

オンオフ電磁弁による流量制御

逢坂 一正 堂田 周治郎

岡山理科大学工学部機械工学科

(昭和62年9月30日 受理)

1. 結論

精度の良い油圧シリンダの制御，たとえばロボットアームの制御などには，一般にサーボ弁が用いられている。しかしながら，サーボ弁を用いるには微細なフィルターを要するなど作動油の管理が大変である。さらにサーボ弁は常に油圧をかけておかなければならないのでエネルギー的損失も大である。一方，主として屋外で使用される建設機械や農業機械では，油圧シリンダの高精度な制御はあまり要求されない。その場合，弁の構造が簡単で故障が少なく，しかもエネルギー損失の少ない比例制御弁があると便利である。これに関して，直流電磁弁をPWM方式で駆動する方法¹⁾や，比例電磁ソレノイドを用いる方法²⁾がすでに報告されている。しかし，これらの報告では，理論的検討があまりなされていない。

そこで，本論文では，オンオフ直流電磁弁に流量制御機能を持たせることを目的として，まず直流電磁弁をPWM駆動するときのスプールの運動モデルを導き，簡単な数値解析により流量特性を求め，望ましい流量制御特性を得るための弁の設計条件を導く。次に，この設計条件に基づいて市販の直流電磁弁を改造し，所要の精度を有する比例制御弁が実現できることを実験により確認する。

2. 解析

2.1 スプール系の運動モデル

考察する直流電磁弁の略図を Fig. 1 に示す。これは実験に使用する市販の電磁弁の主要部の構造図であるが，この弁をモデル化したものを Fig. 2 に示す。基本的仕様としてウェット型スプリングリターン弁であるとする。この弁のソレイドをPWM方式で励磁するとき，一定の供給圧 P と負荷圧のもとでの流量は流路断面 W に対するスプール変位 x の状態が決まる。ある周波数以上のパルスでソレノイドを励磁すれば，プランジャとスプールは一体（スプール系と呼ぶことにする）として運動すると考えてよい。そのと

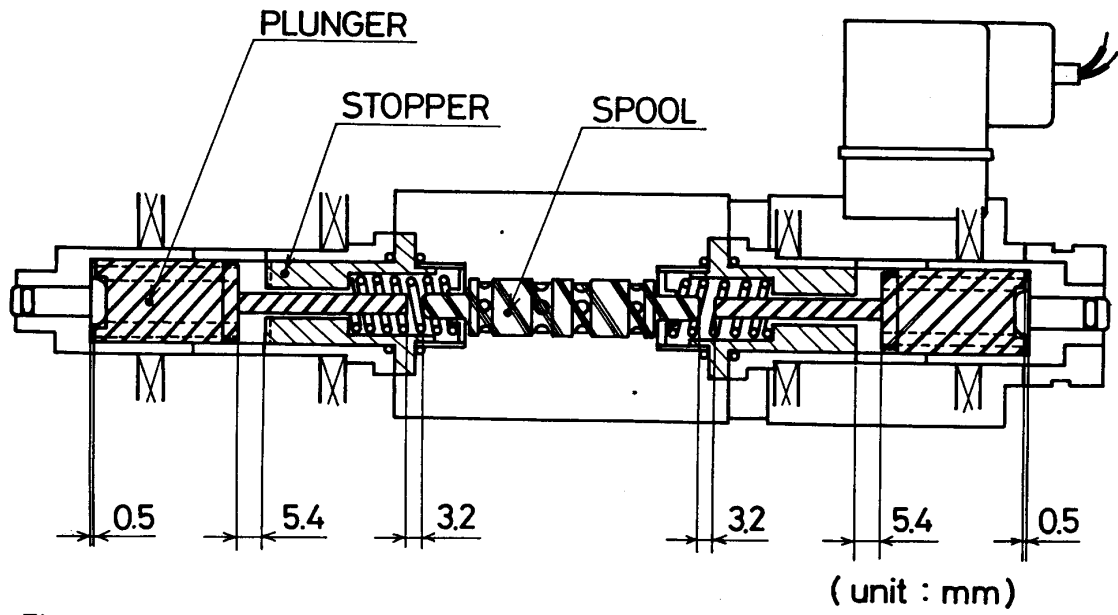


Fig.1 An experimental valve

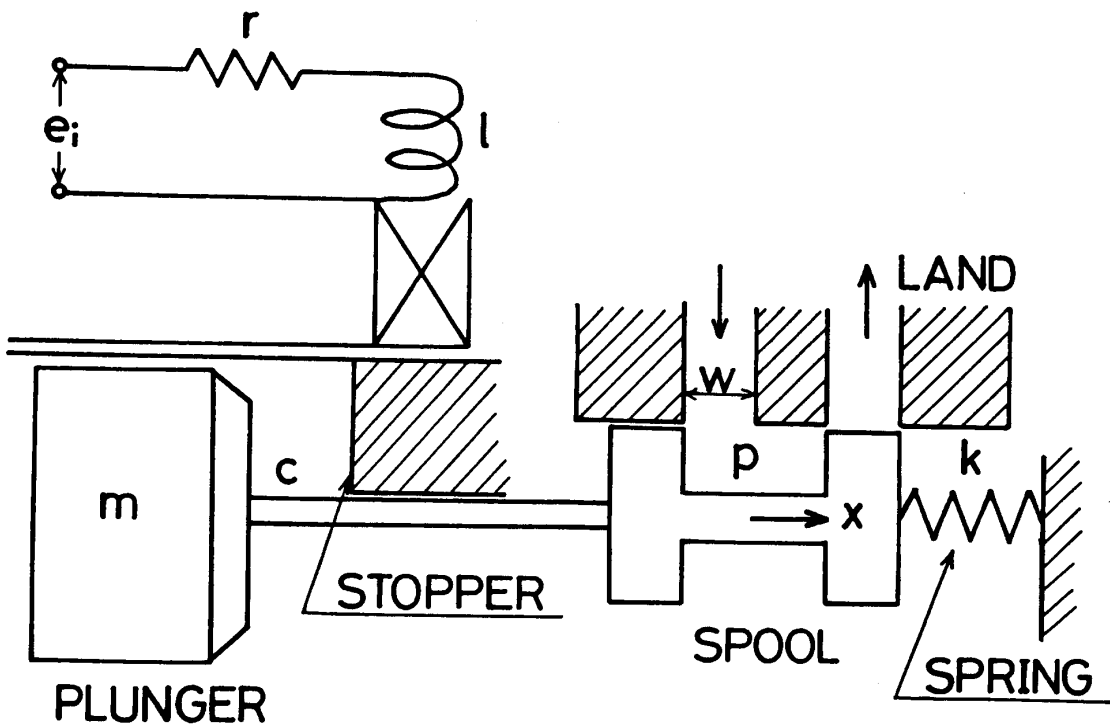


Fig.2 A model of spring return solenoid valve

きのスプール系の運動方程式は次式で表される。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + k \cdot x = f \tag{1}$$

ここで、 x : スプール系の変位 [cm], m : スプール系の質量 [kgf·s²/cm], c : 油の

粘性による減衰係数 [kgf·s/cm], k : バネ定数 [kg f/cm], f : スプール系に働くソレノイドの推力などの外力 [kgf] である。(1)式は典型的な質量系の運動方程式であるが、もっとも問題となるのは外力項 f である。一般にソレノイド推力の他に油流の流体力(ベルヌーイ力) やクーロン摩擦などが考えられるが、流体力はソレノイド推力に比べて無視できるものとする。 f の具体的な形は後で述べる。

一方、ソレノイド系(ソレノイドとプランジャ)はスプール系の運動との干渉が無視できるものとする。抵抗・インダクタンス回路で近似でき、励磁パルスのオン、オフに対応して次の回路方程式で表される。

$$l \frac{di}{dt} + r \cdot i = \begin{cases} e \text{ (オンのとき)} \\ 0 \text{ (オフのとき)} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 i : ソレノイド電流 [A], l : ソレノイド系のインダクタンス [H], r : ソレノイド系の抵抗 [Ω], e : 励磁パルスの電圧 [V] である。スプール系の運動は基本的には(1), (2)式のモデルで表現できる。

次に外力項 f の具体的な形を定める。弁の構造からソレノイド推力はソレノイド電流 i の2乗に比例し、あるスプール変位でピークをとるスプール変位 x の関数となることが予想できるので、その関数を正規分布形とする。外力としてソレノイド推力とクーロン摩擦力を考えると次式を得る。

$$f = C_1 \cdot i^2 \exp[-a(x-b)^2] - C_2 \operatorname{sgn}(dx/dt) \quad (3)$$

ここで、 C_1 : 比例定数 [kgf/A²], a : 分布係数 [cm⁻²], b : ピーク値変位 [cm], C_2 : クーロン摩擦 [kgf] である。ソレノイド推力は(3)式と異なるものとして、たとえばソレノイド電流 i に比例するとか、 x の関数が正規分布形でないなど幾種類か考えられる。

2.2 数値解析

適当な初期条件のもとで(1), (2), (3)式を連立させて解けばスプール系の運動を知ることができる。そのために差分法を用いて数値解析を求めるのであるが、各量を無次元量として扱う方が便利なので、まず(1)~(3)式の無次元化を行う。

いま、長さの代表量をスプールのストローク x_0 , 代表電流をスプール系起動時の電流 i_0 , 代表時間を t_0 (1 s とした) として無次元化する。 $x^* = x/x_0$, $i^* = i/i_0$, $t^* = t/t_0$ の無次元量を用いると(1)~(3)式はつぎのようになる。

$$m \frac{x_0}{t_0^2} \cdot \frac{d^2 x^*}{dt^{*2}} + c \frac{x_0}{t_0} \cdot \frac{dx^*}{dt^*} + k x_0 x^* = f \quad (1')$$

$$\frac{i_0}{t_0} \cdot \frac{di^*}{dt^*} + r \cdot i_0 \cdot i^* = \begin{cases} e \text{ (オンのとき)} \\ 0 \text{ (オフのとき)} \end{cases} \quad (2')$$

$$f = C_1 \cdot i_0^2 \cdot i^{*2} \cdot \exp[-ax_0^2(x^* - b/x_0)^2] + C_2 \operatorname{sgn}(dx^*/dt^*) \quad (3')$$

以後、 x^* , i^* , t^* をあらためて x , i , t で表わすことにする。(1')式のばね力項の係数 $k \cdot x_0$ を基準力1にとり、(2')式の抵抗項の係数 $r \cdot i_0$ を基準電圧1にとる。すなわち、(1'), (3')式の両辺を kx_0 , (2')式の両辺を $r \cdot i_0$ で割って整理すると次式を得る。

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + x = F \quad (1'')$$

$$L \frac{di}{dt} + i = \begin{cases} E & (\text{オンのとき}) \\ 0 & (\text{オフのとき}) \end{cases} \quad (2'')$$

$$F = C_1 \cdot i^2 \cdot \exp[-A(x - B)^2] + C_2 \operatorname{sgn}(dx/dt) \quad (3'')$$

ただし、各パラメータは以下のようになる。

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{m}{kt_0^2}, \quad C = \frac{c}{kt_0}, \quad F = \frac{f}{kx_0} \\ L &= \frac{1}{rt_0}, \quad E = \frac{e}{ri_0}, \quad C_1 = \frac{c_1 i_0^2}{kx_0} \\ C_2 &= \frac{c_2}{kx_0} \\ A &= ax_0, \quad B = b/x_0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで、Fig. 1 に示す弁の各係数の実測値 (一部推定値を含む) を以下にまとめておく。

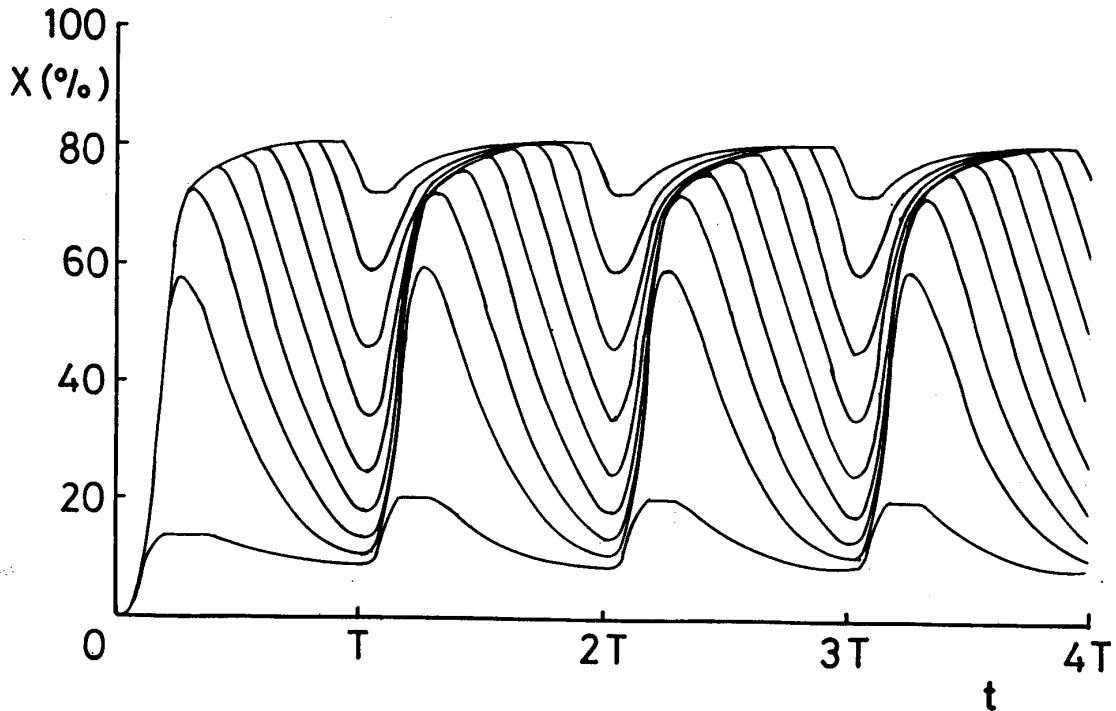


Fig.3 Calculated transient response of spool displacement X

$x_0 = 0.22\text{cm}$, $t_0 = 1\text{s}$, $i_0 = 0.32\text{A}$, $m = 6.94 \times 10^{-5}\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{cm}^2$, $k = 3.75\text{kgf}/\text{cm}$, $C = 0.04\text{kgf}\cdot\text{s}/\text{cm}$, $r = 4.36\Omega$, $l = 5.2 \times 10^{-2}\text{H}$, $c_1 = 1.6\text{kgf}/\text{A}^2$, $c_2 = 6.8 \times 10^{-3}\text{kgf}$ {0.067N}。

(1''), (2'') 式の x , i の計算には差分法を用いる。まず(4)式のパラメータを決め、励磁パルスのデューティサイクルを定める。 x , i の初期値を0として、時間刻みに対する x , i の値を陽解法で求めていく。そして励磁パルスの一周期分の x , i の値が定常に達するまで計算を続行する。

計算結果の一例を Fig. 3 に示す。パルス周波数20Hz, (4)式の各パラメータは $M = 10^{-5}$, $C = 0.01$, $E = 9.2$, $L = 0.01$, $C_1 = 0.05$, $C_2 = 10^{-3}$, $A = 5$, $B = 0.25$ であり, M , C , E , L , C_1 , C_2 は Fig. 1 の弁の実測値にほぼ近い値である。Fig. 3 はデューティサイク

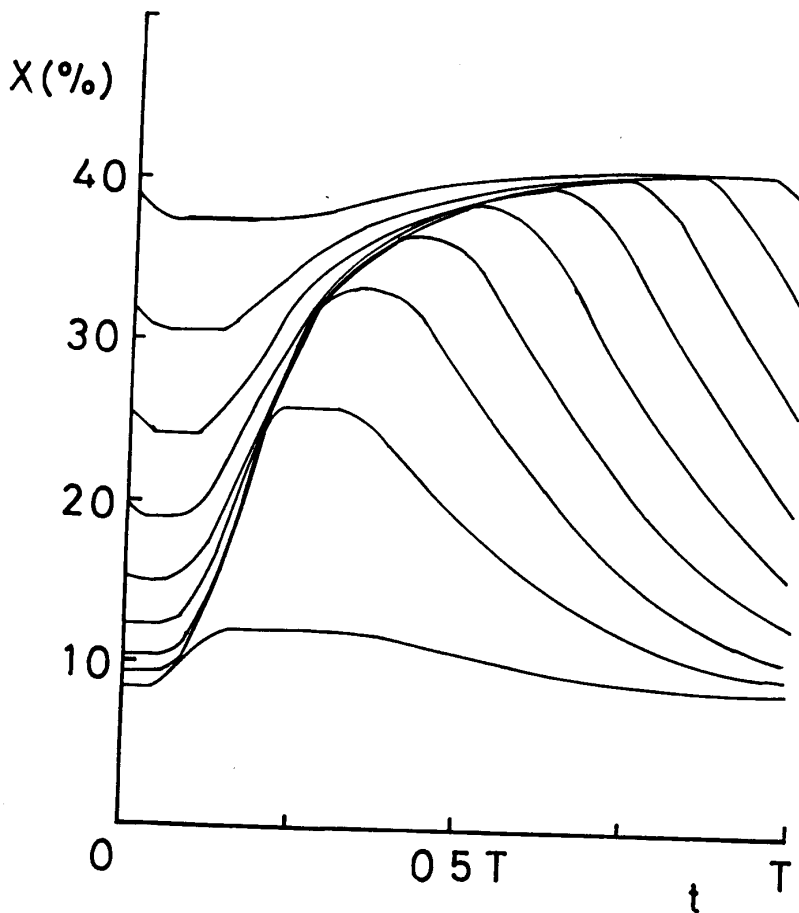


Fig. 4 Calculated stationary response of spool displacement X

ルを変えた時のスプール変位の時間的变化で、下から順に10, 20, 30, ..., 90%の場合である。各曲線は弁の始動時からのスプール変位 x を示しており、時間が2~3周期経過すればスプール系は定常振動になる。このように過渡状態の時間は非常に短いので弁の開度はスプールの定常振動のみで決まると考えられる。これを Fig. 4 に示す。図の曲線は下からデューティサイクルが10, 20, ..., 90%の場合であり, (4)式の各パラメータ

は $B = -0.25$ の他には Fig. 3 の場合と同じである。このように、デューティサイクルを変えることによりスプールの振動位置を制御できることがわかる。

2. 3 弁の設計条件

まず、定常振動のスプール変位と流量の関係について述べる。あるデューティサイクルで Fig. 5 の折線のようにランドの流路幅 W (Fig. 2 参照) 内を一周期 T でスプールが横断したとする。そのとき図のように閉領域と開領域ができる。時間 T に流れる流量は開領域の面積に比例する、即ち流量は弁の開度に比例するものとする。

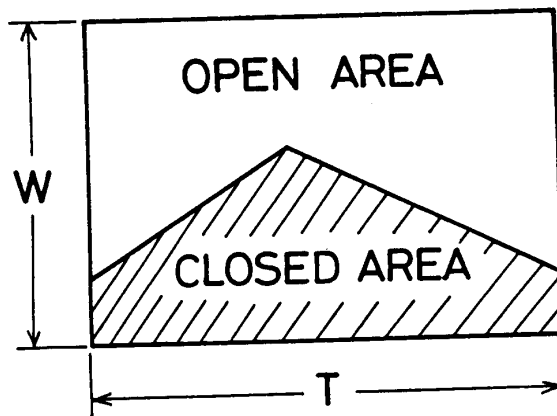


Fig. 5 Explanation of port area

流路幅 W に対応するスプール変位の範囲（以後、流量可変範囲と呼ぶことにする）が決まれば、つまりスプール変位と流路幅の位置関係を知れば、流量可変範囲内のスプール変位を制御することにより希望の流量特性が実現できる。例えば、

(i) デューティサイクルに比例した流量特性すなわち比例特性を有する弁を設計するには、開領域をデューティサイクルに比例させればよい。

(ii) オンオフ特性を有する弁を設計するには、デューティサイクルのごく狭い範囲で開領域が 100% 変化するようにすればよい。

本研究ではソレノイドの推力を変えて、つまり(4)式のパラメータのうち、電圧 E 、ピーク値変位 B をかえることにより条件(i), (ii)を満足させる方法について検討する。

時間 T 内のある時刻のスプール変位と開領域 q の関係は次式で表わされる。

$$q = \begin{cases} 0 & (x < x_l) \\ \frac{x - x_l}{x_u - x_l} & (x_l \leq x \leq x_u) \\ 1 & (x > x_u) \end{cases} \quad (5)$$

ただし、 x_l 、 x_u はそれぞれ流量可変範囲の下限、上限のスプール変位である。実際の計

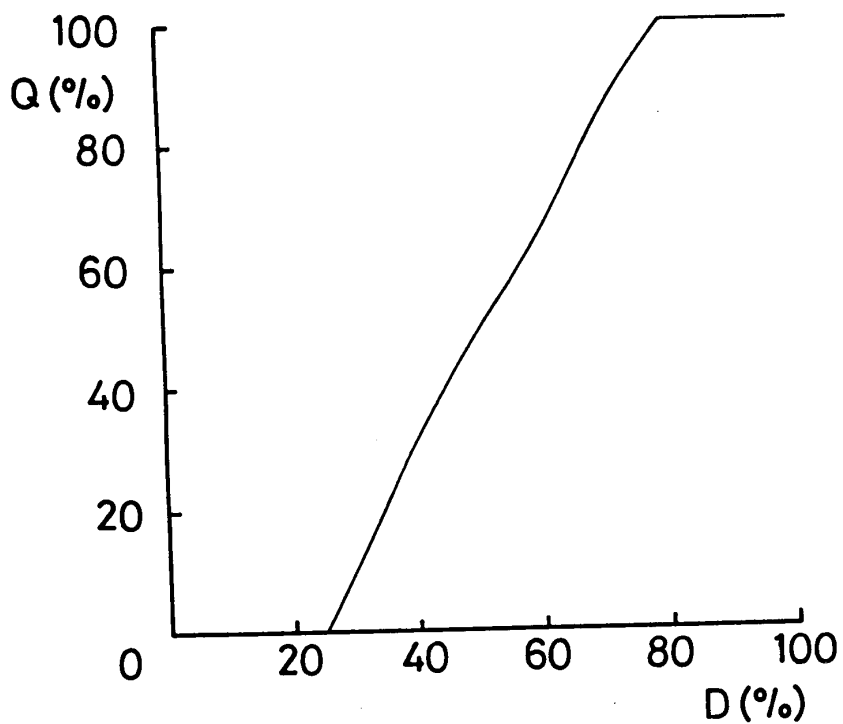


Fig. 6 A calculation of proportional flow rate Q to exciting pulse duty cycle D

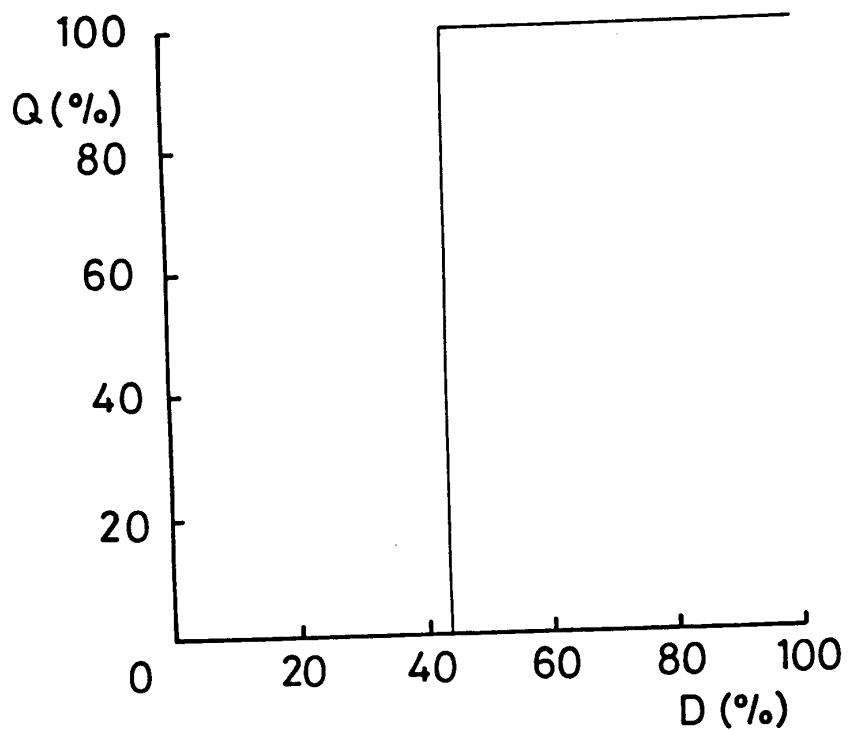


Fig. 7 A calculation of on-off flow rate Q

算にはTを100等分してqを求めた。qの総和が%で表わした流量Qである。

次に弁の設計条件について述べる。条件(i)をほぼ満足した流量特性の計算結果を Fig. 6 に示す。励磁パルス周波数は20Hz, 弁の各パラメータは Fig. 4 の場合と同じであり, $x_1 = 0.25$, $x_u = 0.35$ を用いた。デューティサイクルDが25%以下では $Q = 0\%$, Dが25~82%でQはほぼ直線的に増え, Dが82%以上では $Q = 100\%$ となった。次に条件(ii)を満足した計算結果を Fig. 7 に示す。計算に用いた各パラメータは $B = 0.85$ の他には Fig. 6 の場合と同じである。Dが42%近くでQは100%変位しており理想的オンオフ特性となった。

これらの結果から, ウェット型スプリングリターン弁では, 比例制御弁と理想オンオフ弁の設計条件が次のようにまとめられる。

比例制御弁: 流量可変範囲内のスプール変位の増加に対して, スプリング復元力は増加するがソレノイド推力は減少するように設計する。

理想オンオフ弁: 流量可変範囲内のスプール変位の増加に対して, スプリング復元力, ソレノイド推力ともに増加するように設計する。

比例制御弁特性におよぼす励磁パルス周波数の影響を調べた計算結果を Fig. 8 に示す。各パラメータは $A = 5.2$ の他は Fig. 6 の場合と同じである。パルス周波数が高くなる

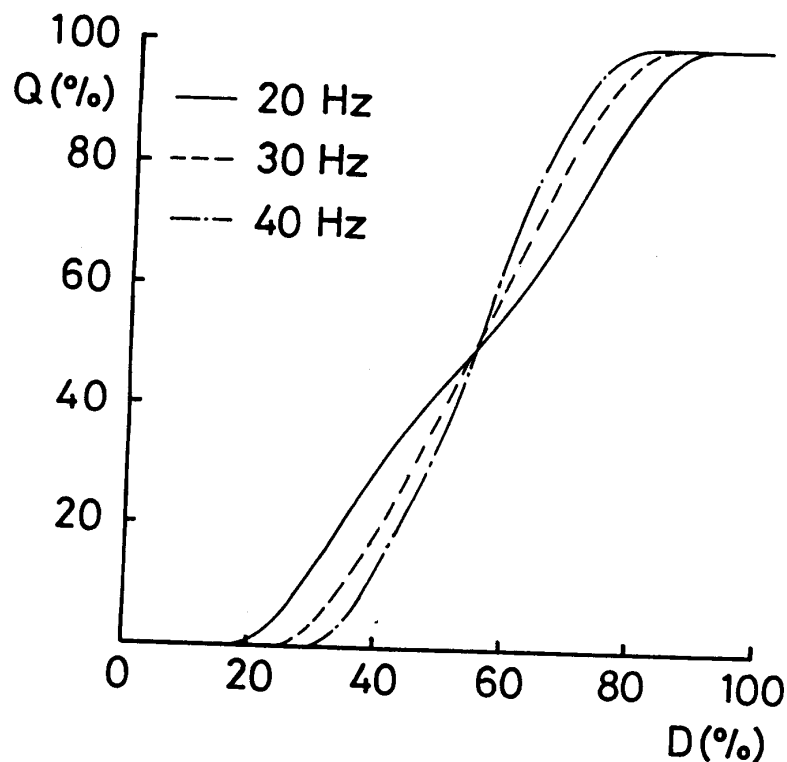


Fig. 8 Calculated proportional flow rate Q by Eq.(3)

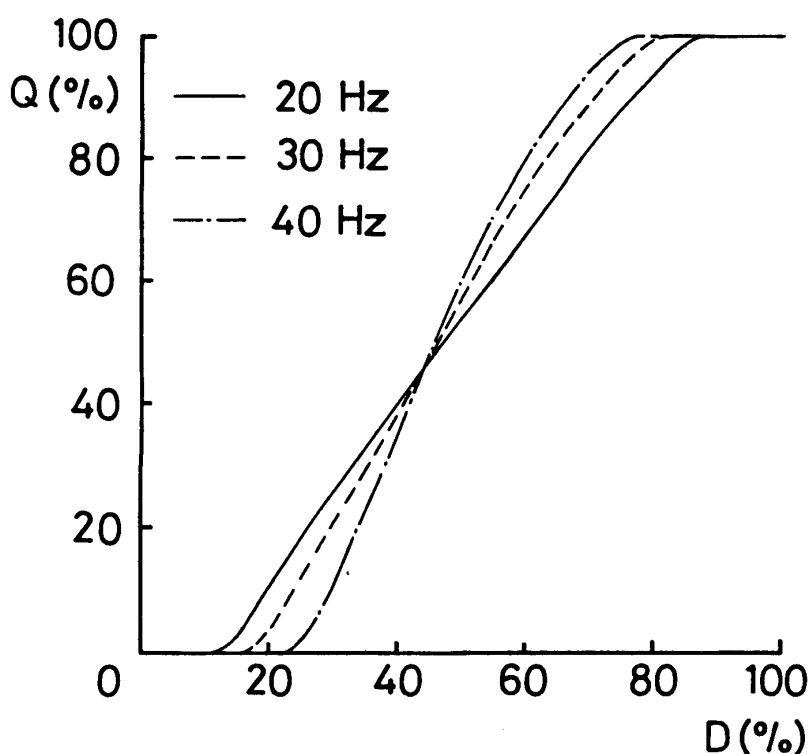


Fig. 9 Calculated proportional flow rate Q by Eq.(6)

につれて弁特性はオンオフ特性に近づくことがわかる。

最後に、ソレノイド推力がソレノイド電流 i に比例する、すなわち

$$F = C_1 \cdot i \cdot \exp \{ -A(X - B)^2 \} - C_2 \operatorname{sgn}(dx/dt) \quad (6)$$

とした時の比例制御弁特性を計算した。結果を Fig. 9 に示す。パラメーターは $C_1 = 0.01$ の他は Fig. 8 の場合と同じである。得られた弁特性は Fig. 8 とほぼ同じである。(3'')式の外力 F は電磁力の加え方や流体力等を考慮すれば、その関数形はいくつか考えられる。たとえば、プランジャが永久磁石の場合として(6)式をとりあげたが、パラメータ C_1 を調節すれば、比例特性が得られた。他の形の関数に対しても同様のことが可能である。

3. 実験

前節で求めた比例制御弁の設計条件を満たすように、Fig. 1 の市販の弁を改造した。改造部分はプランジャとストッパである。この弁を用いて行った実験結果について述べる。

3. 1 スプール変位とソレノイド推力

スプール変位（プランジャ変位）に対するソレノイド推力を測定するための実験装置を Fig.10に示す。適当な荷重をウェイト台に乗せ、ソレノイドに励磁電圧を印加してお

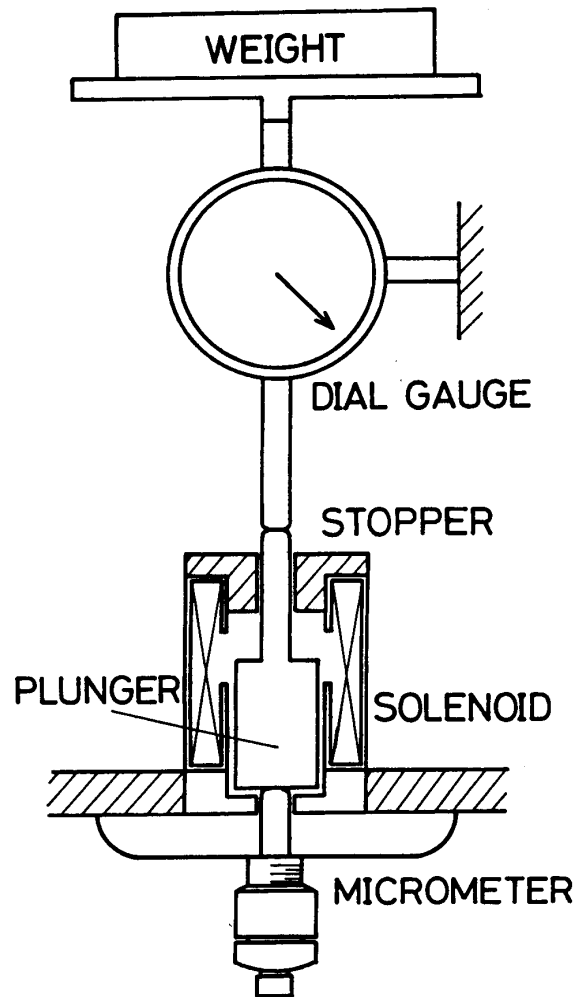


Fig.10 Experimental device for measuring solenoid thrust

く。マイクロメータでゆっくりプランジャを押し上げていき、プランジャがストップパに向かって飛び上がる瞬間の変化をダイヤルゲージで測定した。

市販の弁（改造前）のスプール変位とソレノイド推力の関係を励磁電圧をパラメータとして Fig.11に示す。スプール変位 x はスプールが中立の位置にある時を 0 として目盛っている。 $x = 1.5\text{mm}$ 付近からの f の急激な増大はストップパが磁性体であるための強い磁力によるものである。ストップパの影響を無視すればこの推力特性はガウス分布で近似できる。図中の実線は $x = 1.5\text{mm}$ 以下のデータを用いて最小 2 乗法により求めた正規分布曲線である。例えば励磁電圧 12V の曲線は、

$$f = 2.49\exp\{-2.54(x - 0.994)^2\} + 3.81 \quad (7)$$

となる。

市販の弁は、図の x が $0.8 \sim 1.1\text{mm}$ の間で流量が大きく変化し、 $1.1 \sim 2.2\text{mm}$ の間では大きな流量変化はない。したがって流量可変範囲は $0.8 \sim 1.1\text{mm}$ と思われる。図からわかるようにこの範囲内では x が増加すると推力も増加する、つまり理想オンオフ弁の

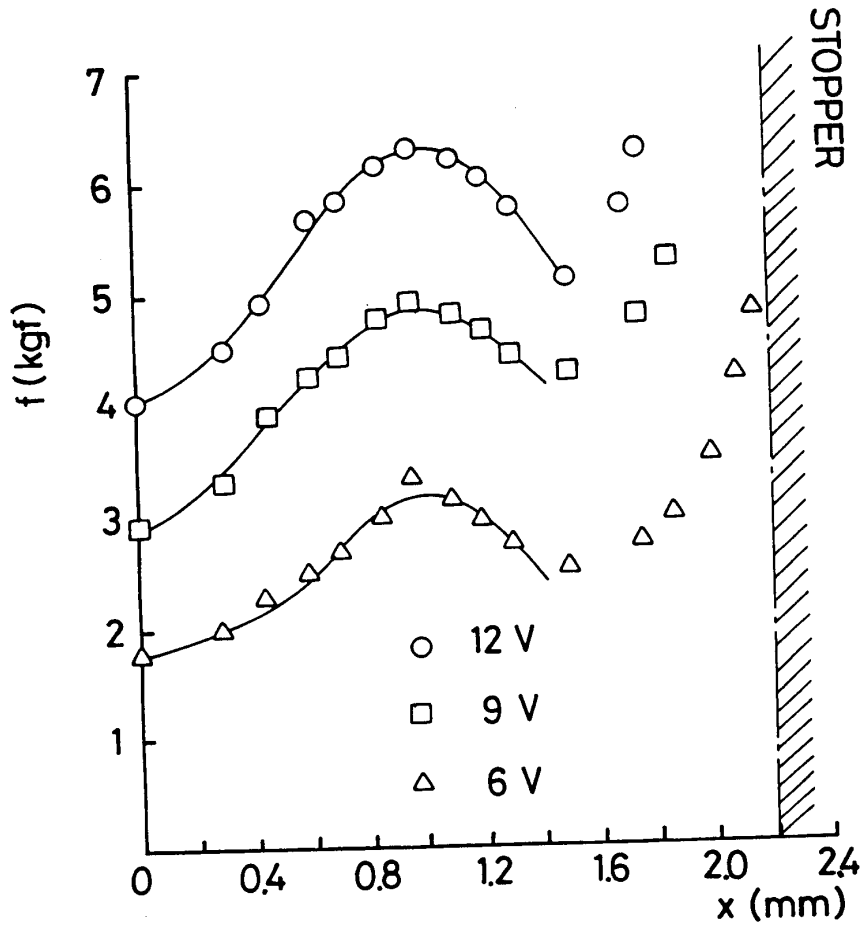


Fig.11 Experimental results of solenoid thrust f vs. spool displacement x with an unreformed valve

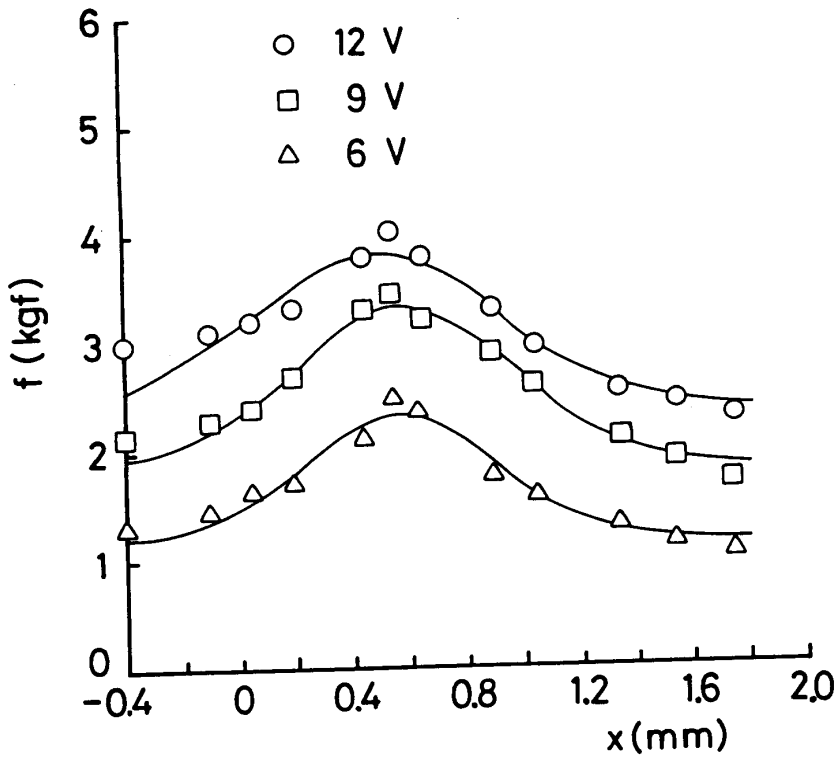


Fig.12 Experimental results of solenoid thrust f with a reformed valve

条件を満たしている。

つぎに、Fig.11に基づいて行った弁の改造について述べる。まず、ストoppaの影響を除くために、ストoppaのブランシャ側を3 mm 削った。次に比例制御弁の条件を満足させるには、ソレノイド推力のピーク値を左へ移動させればよいので、ブランシャの先端を0.4mm 削った。改造した弁のスプール変位とソレノイド推力の関係を Fig.12に示す。励磁電圧は Fig.11の場合と同じであるが、ストoppaによる磁束が減少したためソレノイド推力は全般的に小さくなっている。Fig.11の $x > 1.5\text{mm}$ で推力が急激に大きくなっていた部分はなくなり、より広い範囲の推力が正規分布で近似できるようになった。例えば最小2乗法による12Vの曲線は

$$f = 1.40 \cdot \exp\{-2.58(x - 0.48)^2\} + 2.42 \quad (8)$$

である。(7)、(8)式より(3)式の関数形は妥当であると言える。

3.2 デューティサイクルとスプール変位

ソレノイドをパルス電圧で励磁した時のスプール変位を測定する装置の略図を Fig.

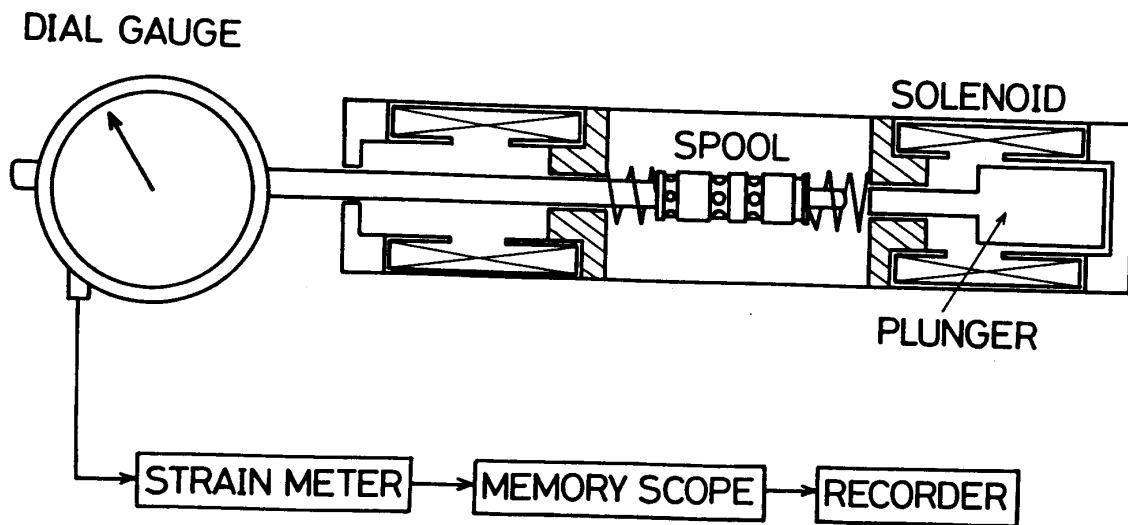


Fig.13 Experimental device for measuring spool displacement

13に示す。スプールに追従するようにひずみゲージ式のダイヤルゲージを取り付け、その出力をメモリスコープに記録した。供試電磁弁はウエット型であるのでスプール、プランジャを油に浸した状態で測定した。しかし、装置の都合上使用時と同じような圧力を加え、油を流すことはできなかった。さらにダイヤルゲージの慣性質量やスプリングの影響も考えられるので、以下に示す実測値は使用状態でのスプール変位を忠実に表わしていない。

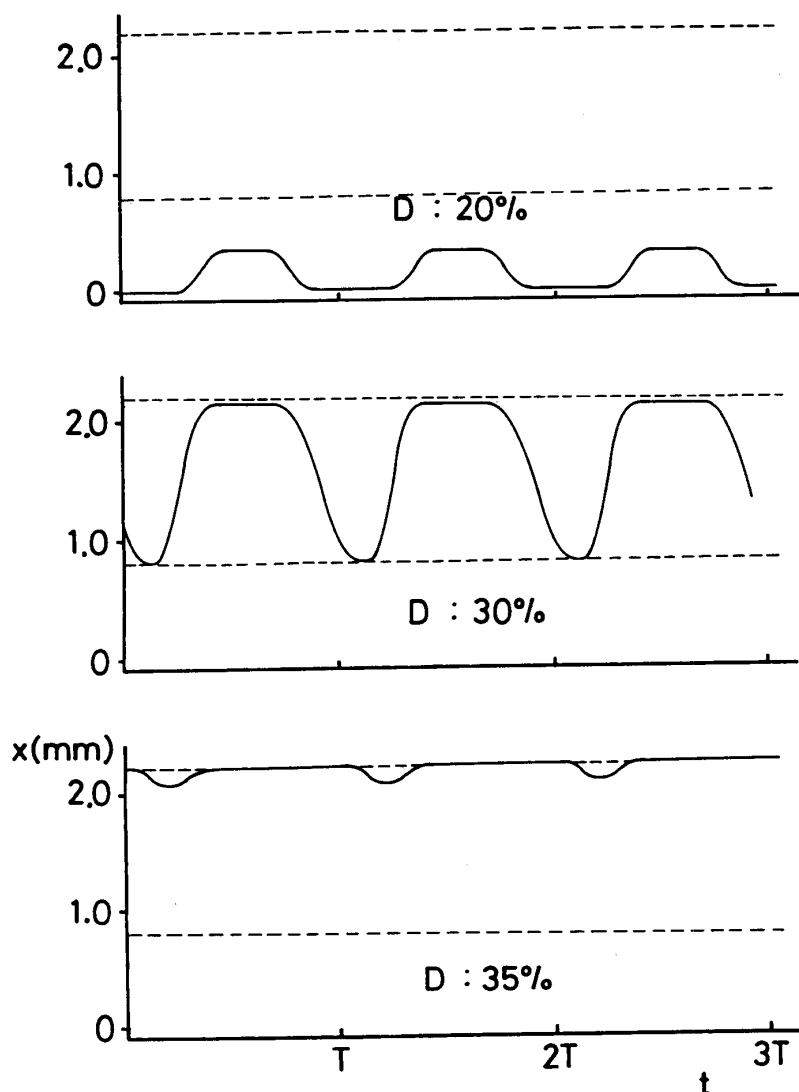


Fig.14 Experimental results of stationary spool displacement X with an unreformed valve

市販の状態（改造前）での測定結果を Fig.14に示す。励磁電圧12V，パルス周波数20 Hz の3周期分のスプール変位である。図中の破線は流量が変化する上限と下限のスプール変位である。測定されたスプール変位の波形は，2.2節で計算された Fig.14の波形とよく似ており，解析モデルは有用であると言える。Fig.14を見るとデューティサイクルが20～35%という狭い範囲でスプール変位が急激に変化しているので，比例流量制御は非常に難しいと予想できる。

次に，改造した弁のスプール変位の測定結果を Fig.15に示す。デューティサイクルが20～70%という広い範囲でスプール変位が変化しているので比例流量制御は容易に行えると予想できる。

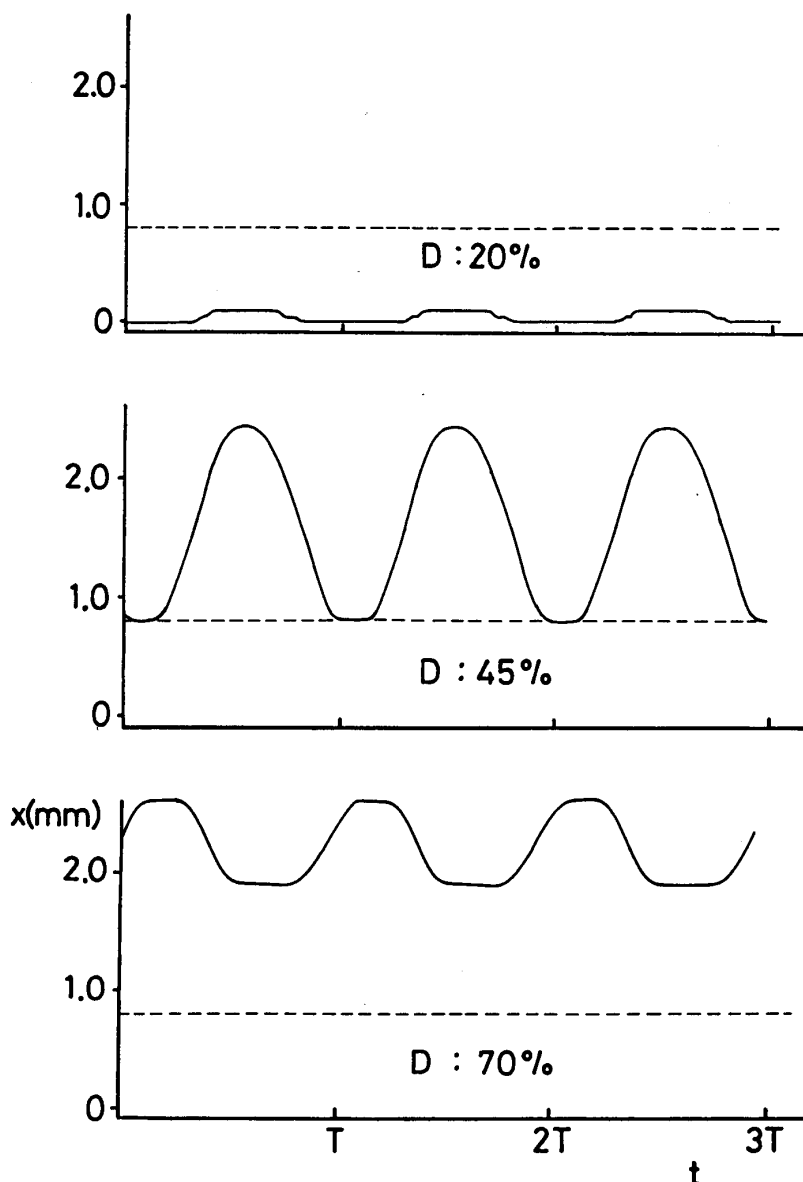


Fig.15 Experimental results of stationary spool displacement X with a reformed valve

3.3 デューティサイクルと流量

弁の吐出平均流量を測定する実験装置を Fig.16に示す。ポンプは最高圧力 $105\text{kgf}/\text{cm}^2$ { 10.3Mpa } のダブルベーンポンプで定吐出量のものである。供給圧、負荷圧設定用のリリーフ弁は定格圧力 $7\sim 70\text{kgf}/\text{cm}^2$ { $0.687\sim 6.87\text{Mpa}$ }、最大流量 $30\text{ l}/\text{min}$ のバランスピストン型である。供試シリンダは内径 63mm 、ピストンロッド径 28mm 、ストローク 100mm の片ロッド型複動シリンダである。電子回路はデューティサイクルが変えられるパルス状励磁電圧の発生回路である。油流はパルス周波数に応じた脈動流であるので、一定時間内のシリンダのピストン変位を測定し平均流量を算出する。

Fig.17に改造前の市販状態におけるデューティサイクル D と平均流量 Q の関係をパルス周波数をパラメータとして示す。ここで、励磁電圧は定格の 12V であり、供給圧は 50

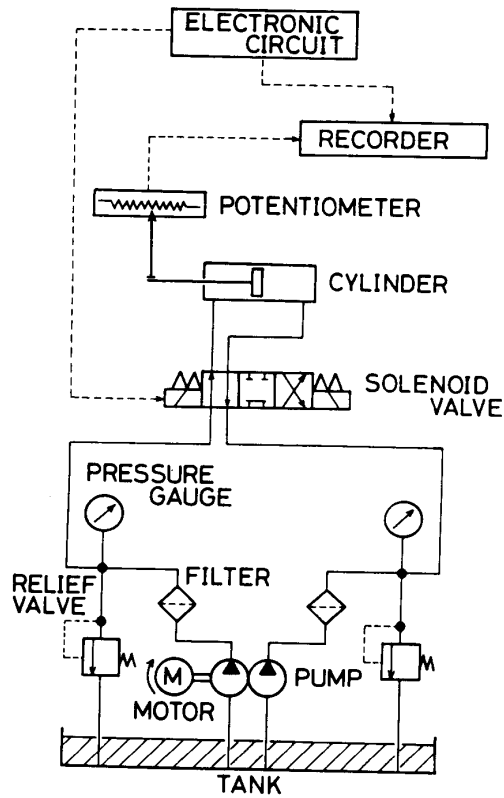


Fig.16 Experimental equipments for measuring flow rate

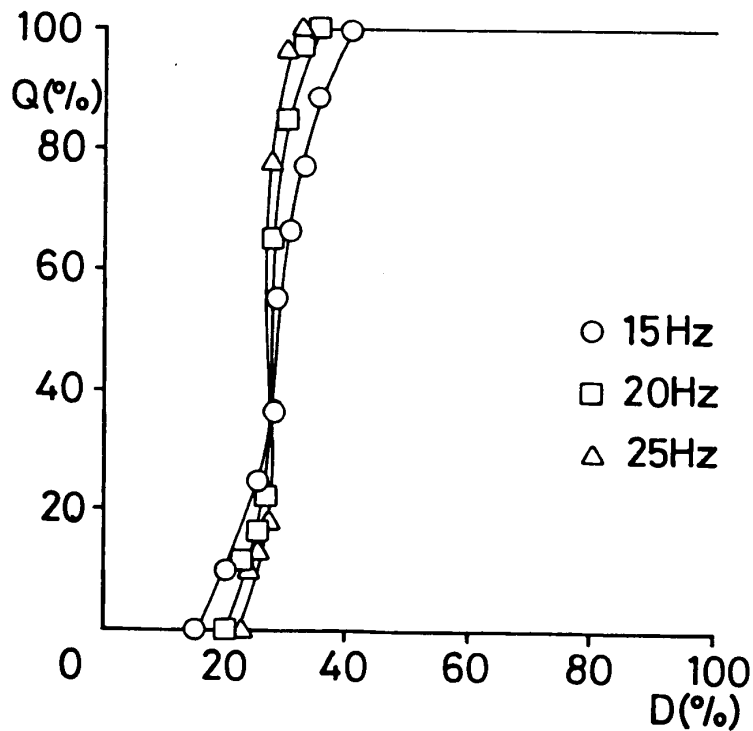


Fig.17 Experimental results of flow rate Q vs. pulse duty cycle D with an unreformed valve

kgf/cm² {4.9Mpa}, 負荷圧は10kgf/cm² {0.98Mpa}である。パルス周波数が高くなるにつれて平均流量を0~100%変えるデューティサイクルの幅が小さくなりオンオフ

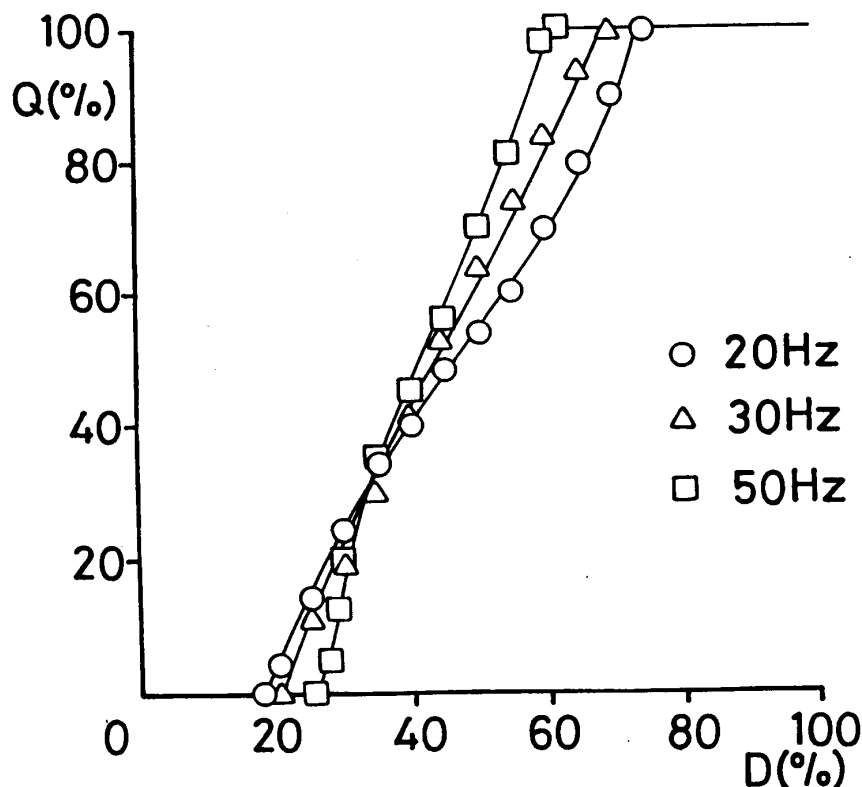


Fig.18 Experimental results of flow rate Q vs. pulse duty cycle D with a reformed valve

特性に近づくことがわかる。この弁では、パルス周波数25Hz以上で流量を制御することは不可能であることがわかった。

つぎに、改造した弁のD-Q特性を Fig.18に示す。励磁電圧などの実験条件は Fig.17の場合と同じである。どのパルス周波数にたいしてもほぼ比例特性が得られた。パルス周波数が高くなるにつれて平均流量を100%変えるデューティサイクルの幅が狭くなっていくことは Fig.17と同じであるが、周波数範囲は改善され、50Hzでも流量制御が可能となった。

4. 結論

本研究では、ウェット型かつスプリングリターン型の直流電磁弁をPWM方式で駆動する時のスプールの運動を数値解析し、デューティサイクル-流量特性を求め、実験結果と比較した。その結果、ほぼ満足できる比例制御弁が実現できた。おもな結果はつぎのようにまとめられる。

- (1) 励磁パルスのデューティサイクルに比例する流量特性を得るには、スプール変位が増加すればスプリング復元力が増加するが、ソレノイド推力は減少するように設計する。
- (2) 理想オンオフ弁に近い流量特性を得るには、スプール変位の増加に対してスプリング復元力、ソレノイド推力ともに増加するように設計する。

(3) (1)にもとづく改造弁において、励磁パルスの周波数が高くなると流量を100%変化させるデューティサイクルの幅が狭くなってオンオフ特性に近づくが50Hz程度までならば比例制御弁として充分使用できることがわかった。

最後に、本研究に対しご援助を頂きました本学の細川智生教授、ならびに実験等でお世話になりました(株)アマダの木村清司氏に感謝します。

参考文献

- 1) 堀越, 坪田, 小柳, 荒川: 建設機械のための電気・油圧制御方式, 油圧と空気圧, 14-2, 129/133 (1983)
- 2) 鴨下, 岡野: 比例電磁ソレイドとその特性, 油圧と空気圧, 12-1, 22/31 (1981)
- 3) 逢坂, 堂田: 直流電磁弁に関する研究, 昭和58年春季油空圧講演会講演論文集, 95/98 (1983)
- 4) 沢村, 花房, 乾: PWM方式を用いた電気油圧式サーボの周波数特性, 制御工学, 3-6, 364/370 (1959)
- 5) 則次, 花房: 空気圧シリンダのパルス幅変調方式速度制御—低速駆動時における一定速度送り—, 油圧と空気圧, 14-7, 505/512 (1983)

Flow Rate Control by an On-Off Solenoid Valve

Kazumasa OHSAKA and Shujiro DOHTA

Department of Mechanical Engineering,

Okayama University of Science,

1-1 Ridai-cho, Okayama 700, Japan

(Received September 30, 1987)

In this paper, the motion of the spool and the flow rate of a spring return solenoid valve driven by PWM method have been analyzed theoretically and experimentally. The conditions to get the desired relationship between the flow rate and the pulse duty cycle have been predicted and these conditions have been confirmed by experiments.

The obtained results are summerized as follows:

- 1) In order to get the proportional flow rate corresponding to the pulse duty cycle, it is necessary that the solenoid thrust decreases and the spring force increases when the spool displacement increases.
- 2) In order to get the on-off flow rate characteristics, it is necessary for them to increase with an increase of the spool displacement.
- 3) Increasing the exciting pulse frequency, the proportional flow rate characteristics approaches to the on-off flow rate characteristics. In a practical valve used in experiment, the proportional characteristics were kept until 50 Hz of the pulse.