quad + C_c A_{34}(p_{34} - p_4) + A_{34}p_4 \} / A_3 \quad \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

ただし, 流入部では $u_y = u_{13} \cos (180^\circ - \theta)$

p_{ua} よりスラスト F_2 は次式となる.

$$\begin{aligned} F_2 &= (A_2 - A_5)(p_{ua} - p_4) + A_1(p_1 - p_4) \\ &\quad + (A_5 - A_1)(p_{13} - p_4) \quad \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

式(11)にある検査面 A_3 - A_{34} における平均圧力 p_{da} は図2に示す流体力損失 F_d を用いて次式で与える.

$$p_{da} = \{ p_3(A_3 - A_{34}) - F_d \} / (A_3 - A_{34}) \quad \dots\dots\dots (13)$$

また F_d は流体力損失係数 C_d より

$$F_d = C_d(\dot{m}_{34})^2 / (\rho_3 A_{34}) \quad \dots\dots\dots (14)$$

と与えられる. ここに, 収縮係数 C_c と C_d の求め方は Benedict⁽⁴⁾と同様である. なお, これらを求めるとき必要な全圧 p_{3t} と圧力 p_3 は次のように定める. p_{3t} は式(6)と同じに, また p_3 は $\dot{m}_3 = \dot{m}_{34}$ の条件より

$$p_{3t}^{(\kappa-1)/\kappa} = \frac{p_3^{(\kappa+1)/\kappa} - C_c^2 \beta^4 p_4^{(\kappa+1)/\kappa}}{p_3^{2/\kappa} - C_c^2 \beta^4 p_4^{2/\kappa}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここに, $\beta^2 = A_{34}/A_3$

の関係にあるから上式より p_3 が定まる. さらに p_4/p_{3t} が $\bar{P}_c$ 以下のときも同様の条件で定める.

2・3・2 非定常の場合 式(10)左辺第2項は連続の式とガウスの発散定理⁽⁵⁾および仮定3:より

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{c.v.} \rho u_y dV = \frac{d}{dt} \left\{ -\frac{1}{2} y \dot{m}_{13} - y_3 \dot{m}_{34} + y A_3 \rho_3 \dot{y} + \frac{1}{2} (y - y_3) V_3 \dot{\rho}_3 \right\} \dots\dots\dots (16)$$

と与えられる。上式には種々の時間微分項が現れるが、検査面 A_2-A_1 におけるスラスト F_{21} に対する割合が極めて小さい項を省略すると p_{ua} は次式となる。

$$p_{ua} = \text{式(11)右辺} + \{ (y \dot{m}_{13} + \dot{y} \dot{m}_{13}) / 2 + y_3 \dot{m}_{34} - (y - y_3) V_3 \dot{\rho}_3 / 2 \} / A_3 \dots\dots\dots (17)$$

上式および式(12)より F_2 が定まるので、弁の動特性は式(1), (2), (3), (8), (9)の連立微分方程式の計算によって与えられる。なお C_c と C_d は前節から得られた結果を最小二乗法により $\bar{P}_{4t}$ の4次式に近似する。

2・3・3 弁変位 y が極めて小さい場合 このときは $F_{25} \approx 0$ となるため、スラスト F_{21} は弁座の圧力によりほぼ定まる。そこで、 $F_{21} \approx F_{51}$ と置いて図2点線で示す弁座部分を C.V とし、かつ弁座すきまは末広ノズルとする。つまり検査面 A_5-A_1 に圧力分布を考慮する。また、これの解析は一色⁽⁶⁾と同様の方法で行った。すなわち空気の粘性を考慮し、ノズル内を層流境界層流れとした。

y が極めて小さいとき、各諸量の変動も小さいので非定常の場合も同様とし、 y により定まるスラスト F_{51} を y/y_m に関する3次式に近似する。なお、本項を適用する y の範囲は圧力分布の解が求まるところ（特性レイノルズ数 Re_N が約700以下）までとした。

3. 実験方法と実験結果

3・1 実験方法 図1に示す弁シートは閉時に大きな衝撃力を受けるので、その材質は黄銅とした。なお弁座幅は0.8mmである。また弁しゅう動部の摩擦力を極力小さくするために、この部分は研磨仕上げとしてOリングのつぶし代も規格値よりかなり小さくした。メインオリフィス上部には邪魔板を設け、給気流量 $\dot{m}_{12}$ が V_2 内に十分拡散するようにした。弁変位は弁と一体のスカートとアルミはく間の静電容量の変化で、また圧力 $p_{1,2}$ は半導体形圧力変換器で測定した。

図3に実験装置の概略を示す。圧縮空気はフィルタ、減圧弁、空気タンクを通り V_1 内へ入る。静電容量の変化は微小変位計と直流増幅器を通り、また圧力変換器の出力はひずみ計を通してそれぞれ電磁オシログラフにつながれている。実験条件は表2に示した。表中の

記号は以後に示す図で実測値を表し、これらは実験番号と対応する。実験手順は次のとおりである。まずパイロットオリフィスの径 d_{24} を所定のものとして絞り弁あるいは減圧弁によって p_1 を表2に示す圧力に設定する。次にナフスイッチにより弁を急開閉させ、そのときの各諸量の変動を電磁オシロに記録する。

なお、邪魔板を除去した場合についても同様の実験を行った。

3・2 実験結果 まず静特性の実験結果を図4, 5に示す。図4から流量係数 C_{24} はレイノルズ数あるいはプランジャ部における流れの抵抗の影響で、圧力比 p_4/p_2 と d_{24} の値によりそれぞれ変化している。図5にスラスト係数 C_f の実験結果を示す。またスラストは重りで測定し、圧力 p_1 は約0.2MPaとした。図から C_f は弁変位の小さい所で一度下がってその後 y とともに上昇していることがわかる。

図6に弁の動特性の一例を示す。圧力 p_2 が弁に及ぼす力によりシート上端に挿入してあるテフロンシートが圧縮されるため、 y の位置はその圧力によって多少変わる。そこで p_2 が大気圧のときを $y=0$ とした。図から開時における弁速度は y とともに上昇していることがわかる。また閉終了後における諸量が振動しているのは特に金属シートを用いたことに、また閉動作前の y の山形の雑音はソレノイドの励磁電流を切ったことによる。

4. 実験と計算結果の比較

4・1 定常状態における圧力 p_{2s} 図7に p_{2s} の実測値と計算値を示す。図中の実測値は動特性実験で弁が作動したかどうかとも表している。黒塗り印 No.3-1 では y が約0.4mmで定常となり、全開はしなかった。また No.4-5, 7では約1秒と極めて長いむだ時間後弁は全開するが、これは弁座接触面圧の低下のため生じるもれによる p_1 の降下が原因と認められるので、黒塗り印とした。図から p_1 を高圧にしても、弁作動は必ずしも良くならないことがわかる。

計算に用いた C_{24} は図4に示す最大と最小の平均値とした。また No. $n-1$ の場合は p_4/p_{2s} が1に近くなり、 C_{24} が著しく低下するので、図中の値とした。静止摩擦力 F_q は圧力 p_{2o} の実測値より求めた。また F_q は実験条件により異なるが、比較の都合上、図7, 8および図12は No.1-1の9.5≒10Nを用いた。その他は表3に示す値を用いた。ただし弁変位が零のときのスラスト係数 C_{fz} は表4に示す No. $n-1 \sim 7$ の平均値とした。

弁が開くためには実線が一点鎖線より下にある必要があり、この条件は実験結果をほぼ満足に説明してい

表 2 実験条件と実験番号および実験記号

Test number	Test number						P_1 MPa
	No.1-1	No.2-1	No.3-1	No.4-1	No.5-1	No.6-1	
	No.1-3	No.2-3	No.3-3	No.4-3	No.5-3	No.6-3	
	No.1-5	No.2-5	No.3-5	No.4-5	No.5-5	No.6-5	
	No.1-7	No.2-7	No.3-7	No.4-7	No.5-7	No.6-7	
d_{24} mm	3.5	3.3	3.0	2.7	2.5	2.2	
Symbol	○	⊖	① ②	⊗ ⊙	△ ▲	□ ■	
	0.199 (1Kgf/cm ² ·gage)						
	0.395 (3Kgf/cm ² ·gage)						
	0.591 (5Kgf/cm ² ·gage)						
	0.787 (7Kgf/cm ² ·gage)

図 2 排気室 V_3 のコントロールボリューム

- 1: Compressor
2,3: Throttle valve
4: Filter
5: Reducing valve
6: Air receiver
7,9: Pressure gage
8: Test valve
10: Knife switch
11: Power source
12: Midi-meter
13: Strain amplifier
14: DC Amplifier
15: Electromagnetic oscillograph

図 3 実験装置

図 4 流量係数 C_{12} と C_{24} の実測値

る。また図4より当然ながら、 p_1 を高圧あるいは d_{24} を小さくすると実測と計算値の差は大きくなる。

なお各圧力 p_1 において、図中の一点鎖線に最も近い白ぬき印の流量特性値 $\dot{m}_{240}/\dot{m}_{120}$ はそれぞれほぼ近い値で約 1.1 である。すなわち特性値をこれ以上にとれば、弁は全開する。これと同様のことが言える圧力比 p_{20}/p_{2s} は約 1.06 とほぼ 1 に近い値であった。これは 4・3 節に述べるスラスト特性が若干の落込みはあるものの、全体的には y とともに増大するためである。

4・2 むだ時間 t_d 図 8 に t_d の実測値と計算値を示す。図中の点線は式 (2), (3) の数値積分を表し、実線は等温変化として式 (7) より求めた値である。両者と実測値を比較すると、だいたい点線のほうが近い傾向にある。また実線に近いものについては図 4 から

図 5 スラスト係数 C_f

C_{24} が図中の値より大きいと考えられる。したがって、圧力 p_2 は断熱に近い状態変化をすると言える。また t_d に含まれるケース 2 のむだ時間 t_{d2} は $\bar{P}_4 < \bar{P}_2^*$ のとき、点線と実線ともに圧力 p_1 に関係なく一定となり、実測値も同様の傾向を示している。

なお p_2 が変動を開始してから全開するまでの弁の応答時間に占める t_d の割合は No.1, 2 それぞれの実測値平均がともに約 5 割と大きかった。したがって応答時間で弁を評価する場合、 t_d は無視できないと言え

る。

4.3 スラスト係数 C_f 図5に無次元弁変位 y/y_m に対する定常のスラスト係数 C_f の計算結果を実線あるいは点線で、非定常のそれを破線で示した。また定常と比較する都合上、破線の時間は省略した。 C_c 算出時に用いる表3に示す A_{34} の非圧縮収縮係数 C_{c1} は水を動作流体として実測した。また V_3 内への $\dot{m}_{13}$ の流入角度 θ は図中の実測値より定めたが、これは出口中心角度 60° と後方に述べる運動量 $u_1 \dot{m}_1$ による 90° 方向の和の半分に近い値であった。実線と点線はそれぞれ2.3.1と2.3.3項による計算値を示し、点線におけるスラスト F_{s1} は弁座の圧力分布の台形近似積分により算出した。また y の刻みは 0.02 mm とし、点線の y の範囲は表4に示す。

詳細図に示すように、 y の極めて小さい所での点線は y とともに C_f が減少しているのに対して実線はほぼ一定となっている。また p_1 が高圧になるに従って C_f のこう配も大きくなっている。実線 No. n-1 は y/y_m が約0.5以上になると実測値との差異が次第に

大きくなっているが、これの一つの原因として弁変位による流量係数 C_{13} の変動が挙げられる。つまり実測値 C_{13} は弁変位が大きくなると次第に減少し、例えば $y=y_m$ では表3の値よりも約0.1ほど小さくなる。そこで、これを一点鎖線で図中に示した。詳細図における実測値の最落込み位置は計算値より右側にある。これは2.3.3項で述べたように、弁座部分のみの圧力分布によりスラストを算出したことがその原因に挙げられる。すなわち、No. n-1ではノズル出口で過膨張となり、検査面 A_4 - A_5 付近における負圧の分布あるいは衝撃波の発生などにより、右側になったと思われる。

V_3 の出口面積 A_{34} は弁開口面積より大きくしてあるので、圧力比 $\bar{P}_{41}$ は比較的1に近い値である。例えば No. n-1, $y=2 \text{ mm}$ では約0.9であり、 A_{34} 付近の流れは非圧縮に近くなる。そこで動作流体をポテンシャル流れとしたときの流線の様子を図9に示した。図から一様流速 u_3 の V_3 に占める割合が比較的大きいので、2.3節の仮定3:はほぼ妥当であると思われる。

非定常の計算値は定性的には定常と同じであるが、これと同じ p_1 の C_f をかなり下回っている。例えば、 $y/y_m=0.5$ でのスラスト F_{s1} は定常のそれよりも14%ほど小さく、また弁速度の異なる No.1-5においても大体これに近い値であった。これは V_3 内への流入流量 $\dot{m}_{13}$ に対して常に流量 $\dot{m}_{34}$ が排出されるため、圧力 p_3 に応答遅れが生ずるためである。式(17)の $\dot{m}_{13}$ は $\dot{m}_{13}$ の時間微分を定式化して計算し、 $\dot{m}_{34}$ と $\dot{p}_3$ も同様とした。

なお面積 A_1 内に定常流速 u_1 を考えたとき⁽²⁾の運動量による力 $u_1 \dot{m}_1$ は、例えば前記と同じ条件で F_2

図6 弁の動特性

図7 p_{2s} の実測値と計算値

図8 死時間 t_d の実測値と計算値

の約2%であるのに対して式(11)に示す $u_{34}\dot{m}_{34}$ の割合は約12%と大きい。さらに図5に示す C_f は $y/y_m=1$ の付近でだいたい2を越えている。したがって、スラスト F_2 の特性は排気側弁室のスラスト F_{21} にほぼ支配される。

4.4 弁の動特性 まず表4に示す y までのスラストは図5詳細図の点線に従って、 y/y_m の3次式に近似する。また表4の C_{fz} はこれにより求めた値である。図6に示すように実測値 y は3.2節で述べた理由により、むだ時間中に極めて小さい速度で動くので、動摩擦力 F_r は F_q で近似する。また流量係数 C_{24} は図7あるいは図8と同様とした。

図6に圧力 p_2 の変動開始から0.1sまでの諸量の計算値を示す。弁全開までの実測値との一致はだいたい良いが、前節に述べた C_f の落込み位置の差異によって y の1mm前後における弁速度は計算値のほうが多少速い傾向にある。スラスト F_{21} に対する式(17)の時間微分項の割合は例えば、 $y/y_m=0.5$ で約1.5%と小さい。これは式(10)左辺の第1項と2項の比を表すストローハル数が約0.1となることから予測できる。

その他の条件における y の計算値を図10, 11に示した。図10は実験条件No.1の場合で図5からもわかるように、 p_1 が高圧になるにつれ弁速度は大きくなる。またNo.1-1に弁座の圧力分布を省略、すなわち図5の点線を実線とした場合の計算値を破線で示した。ただし、このときの C_{fz} は式(12)右辺第2, 3項の和を F_{2z} として与えた。図から、弁座の境界層流れによ

る C_f の落込みが弁の動特性を大きく支配することがわかる。

実験条件No.2の場合を図11に示す。オリフィスの径 d_{24} が図10より小さいので、弁全開までの時間は各圧力条件で長くなっている。また図4から p_4/p_2 の値により C_{24} が変化するので、No.2-3の p_4/p_{20} 付近の C_{24} を用いたときの計算値を破線で示した。実測値との一致は点線よりも破線のほうが良いことから、流量係数 C_{24} も弁の動特性に大きな影響を与える。

4.5 邪魔板がないときの弁の動特性 p_{2s} の実測値と弁の作動を図7と同様の方法で図12に示す。図7と比べて p_{2s} はいずれの条件でも小さくなっている。これは給気流量 $\dot{m}_{12}$ が直接 d_{24} へ排出されるため、特に p_1 が低圧で d_{24} が大きいときの p_{2s} は負圧となり、さながら空気エゼクタの様相を示している。すなわち、図7より広い領域で弁は作動し、低圧域でそれが顕著であり、また応答時間も短くなっている。例えば、No.2-5では図6より約2割ほど速かった。

5. 結 論

空気圧用パイロット形2ポート電磁弁の動特性あるいはその作動条件の解明ならびにこの種の弁の設計資料を得ることを目的に実測値と理論値を比較、検討した結果、以下の結論を得た。

(1) 式(5), (6)に示す圧力 p_{20} と p_{2s} は弁作動に対する設計指針を与え、また p_1 を高圧にすると弁作動は一般に良くなると考えられていたが、必ずしもそれが言えないことがわかった。

(2) パイロット圧力の変動はほぼ断熱変化とみなせる。また弁の応答時間については、むだ時間 t_d の占める割合が無視できないほど大きいので、これを含めて評価する必要がある。

(3) 本解析式で2ポートエアパイロット弁の動特性を満足に説明できることがわかった。また弁変位の

図9 ポテンシャル流れのときの流線 ($y=2\text{mm}$)

図10 $d_{24}=3.5\text{mm}$ のときの弁の動特性

図11 $d_{24}=3.3\text{mm}$ のときの弁の動特性

表 3 弁の緒言

Nomenclature	Value
A_1	$3.80 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
A_2	$1.963 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
A_3	$1.378 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
A_4	$5.853 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
A_5	$4.374 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
A_{34}	$4.523 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
C_{12}	0.73
C_{13}	0.70
C_{c1}	0.707
d_{12}	1.5 mm
k	340 N/m
m_v	0.245 kg
T_1	300 K
V_{22}	$1.89 \times 10^{-5} \text{ m}^3$
V_{32}	$6.38 \times 10^{-5} \text{ m}^3$
y_3	46.3 mm
y_4	36.2 mm
y_m	4.0 mm
θ	77°

表 4 層流境界層における y の最大値と C_{fz}

Test No.	C_{fz}	Greatest value of y
No. n-1	1.055	0.22mm
No. n-3	1.084	0.16mm
No. n-5	1.090	0.12mm
No. n-7	1.092	0.10mm

実測値と計算値のほぼ良好な一致により、非定常における弁のスラストの様子を間接的ながら明らかにできた。さらに非定常のスラストは、弁変位 y とともに増大する傾向は定常と同様であるが、主に圧力 p_3 の応答遅れにより定常のそれよりかなり小さくなる。

(4) 弁変位が極めて小さいときの境界層流れによる弁座の圧力分布が弁の動特性を大きく支配すること、また流量係数 C_{24} の影響も大きいことがわかった。

図 12 邪魔板のないときの p_{2s} の実測値

(5) 邪魔板のないときの解析は今後の検討を必要とするが、パイロット室における給気と排気の方法を工夫することによって弁の応答時間の短縮化を図れることがわかった。

終わりに臨み、本研究を行うにあたって終始有益なご助言をいただいた本学工学部、樋口金次郎助教授に謝意を表す。また供試弁のスラスト特性についての終始懇篤なるご指導をいただいた早稲田大学理工学部、田島清願教授に深謝する。

文 献

- (1) Tsai, D. D. and Cassidy, E. C., *Trans. ASME, J. Basic. E.*, 83-2 (1961), 253.
- (2) 中野・ほか 2 名, 機論, 48-431, B (1982), 1266.
- (3) Andersen, B. W., *The Analysis and Design of Pneumatic Systems*, (1967), 21, Jhon Willy & Sons.
- (4) Benedict, R. P., *Trans. ASME, J. Basic, E.*, 93-2 (1971), 99.
- (5) 池辺・大内, 油圧と空気圧, 8-2 (1977), 114.
- (6) 一色, 運輸技研報告, 10-2 (1960), 19.

討 論

〔質問〕 大内 英俊〔山梨大学工学部〕

流体の圧縮性を考慮して弁のスラスト特性を解析している点に敬意を表す。スラストの解析に関し、以下の三点についてご教示願いたい。

(1) 式(17)右辺の p_3 を含む項は、スラスト特性に対し、どのような影響があるか。

(2) 貴論文ではスラストの実測値をもとに m_{13} の流入角度 θ を定めている。この場合、式(12)右辺第 2, 3 項の詳細な評価が必要となるのではないか。

(3) 時間的に移動・変形する検査面を採用する場合、式(10), (16)の $\frac{\partial}{\partial t} \int_C \rho u_v dV$ は

$\int_{C.V} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_y) dV$ と同義と解釈されないよう

$\frac{d}{dt} \int_{C.V} \rho u_y dV$ と記すべきではないか。

〔回答〕 (1) 式(12)から $\dot{p}_3$ を含む式(17)の時間微分項は検査面 A_2-A_5 におけるスラスト F_{25} に影響を及ぼす。そこで F_{25} に対する各種時間微分項のスラストの比較の一例を付表1に示した。ただし、計算条件は図6と同様で $t=0.0439$ s, $y=2$ mm の場合を示す。

付表1から $\dot{p}_3$ に関するスラストは F_{25} を大きくする方向に作用し、またその割合は非常に小さいが、 $\dot{m}_{13}$ におけるそれよりも大きい。いずれの時間微分項のスラストも F_{25} と比べて非常に小さいので、式(11)右辺に関する項が F_{25} に大きな影響を与えることがわかる。

なお、同条件における式(16)右辺の他の時間微分項 $yA_3\dot{\rho}_3\dot{y}_3$, $A_3\rho_3(\dot{y})^2$ はいずれも 10^{-3} 以下と極めて小さい。また $yA_3\rho_3\dot{y}$ は弁変位零から y の領域に占める空気質量に関する慣性力を表すが、当然ながら弁慣性力 $m_v\dot{y}$ よりもはるかに小さいので、これを省略した。

付表1 C.V内の非定常スラスト

Thrust	Value(N)
F_{25}	72.88
$(y\dot{m}_{13} + \dot{y}m_{13})/2$	0.06
$y_3\dot{m}_{34}$	1.11
$-(y-y_3)V_3\dot{p}_3/2$	0.09

(2) ご指摘の点は図2に示すC.Vを弁室まで含めたうえでの評価と考えるが、4・3節後半に述べているように弁室をC.Vとしたときの定常流速による運動量 $u_1\dot{m}_1$ が弁に及ぼすスラストは F_2 の約2%と小さく、またスラスト特性は排気側弁室にほぼ支配される。なお排気側弁室上面の面積 (A_2-A_5) は A_5 の約3.5倍である。

以上により θ を式(12)によって定めても特に問題はないと考える。

(3) C.Vが時間 t のみの関数であることを $\frac{d}{dt} \int_{C.V(t)} \rho u_y dV$ と明示すれば、ご指摘のとおりである。