

水圧電磁比例制御弁の安定性に関する考察^{*}

Stability of Water Hydraulic Proportional Control Valves

吉田 太志
YOSHIDA Futoshi

要 旨

作動流体に清水を用いた水圧電磁比例制御弁は高いエネルギー密度と制御性を持ち、かつ高い環境性と安全性、衛生性を兼ね備えた流体制御機器のひとつである。このような特長をもつ制御弁は、食品、飲料、半導体、医療、医薬、化粧品、化学薬品、自然エネルギー、水中作業機械などの多岐にわたる製造装置への応用が期待される。本制御弁の作動流体は低粘性のため、摩擦・磨耗を防ぐための静圧軸受けと案内弁が安定して動作するための減衰絞りを設けている。更に制御弁の性能の向上のため、補償回路により、スプール変位を制御パラメータとしてフィードバック制御を行っている。既報において制御弁単体の理論解析と実験的検証から、補償回路、ソレノイド及び案内弁の3つの要素に分けた伝達関数を定義づけ、これらをフィードバック結合することで制御弁単体の特性が三次の伝達関数で表せることを提案し、各種設計パラメータが周波数特性やステップ応答特性に及ぼす影響を検証してきた。その結果、ソレノイドの推力特性と案内弁の幾何学的構造から求められる伝達特性は常に安定であり、その応答特性は補償回路を含めると三次の伝達特性となって不安定要素が包含されることが明らかになった。しかし、補償回路が加わることによる安定性への影響は十分に考察されていない。本報では、提案している制御弁の安定性に関して設計的視点から検討し、特に補償回路のパラメータの影響について言及する。

Abstract

Water hydraulic proportional control valves using tap water as their working fluid provide fluid control solutions with excellent power density and controllability similar to oil hydraulic equipment as well as high levels of environmental friendliness, hygiene, and safety. Control valves with these features are expected to find application in a wide range of manufacturing equipment for foods, drinks, semiconductors, medical/pharmaceutical products, cosmetics, chemicals, renewable energy, and underwater work equipment. Since these valves use a low-viscosity working fluid, they have hydrostatic bearings for friction/wear prevention and damping orifices for stable pilot valve operation. They are also equipped with a compensating circuit to provide feedback control, using spool displacement as a control parameter, for improved valve performance. The previous report proposed, based on theoretical analysis and experimental verification of each valve, that valve characteristics can be represented using a cubic transfer function by defining transfer functions for three valve components, namely the compensating circuit, the solenoid, and the pilot valve, and performing feedback connection of these components. It also examined the effects of design parameters on frequency and step response characteristics, revealing that, while the thrust characteristics of the solenoid and the transfer characteristics required due to the geometric structure of the pilot valve are always stable, the valve response characteristics are determined by a cubic transfer function including the compensating circuit and may include unstable elements. However, effects on stability due to the addition of a compensating circuit are not adequately considered. This report examines design considerations for valve stability and discusses the effects of parameters associated with the compensating circuit.

^{*}The 12th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization (FLUCOME2013), 奈良 (2013年11月) にて発表

1 諸言

作動流体に清水を用いた水圧機器・システムは高いエネルギー密度と制御性を持ち、かつ高い環境性と安全性、衛生性を兼ね備えた流体制御機器のひとつである。このような特長をもつ制御弁は、食品、飲料、半導体、医療、医薬、化粧品、化学薬品、自然エネルギー、水中作業機械などの多岐にわたる製造装置への応用が期待される。特に波力・風力発電及び、海底掘削などの高い安全性と環境性が必要な海洋開発機械への応用や、従来手作業で行われていた食肉・水産加工の自動化においては、衛生度が高く洗浄性を備えたシステムの実現が期待されている。その中の共通技術として力、位置、速度制御の高性能化を実現するための手段の一つが水圧電磁比例制御弁である¹⁾。本制御弁は、作動流体が低粘性であるが故に機器動作に減衰効果を与えるためには何らかの工夫が必要である。ここではスプールの動作に対してメータイン/メータアウトを組合わせた構造としている。制御弁の応答性に対してこれらの構造に起因する影響については既に報告している^{2), 3), 4), 5)}。

既報において制御弁単体の理論解析と実験的検証から、補償回路、ソレノイド及び案内弁の3つの要素に分けて伝達関数を定義づけ、これらをフィードバック結合することで制御弁単体の特性が三次の伝達関数で表せることを提案し、各種設計パラメータが周波数特性やステップ応答特性に及ぼす影響を検証してきた。その結果、ソレノイドの推力特性と案内弁の幾何学的構造から求められる伝達特性は常に安定であり、その応答特性は補償回路を含めると三次の伝達特性となって不安定要素が包含されることが明らかになった。前報では、静圧軸受け絞りと減衰絞りの等価直径比 Cr が制御弁の応答性に及ぼす影響を調査した⁵⁾。本報では、制御弁の安定性に関わる補償回路と Cr の関連について言及する。

2 構造と特長

図1に水圧電磁比例制御弁の構造、表1に主な仕様を示す。作動流体に低粘性の清水を用いているため、摺動部の隙間に水膜を形成するのが困難である。そのため、本制御弁のスプールの両端を静圧軸受けで支持し、スプールの両端をスリーブに対して非接触で変位し、摺動による摩擦・摩耗の低減を図る構造になっている。静圧軸受けを通過した水は、スプールの両端の圧力室へ導かれている。スプールの両端の圧力室から戻りラインの間に減衰絞りを設けているが、単に絞りによる減衰効果は「水」のような低粘性流

体では得られにくい。図2に静圧軸受け絞りと減衰絞りのスプールに対する位置関係を模式的に示す。静圧軸受け絞りは、摺動による摩擦・摩耗の低減効果のほかに、スプールとの位置関係から明らかなように、スプールの動きに対してメータイン回路として機能し、スプール動作の応答性向上の効果も併せ持つ。一方、減衰絞りは、スプールの動きに対してメータアウト回路として機能している。後述するように、これらの機能をより効果的に作用させるためには、スプール動作に対して、2箇所の絞りの相対的な影響を知っておくことが重要である。

スプールのソレノイドの推力とばね力とのバランスで定位している。ここで、図1に示すように引張りばねを用いることで、スプールの片側が自由端となるため、スプールにかかるモーメントや横力を低減し、静圧軸受けの機能をより効果的に得ることが可能になる。

図3に制御弁内で構成されるシステムのブロック線図を示す。本制御弁は、補償回路、ソレノイド、案内弁の要素に分けることができる。それぞれの伝達関数を $C(s)$ 、 $S(s)$ 、 $P(s)$ で表す。案内弁の制御はスプール変位を作動変圧器(LVDT)で検出し、これ

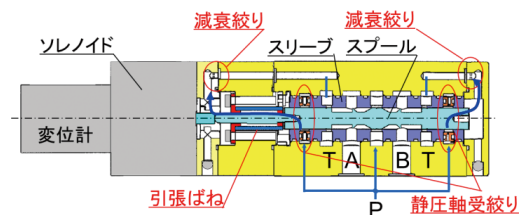


図1 水圧電磁比例制御弁の構造

表1 主な仕様

項目	仕様
定格流量	[L/min] 20
定格圧力	[MPa] 14
使用圧力範囲	[MPa] 3.5~14
使用温度範囲	[℃] 2~50
作動流体	水道水
入力電圧	[V] ±10

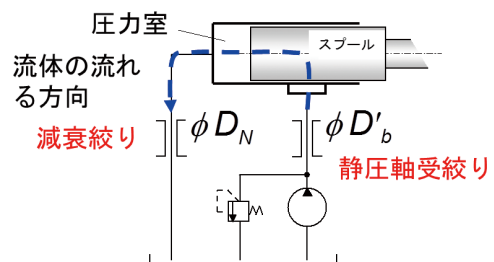


図2 静圧軸受け絞りと減衰絞りのスプールに対する位置関係

をフィードバックしてPI制御の補償回路により行っている。

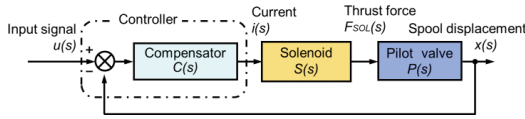


図3 ブロック線図

3 伝達関数と特性方程式

図4に解析モデルのパラメータ定義図を示す。以下に各要素について説明する^{2).3).4)}。

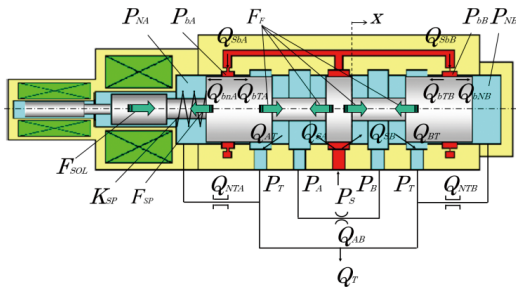


図4 パラメータ定義図

3.1 補償回路C(s)

補償回路は一般的なPIコントローラとし、式(1)で定義する。

$$C(s) = \frac{kpT_s s + kp}{T_s} \quad (1)$$

3.2 ソレノイドの伝達関数S(s)

ソレノイドの伝達関数S(s)は、既報において実験的に一次遅れの標準形で近似でき、時定数 τ_{SOL} を用いて式(2)の伝達関数で表現できる³⁾。

$$S(s) = \frac{K_{SOL}}{\tau_{SOL} s + 1} \quad (2)$$

3.3 案内弁の伝達関数P(s)

案内弁の伝達関数P(s)は、各部の圧力、流量を平衡点近傍において線形化し、式(3)の一次遅れ系の伝達関数として求めることができる。なお、式(3)の各パラメータは表2で定義する。ここで、 Cr は、減衰絞りと静圧軸受け絞りの等価直径比である。静圧軸受け絞りの直径は、スプールの円周方向に4カ所配置されていることから、これらを一つの絞りとして等価直径 D'_b で表し、減衰絞りの直径 D_N との比を $Cr = D_N / D'_b$ で定義した。静圧軸受け絞りの流れはレイノルズ数 Re から層流と判断し、チョーク絞りとして α_b でモデル化した。減衰絞りの減衰力を決める摩擦係数 λ は、その流れが乱流であるため、ブラシウスの実験式を適用した。

$$P(s) = \frac{x(s)}{F_{SOL}(s)} = \frac{K_L}{T_L s + 1} \quad (3)$$

表2 パラメータ一覧

$C_r = \frac{D_N}{D'_b}$	$D'_b = 2D_b$
$D_N = 2C_r D_b$	$\zeta = \frac{2A_{SPL}^2}{\alpha \cdot \alpha_{bN}}$
$R_e = \frac{2wD_b}{v} C_r$	$T_L = \frac{\Gamma - \zeta}{K_{SP} + \beta}$
$K_L = \frac{1}{K_{SP} + \beta}$	$\alpha_b = \frac{\pi \cdot D_b^4}{32 \cdot \mu \cdot L_b}$
$\alpha_{bT} = \frac{\pi \cdot D_{SPL} \cdot \delta^3}{12 \cdot \mu \cdot L_{bT}}$	$\alpha_{bN} = \frac{\pi \cdot D_{SPL} \cdot \delta^3}{12 \cdot \mu \cdot L_{bN}}$
$W = \frac{4Q_{NTO}}{\pi \cdot 2^2 D_b^2} \frac{1}{C_r^2}$	$\alpha_N = \frac{\pi^2 2^5 D_b^5}{16 \rho L_{NT} Q_{NTO} \cdot \lambda} C_r^5$
	$\Gamma = (L_{bn} + L_{bT}) \frac{2\pi \cdot D_{SPL} \cdot \mu}{\delta}$
	$\alpha = \frac{\alpha_{bN}}{\alpha_{bN} + \alpha_{bT} - \alpha_b} - \frac{\alpha_N}{\alpha_{bN}} - 1$
	$\beta = 8 \cdot C \cdot L_w \cdot (P_s - P_L) \cot(\theta)$
	$\lambda = 0.3164 \cdot \left(2 \frac{wD_b}{v}\right)^{-0.25} C_r^{-0.25}$

3.4 開ループ伝達関数V(s)

以上で定義した3つの要素のうち、ソレノイドと案内弁により構成される伝達特性は図5に示すブロック線図の開ループの伝達関数 $V(s)$ として、式(4)の二次遅れ系で表される。ここで、減衰係数 ζ と固有振動数 ω 及び比例定数 K は式(5)~式(7)で表される。開ループ伝達関数の固有振動数は式(5)のように案内弁とソレノイドの推力の応答特性の時定数で決まる。

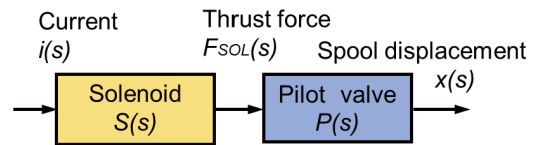


図5 補償回路を除いたソレノイドと案内弁のブロック線図

$$V(s) = \frac{K\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2} \quad (4)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{T_L \cdot \tau_{SOL}}} \quad (5)$$

$$\zeta = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\tau_{SOL}\omega} + \tau_{SOL}\omega \right) \quad (6)$$

$$K = \frac{K_{SOL}}{K_{SP} + \beta} \quad (7)$$

3.5 一巡伝達関数 $V_{SYS}(s)$

更に、図3に示したように補償回路を含めた制御弁システムにおける一巡伝達関数 $V_{SYS}(s)$ は、式(1)、式(4)のフィードバック結合により式(8)で表すことができる。

$$V_{SYS}(s) = \frac{C(s)v(s)}{1 + C(s)V(s)} = \frac{k_p K \omega^2 \left(s + \frac{k_p K \omega^2}{T_I} \right)}{s^3 + 2\zeta \omega s^2 + (1 + k_p K) \omega^2 s + \frac{k_p K \omega^2}{T_I}} \quad (8)$$

上記で求めた一巡伝達関数 $V_{SYS}(s)$ の特性方程式は、以下の式(9)で表される。

$$T_I s^3 + 2T_I \zeta \omega s^2 + (1 + k_p K) T_I \omega^2 s + k_p K \omega^2 = 0 \quad (9)$$

4 安定性に関する考察

補償回路を含めた制御弁における特性の安定性を調べるには、補償回路を含めた式(9)の特性方程式をもとに検討することが可能である。

4.1 ソレノイドと案内弁部の動特性に及ぼす Cr の影響⁵⁾

案内弁の安定性に関わるパラメータとして、静圧軸受け絞りと減衰絞りに注目して検討する。前述のとおり、これらはスプールとの位置関係によって、それぞれメータイン回路、メータアウト回路を構成し、スプール動作に対して、応答性と減衰性の相反する効果をもたらす。これにソレノイドの一次遅れ系の推力特性が加わることでソレノイドと案内弁の応答特性が決まる。これらの影響について、静圧軸受け絞りと減衰絞りの等価直径比で定義した Cr と式(3)で定義した案内弁の伝達関数の時定数 T_L と式(4)で定義した案内弁とソレノイドを含めた伝達関数の減衰係数 ζ により考察する。図6に Cr と時定数 T_L 及び減衰係数 ζ の関係を示す。

時定数 T_L は Cr の増加に対して反比例して減少している。これは、 Cr が小さい場合、減衰絞りが静圧軸受け絞りに対して相対的に小さいことを意味し、メータアウトの効果でスプールの応答が遅くなる。逆に Cr が大きくなるに従い時定数 T_L が反比例して小さくなり、静圧軸受け絞りによるメータインの効果で応答が速くなる。

減衰係数 ζ は、 Cr の値に関わらず ζ は常に正である。従ってシステムへ応用する際は、あらかじめ共振周波数を避けて設計することが可能である。

$Cr=0.69$ で減衰係数 ζ が最小値1となるため、過渡応答においてオーバシュートを生じない臨界制動になっている。更に Cr が大きくなると ζ は指数関数的に増大するため、過制動の伝達特性になり、スプールの応答が遅くなる。

以上の結果から、 Cr が小さすぎると時定数 T_L が大きくなることで応答が遅くなり、 Cr が大きすぎると減衰係数 ζ が増大することにより応答が遅くなるので、 Cr をある範囲に設定することでソレノイドと案内弁の応答性を改善することができる。前報において Cr の最適値は $Cr = 0.69 \sim 1.6$ の間にあることが示されている⁵⁾。

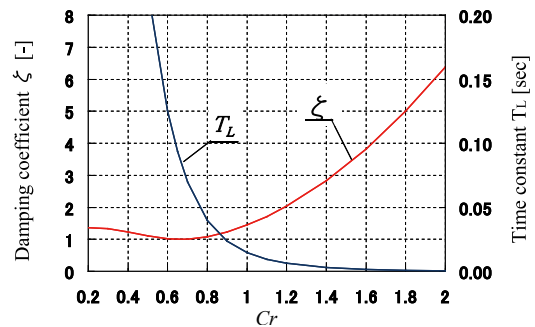


図6 Cr と時定数 T_L 及び減衰係数 ζ の関係

4.2 補償回路を含めた総合的考察

前述のとおり、 Cr をある範囲に設定することでソレノイドと案内弁の応答性が良くなることを示したが、これに補償回路が加わることで制御弁の応答性は式(8)で表現されるように、不安定要素が包含されることが予測される。制御弁を安定に制御するためには、 Cr に着目した補償回路の制御パラメータとの関連を知っておくことが重要である。そこで、式(9)で表される制御弁の伝達関数の特性方程式に対して、Hurwitzの安定判別法を適用し、補償回路の制御パラメータと Cr の関係から制御弁の安定性について検討する。式(9)の特性方程式の各係数 $a_0 \sim a_3$ は、式(10)~(13)として求められる。

$$a_0 = T_I \quad (10)$$

$$a_1 = 2T_I \zeta \omega \quad (11)$$

$$a_2 = T_I \omega^2 (1 + Kk_p) \quad (12)$$

$$a_3 = Kk_p \omega^2 \quad (13)$$

Hurwitzの安定判別法において、この系が安定となるためには、 $a_0 \sim a_3$ の各係数が正であることが必要となる。Hurwitzの行列式は式(14)~(16)で表すことができる。

$$H_1 = a_1 = 2T_I \zeta \omega \quad (14)$$

$$H_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 = 2T_I \zeta \omega T_I \omega^2 (1 + Kk_p) - T_I Kk_p \omega^2 \quad (15)$$

$$H_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = a_3 H_2 = Kk_p \omega^2 [2T_I \zeta \omega T_I \omega^2 (1 + Kk_p) - T_I Kk_p \omega^2] \quad (16)$$

これらの行列式において、式(14)の H_1 は、式(5)、(6)及び図6から $H_1 > 0$ となることは明らかである。従って、全ての行列式が正になるための条件は、 H_2 が正になることが必要条件で、 ζ で整理すると式(18)が得られる。

$$2T_I \zeta \omega T_I \omega^2 (1 + Kk_p) - T_I Kk_p \omega^2 > 0 \quad (17)$$

$$\zeta > \frac{Kk_p}{2T_I \omega (1 + Kk_p)} \quad (18)$$

つまり、補償回路の制御パラメータが制御弁の特性に及ぼす安定性及び安定限界は、式(18)の不等式により決まる。この式は、制御弁の安定限界の視点から、式(5)、(6)及び図6で示したように減衰係数 ζ 及び固有周波数 ω に含まれる Cr に関係していること、また、補償回路の比例ゲインと積分時間が相互に影響を及ぼし合っていることを示している。以下、各パラメータが制御弁の特性に及ぼす安定性について考察する。

4.3 比例動作と積分動作の相互影響

比例ゲインと積分時間が安定限界に及ぼす相互影響については、式(15)を用いて考察することが可能である。式(15)において、 T_I を大きくすると右辺は0に近づく、一方、左辺 ζ は、式(6)で表されるように補償回路を除いたソレノイドと案内弁の伝達関数の減衰係数であるため、比例ゲイン及び積分時間には依存しない一定値となる。その値は図6で示したとおり Cr に対して常に1より大きい。従って、式(18)は任意の Cr 及び K_p に対して不等式を満足するため、比例ゲイン K_p は制御弁の安定性に対して及ぼす影響はなく、比例動作のみでは制御弁は常に安定となる。

図7(a), (b), (c)に比例制御のみの場合のステップ応答の実測結果を示す。代表例として、 Cr はややメータインの効果をもつ $Cr=1.2$ を選定し、比例ゲイン $K_p=2, 6, 10$ の場合を示す。 K_p を大きくすると、立ち上がりが速くなり、オーバーシュートが発生、振動しながらも収束し安定に至っている。ここで、実測結果から、 $K_p=10$ までは安定と判断できるが、立ち上がりで振動が発生しているので、 K_p を更に大きくすることでより振動的になる可能性が予測される。

図8に同条件でのシミュレーション結果を示す。シミュレーション結果においても $K_p=10$ までは安定しており、解析結果と定性的に一致している。

$K_p=6$ までは立ち上がり及び減衰特性については実測結果と同様の傾向が確認できる。なお、実測とシミュレーションの結果ではその振動周波数に違いが見られるが、これは、数式モデルでは、比例弁の実用的な使用周波数域を対象とし、高周波数域で共振周波数を持つ慣性項を考慮していないためと考えられる。シミュレーション結果では定常偏差が1%程度で

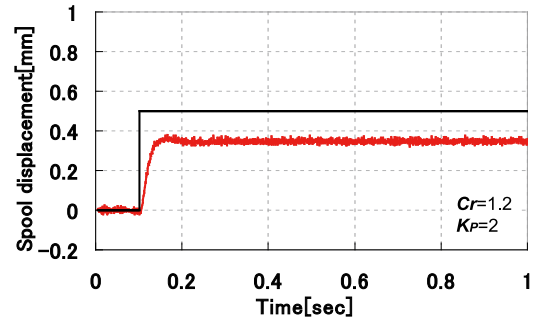


図7(a) 比例制御のみの実測結果 ($K_p=2$)

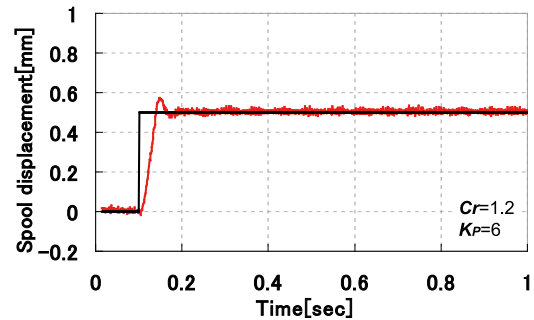


図7(b) 比例制御のみの実測結果 ($K_p=6$)

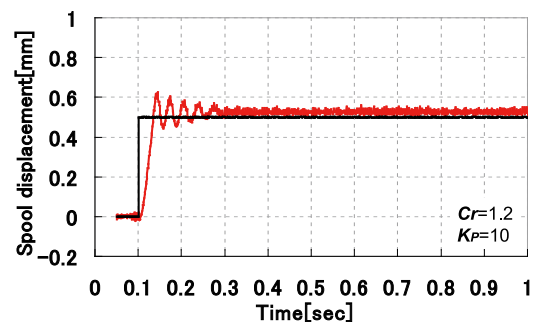


図7(c) 比例制御のみの実測結果 ($K_p=10$)

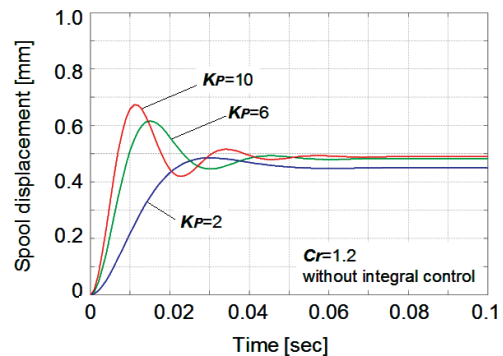


図8 比例制御のみのシミュレーション結果 ($Cr=1.2$)

あり、これを除去するには一般的には積分動作を加えることが必要である。図9に $Cr=1.2$ 比例ゲイン $K_p=6$ の場合の積分時間に対する安定限界を示す。図9において、式(18)の不等式を満足する領域が安定となり、この場合、 $T_I=5$ msec程度が安定限界であることを示している。これを実験的に確認するために図9の(a)、(b)に示した条件で行ったPI制御によるステップ応答の実測結果を図10(a)、(b)に示す。 $T_I=20$ msecのときは、立上り後0.2秒程度で収束し、安定しているが、 $T_I=4$ msecにすると安定限界を超えて持続振動が発生し、不安定になっていることが分かる。ちなみに図11に $T_I=20$ msec、 $Cr=1.2$ の場合の比例ゲインに対する安定限界の関係を示す。 $K_p=1$ 以上である一定値に漸近し、 $K_p=0\sim 10$ の範囲で ζ よりも小さいことから、比例動作は制御弁としての安定性に及ぼす影響はないことが分かる。

以上の結果から積分動作を入れることで安定範囲が狭くなることがわかった。図7(b)に示した実測結果において、 $K_p=6$ 程度では定常偏差は測定誤差範囲に含まれてしまうほど小さいと考えられ、これ以上に定常偏差に対して精査する必要がなく、比例動作のみでも実用上十分な定常特性が得られていると判断できる。従って、定常偏差をある程度、許容することで比例動作のみでも安定して制御弁を制御することが可能であり、補償回路の簡略化やコスト低減を図ることができる。

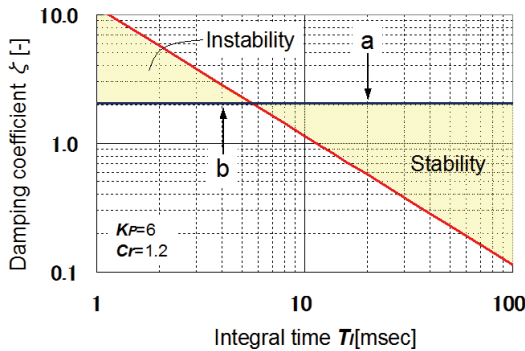


図9 積分時間と安定限界の関係

4.4 Cr の応答性への影響

このように補償回路の比例動作と積分時動作が制御弁の安定性に及ぼす影響を考察した結果、比例ゲインは安定性への影響は小さく、積分時間を加えることで不安定になる可能性を示した。比例動作のみでも基本的には安定なので、次に比例動作と Cr の応答性について考察する。図12に Cr の応答性へ及ぼす影響を示す。 Cr を大きくすると立ち上がりが速くなり、応答性に効果がある。これは、立ち上がりは案内弁の Cr に依存した伝達関数の時定数 T_L が小

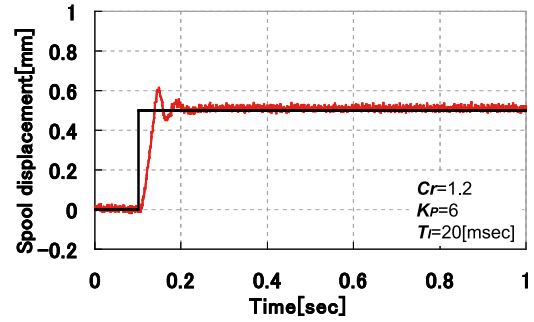


図10(a) ステップ応答における積分時間の影響の実測結果 ($T_I=20$ msec)

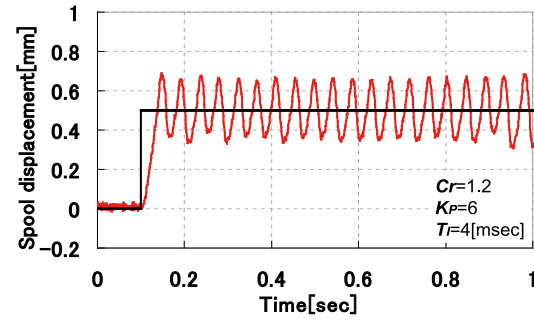


図10(b) ステップ応答における積分時間の影響の実測結果 ($T_I=4$ msec)

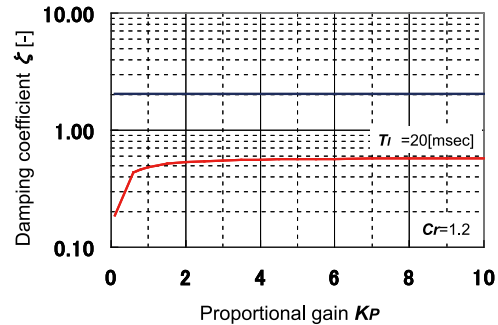


図11 比例ゲインと安定限界の関係

さいためにメータインの効果が強くなり、目標値に近づくと、ソレノイドと案内弁で決まる伝達特性の減衰係数 ζ が大きいことにより減衰効果が大きく作用し、全体としてオーバーシュートが小さく、かつ立ち上がりが速い特性が得られるためと考えられる。図13は $Cr=1.2$ と 1.6 の場合の実測結果である。 Cr が大きいほうが応答性に優れる。しかしながら、前述のとおり、実測においては立ち上がりが速くなると振動的になる。一方、振動を抑えるために比例ゲインを小さくすると定常偏差が大きくなるため、不安定要素である積分動作を加えることが必要になる。

以上の結果から、実用性の観点において、本制御弁の応答性と安定性から判断すると、比例動作のみの制御で比例ゲインに適値が存在する。

5 結言

設計的視点で、提案している水圧比例制御弁の安定性に関して検討した結果、特に設計パラメータ Cr と補償回路の影響について以下のことが明らかになった。

- 1 Cr を 1 よりも大きい範囲で設定するとメータインの効果により、立ち上がりが速くなり、安定性を確保しつつ応答性に効果がある。
- 2 実用的に要求される応答性とある程度の定常偏差を許容することで比例動作のみでも安定して制御弁が機能する比例ゲインの適値が存在する。

- 3 比例ゲインは、制御弁としての安定性に及ぼす影響は極めて小さく、積分動作を加えることで安定範囲が狭くなる。

参考文献

- 1) Miyakawa, S., Yamashina, C., Takahashi, T., Development of Water Hydraulic Proportional Control Valve, the Fourth JHPS International Symposium on Fluid Power, ISBN4-931070-04-3, ©Copyright JHPS, 1999 All rights reserved. Japan
- 2) Yoshida, F., Miyakawa, S., Characteristics of Proportional Control Valve Using Tap Water, the 7th International Fluid Power Conference, Group H, 445-456, 22-24 March 2010, Aachen, Germany.
- 3) Yoshida, F., Miyakawa, S., Dynamic Characteristics of Proportional Control Valve Using Tap Water—Experimental Examination—, the Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power, Vol. 2 469-480, 18-20 May 2011, Tampere, Finland.
- 4) Yoshida, F., Miyakawa, S., Effect of Parameters on Frequency Characteristics of Proportional Control Valve Using Tap Water, the 8th JFPS international Symposium on Fluid Power in Okinawa, Japan, on October 25-28, 2011, CD-ROM.
- 5) Yoshida, F., Miyakawa, S., Effect of Design Parameter on Response Characteristics of Water hydraulic proportional Control Valves, The 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power, Proceedings, ISBN: 978-91-7519-572-8, June 3-5, 2013, Linköping, Sweden.

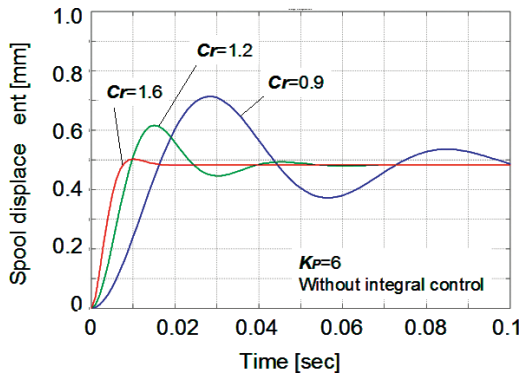


図12 Cr の応答性への影響 (シミュレーション結果)

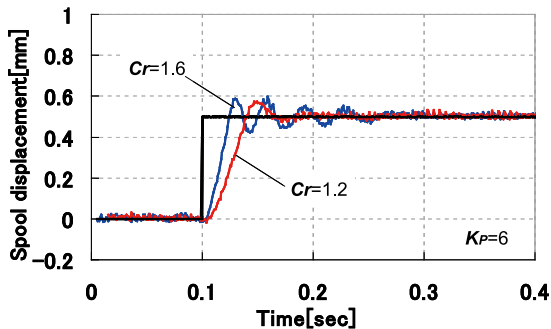


図13 Cr の応答性への影響 (実測結果)

著者



吉田 太志

1998年入社。技術本部事業開発推進部（相模駐在）専任課長。博士（工学）。水圧機器・システムの研究・開発に従事。