

# 電子式バルブポジションナに搭載する 空気圧式調節弁のヒステリシス補償機能

涌井徹也\*・橋詰 匠\*・西島剛志\*\*

## Hysteresis Compensation Installed in Digital Positioner for Pneumatic Control Valve with Tightened Grand Packing

Tetsuya WAKUI\*・Takumi HASHIZUME\*・Takashi NISHIJIMA\*\*

**Abstract:** This paper analyzes the behavior of a pneumatic control valve-digital positioner system that has a large hysteresis due to a tightened grand packing and examines its control scheme to improve the system performance. The authors have confirmed that introducing a PI-D control action with a gap in the integrator of the position control and a minor feedback control of the diaphragm pressure is an effective way to ensure the stability and dynamic response of the system. In order to further improve the behavior of this cascading control to small changes of the position set point, this paper proposes the hysteresis compensation algorithm installed in the digital positioner for the control valve with a tightened grand packing considering flow conditions. In this compensation, the diaphragm pressure is controlled with feedforward so that the stem immediately starts to move against the large valve hysteresis including the fluid resistance. Through the experimental investigations, the effectiveness of this compensation algorithm is confirmed.

**Keywords:** control valve, positioner, flow control, hysteresis, dead time

### 1. 緒言

プロセス制御の操作部には空気圧式調節弁が多く用いられ、その大半にはステムの位置制御を行うバルブポジションナを使用する。近年のプラントの高効率運転に対応した高温・高圧ラインに使用される調節弁では、流体の漏れ防止のためにグランドパッキンの締め付け力が増大している。また、プラントの運転に要するエネルギーを削減するべく、調節弁のダイヤフラム径を小さくする傾向にもある。これらは調節弁のヒステリシスを増大させ、調節弁・ポジションナ系の制御性能を著しく悪化させる要因となっている。また、プラント運転の最適化は操作部にまで要求されるようになり、高度な調節弁の制御を実現するためにポジションナの電子・多機能化も進んでいる<sup>1),2)</sup>。しかし、高性能なポジションナであっても、それをヒステリシスの大きな調節弁に使用する場合には、構成要素が有する非線形性の相互干渉により不具合を生じることが少なくない。この不具合を改善するためには、各要素の更なる改良・高性能化が求められるが、電子式ポジションナの普及が進みつつあることに留意するならば、離散演算部での制御手法の改良によりこれを実現できればより実用的である。そこで筆者らは、位置制御調節計の積分器入力信号にギャップを設けて微小偏差を許容し、さらにダイヤフラム室内圧力の制御ループを付与したカスケード制御系を導入することで、調節弁が大きなヒステリシスを持つ場合でも、その制御性能が著しく向上することを明らかにした<sup>3)</sup>。しかし、ステム位置の目標値変化幅が小さい場合には、依然として調節弁のヒス

テリシスの影響が現れ、長い無駄時間を生じること確認している。また、実流状態下では、調節弁が受ける流体反力がステムの駆動力に対して無視できない場合（例えば、大口径弁の使用や高差圧ラインへの適用）には、ヒステリシス特性が無負荷状態下（流体を流さない場合）とは大きく異なり、制御挙動に影響を及ぼすことにも留意すべきである。以上を踏まえて本論文では、ステム位置の目標値変化に対して、水流状態下での調節弁のヒステリシス特性の影響を十分に低減し、ステムが速やかに動き出すように、ダイヤフラム室内圧力をフィードフォワード操作するヒステリシス補償機能を提案し、実験調査を通じてその有効性を明らかにしている。

### 2. 記号表

$T_C$	: 離散演算周期	s
$T_I$	: 積分時間	s
$T_D$	: 微分時間	s
$K_C$	: 比例ゲイン	
$P$	: ダイヤフラム室内圧力	MPa
$s$	: ラプラス演算子	
$X$	: ステム位置	mm
$\gamma$	: 微分ゲインの逆数	

#### 添え字

A	: ヒステリシス特性曲線上の動作点	
B	: ヒステリシス特性曲線上の動作点	
CC	: 弁を閉じるのに必要な操作量	
CO	: 弁を開けるのに必要な操作量	
COM	: 補償信号	
DIA	: ダイヤフラム室内圧力	ERR: 偏差信号
O	: 初期動作点	P : 圧力
S	: ステム位置	SP : 目標値
u	: 弁上流	0 : 初期動作点

\* 早稲田大学理工学総合研究センター 新宿区喜久井町 17

\*\* 横河電機 (株) 武蔵野市中町 2-9-32

\* Advanced Research Institute for Science & Engineering,  
Waseda University

\*\* Yokogawa Electric Corporation  
(Received May 6, 2004)

## 2. 実験装置

調節弁・ポジション系の動特性の調査にはシミュレーションモデルを用いた例が多く見られるが<sup>4)</sup>、本論文では、構成要素の非線形性が系の不具合に大きな影響を及ぼすことを重視し、実験調査による検討を行う。実験装置は水流試験設備に設置された空気圧式調節弁、電子式ポジション、そしてポジションの離散演算機能とデータ測定・記録機能を担う PC より構成されている。

### 2.1 水流試験設備

水流試験設備のフローシートを Fig. 1 に示す。本設備は 3B (80[mm]) 管、4B (100[mm]) 管の 2 つのラインを備えており、本論文では 4B 管ラインに対象調節弁を設置している。管内流体である水は実験用水槽から多段渦巻きポンプ (日立製作所: 1[MPa], 1.2[m<sup>3</sup>/min], 45[kW]) により圧送され、調節弁にて減圧後 (弁下流は大気圧開放)、水槽に戻される。試験区間は調節弁の流量係数の測定に関する JIS B2005 に準拠し、弁上流側直管長を 2400[mm] (24D 相当)、下流側直管長を 1100[mm] (11D 相当) としている。また、圧力伝送器 (横河電機: EJA430) により、弁上流側 220[mm] (2D 相当)、弁下流側 610[mm] (6D 相当) にて調節弁の上、下流圧力を、試験区間後方に設置した電磁流量計 (横河電機: YM200) により弁通過流量を、それぞれ測定している。

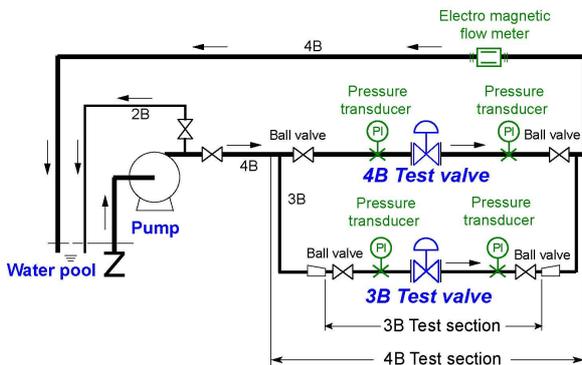


Fig. 1 Flow experimental installation

### 2.2 空気圧式調節弁

空気圧式調節弁の主要諸元を Table 1 に示す。接続管口径は 4B (100[mm])、駆動部のダイヤフラム径は 330[mm]、定格 Cv 値は 140 である。グランドパッキンは、高温・高圧下での使用を想定して、石棉系の網組みパッキン (P6610) とピラーフォイルのモールドパッキン (P118) の 2 種を組み合わせている。

### 2.3 電子式ポジション

ステムの位置制御を行うための電子式ポジションは、Fig. 2 に示すように、角度センサ、離散演算装置としての PC、I/P 変換要素、パイロットリレーより構成される。PC を離散演算部とすることで任意の制御手法の構築が可能となり、その効果を実機にて確認できる点が大きな特徴と言える。電子式ポジションのステム位置制御フローは以下のようにになっている。

まず、PC 上でステム位置の目標値が与えられる。この目標値と角度センサより出力されたステム位置信号とが比較演算され、偏差に基づく出力信号が D/A 変換器、V/I 変換器を介して電流信号として出力される。さらに電流信号は I/P 変換要素により圧力信号 (ノズル背圧) に変換され、パイロットリレーを操作して作動空気をダイヤフラム室に供給することにより、ステムを駆動する。離散演算周期は 15[ms] であり、調節弁の動作に比べて十分速い演算周期を実現している。

### 2.4 計測系

収録する系の運転データは、ポジション内の角度センサから得られるステム位置、半導体圧力センサ (横河電機: FP101) にて測定するダイヤフラム室内圧力、ステムに内挿されたロードセル (日本キスラー: 9341P) により測定する弁軸推力、PC 上で演算する調節計の各出力信号、そして前述の弁上、下流圧力と弁通過流量である。ここで使用する測定器は、いずれも十分な動特性を持つことを確認している。以上のデータはポジションでの離散演算周期と同一のサンプリング周期で測定し、A/D 変換器を介して PC のハードディスク上に保存し

Table 1 Specifications of test control valve

Item	Specification
Actuator (MOTOYAMA)	
Form	Multiple spring / Single acting diaphragm
Direction	Air to close
Maximum range	38 [mm]
Supply pressure	0.24[MPa]
Spring range	0.04~0.20[MPa]
Diaphragm diameter	330[mm]
Diaphragm effective area	515[cm <sup>2</sup> ]
Diaphragm maximum capacity	4510[cm <sup>3</sup> ]
Body (MOTOYAMA)	
Form	Groove
Valve size	4B(100[mm])
Pressure rating	JIS 10K
Action	Direct action
Rated CV	140

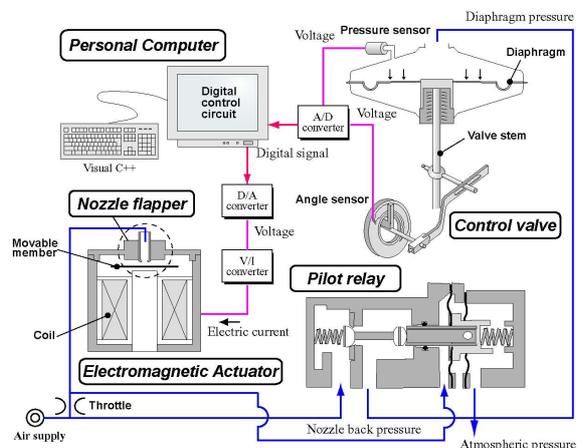


Fig. 2 Schematic of pneumatic control valve-digital positioner system

ている。なお、使用する PC の CPU は PentiumII-233[MHz]、RAM は 128[MB]である。

### 3. 調節弁のヒステリシス特性

無負荷状態において、対象調節弁のダイヤフラム室内圧力をごく緩やかにフルスパン (0.04~0.20[MPa]) 変化させた時のステム位置とダイヤフラム室内圧力の関係を Fig. 3 に示す。グラウンドパッキンの摩擦力により、同一のステム位置であっても、閉動作時 (図中赤線) と開動作時 (図中青線) でダイヤフラム室内圧力が大きく異なることがわかる。本論文では、ステム位置 (フルスパン: 0~38[mm]) に対するダイヤフラム室内圧力のヒステリシスを調節弁のヒステリシスと定義する。実験の再現性を保証するため、前述のグラウンドパッキンを充填した時の無負荷状態下での調節弁のヒステリシスが 16% (約 1300[N]) になるように常に調整し、以降の実験を行っている。しかし、水流状態下では調節弁が流体反力を受けるため、ヒステリシス特性が無負荷状態下と大きく異なることには留意を要する。そこで、ステム位置 50%における弁上流圧力が 0.1, 0.2, 0.3[MPa]となるように、調節弁上流のボール弁開度を固定した上で測定した水流状態下でのヒステリシス特性を、無負荷状態の特性と併せて Fig. 4 に示す。これより、ステム位置 50%で設定した弁上流圧力を高くするほど、また、弁開度が小さくなり弁上流圧力が上昇するほど、調節弁はより大きな流体反力を受け、同一のステム位置を保持す

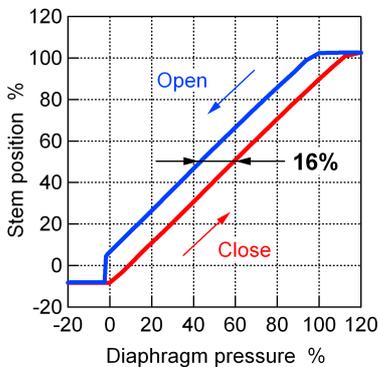


Fig. 3 Hysteresis characteristics of test control valve under no load condition

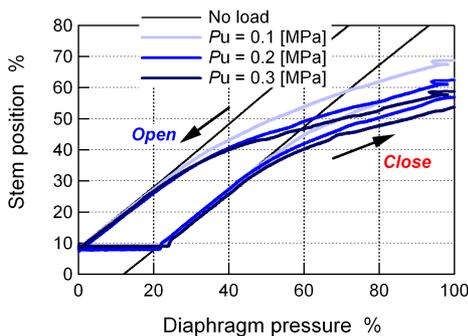


Fig. 4 Hysteresis characteristics of test control valve under flow conditions

るために必要なダイヤフラム室内圧力は高くなることがわかる。これに伴い、ダイヤフラム室内圧力に対するステム位置のゲイン  $dx/dp$  が小さくなることも確認できる。

以上のように調節弁には大きなヒステリシスが存在するため、ステム位置の目標値の変化方向と変化前のステムの動作方向との関係により、その応答に顕著な違いが現れる。ここでは便宜上、目標値の変化と変化前のステム動作が同一方向の場合を FORWARD MODE、逆方向の場合を REVERSE MODE と呼ぶ。REVERSE MODE では、ダイヤフラム室内圧力がヒステリシス相当分を変化するまで (弁軸推力がパッキンの静止摩擦力に打ち勝つまで)、ステムは動き出すことが出来ない。

### 4. カスケード制御による不具合

#### 4.1 カスケード制御の概要<sup>3)</sup>

本研究では、Fig. 5 に示すように、調節弁・ポジション系の制御性能を向上させるため、位置制御調節計にダイヤフラム室内圧力の制御ループを付与したカスケード制御を採用している。前述のようにポジションの制御動作は離散的に行われるが、ここでは簡便のため連続系で示している。まず、位置制御調節計では、ステム位置の目標値と実際のステム位置とが比較演算 (PI-D 動作) される。しかし、積分器が偏差を許容しないために訂正動作を繰り返し、ハンチングが生じやすいことから、積分器入力信号にはフルスパンに対して  $\pm 0.25\%$  のギャップを設け、偏差がギャップ内に入った場合には積分演算を停止 (積分器出力信号は保持) させる。また、I/P 変換要素、パイロットリレーから成る圧力操作部は強い非線形性を有するため、位置制御調節計の出力信号に対するダイヤフラム室内圧力の応答性が悪く、系の制御性能を低下させる主要因となっている。そこで、位置制御調節計の出力信号を目標値とする圧力制御調節計 (P-D 動作) を付与している。

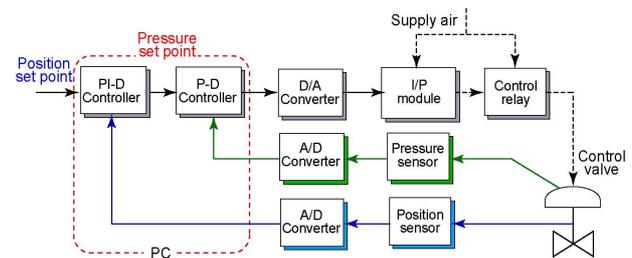


Fig. 5 System configuration of cascading control

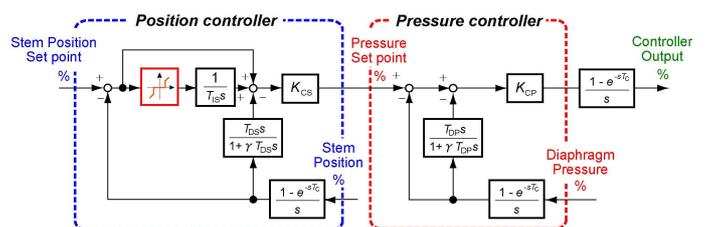


Fig. 6 Block diagram of cascading controller

各調整値の設定に関しては、圧力制御調節計では一巡ゲインを十分大きくし、圧力操作部の非線形性の低減を優先した調整としている。また、位置制御調節計については、オーバーシュートを生じない調整が系の安定性から見て有利なことを確認しているため、Chien-Hrones-Reswick 法のオーバーシュートなしの条件<sup>5)</sup>を適用している。各調整値の設定の違いが挙動に及ぼす影響については文献 3) を参照のこと。以上に述べたカスケード制御系のブロック線図を Fig. 6 に、調整値を Table 2 にそれぞれ示す。

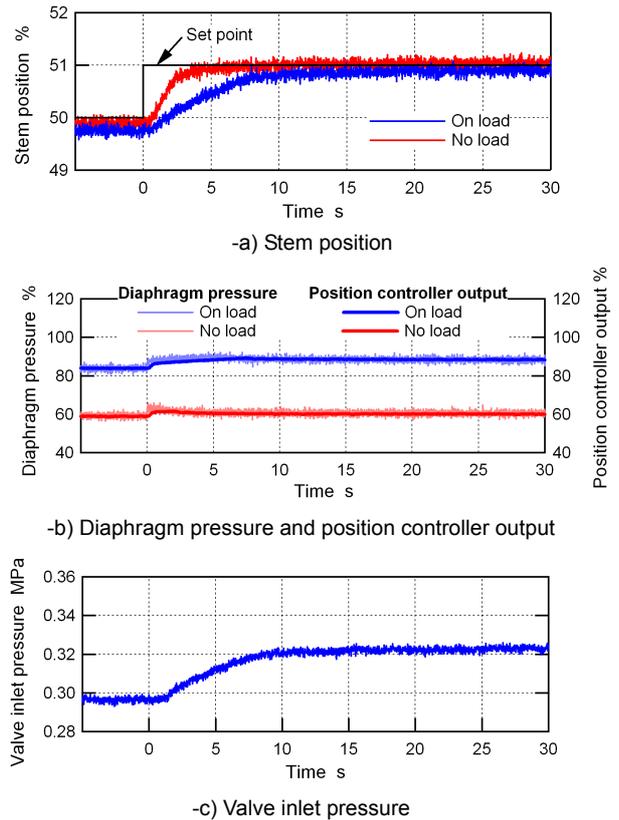
**Table 2 Parameters of cascading controller**

Item	Parameter
Position controller	
Proportional gain	3.57
Integral time	3.30 [s]
Derivative time	0.232 [s]
Derivative action gain	10
Pressure controller	
Loop gain	120
Derivative time	0.125[s]
Derivative action gain	10
Discrete operating period	15[ms]

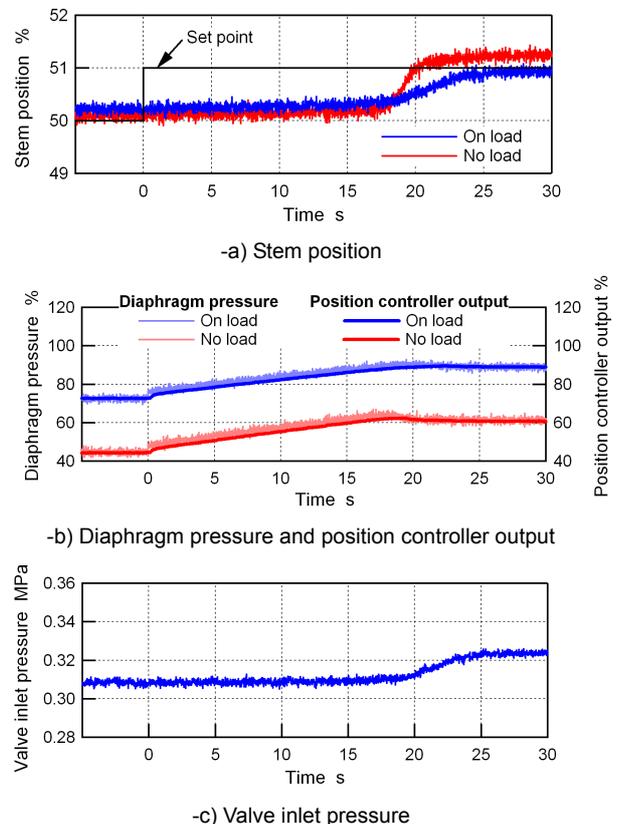
#### 4.2 カスケード制御による不具合の調査

カスケード制御を行う際の不具合として、1%幅のステム位置の目標値ステップ状変化（初期ステム位置 50%，閉動作）に対するステム位置、ダイヤフラム室内圧力、位置制御調節計の出力信号、弁上流圧力の応答を Fig. 7, Fig. 8 に示す。ここでは、FORWARD MODE と REVERSE MODE について、無負荷状態下と水流状態下（ステム位置 50%時の弁上流圧力：0.3[MPa]）での応答をそれぞれ比較している。

まず、調節弁のヒステリシスに起因する初期動作点の違いに注目する。無負荷状態下、水流状態下いずれの場合も、FORWARD MODE (Fig. 7) では、目標値が変化した後にステムが速やかに動き出すのに対して、REVERSE MODE (Fig.8) では、ステムが動き出すまでにダイヤフラム室内圧力がヒステリシス相当分（16%）を変化する必要があり、長い無駄時間を生じていることがわかる。カスケード制御では位置制御調節計の出力信号が圧力制御調節計の目標値となるが、ここに取り上げるようなステム位置の目標値変化幅が小さい場合には、位置制御調節計の出力信号の大部分を積分器（オーバーシュートを避けるため積分時間は長めに設定）が担うため、圧力の変化に多くの時間を要することになる。変化幅の大きなステム位置の目標値変化に対しては、位置制御調節計の出力信号が調節弁のヒステリシスよりも大きく変化することにより、初期状態による応答の違いがほとんど現れないことを確認している。次に、無負荷状態下と水流状態下の応答を比較すると、いずれの初期動作点においても、水流状態下では無負荷状態下に比べてステムの応答速度が緩やかになることがわかる。これは、弁上流圧力が調節弁の閉動作に対応して上昇するため、ダイヤフラム室内圧力に対するステム位置のゲイン  $dX/dP$  が小さくなり (Fig. 4)、一巡ゲインが低下することによる。なお、目標値が変化した後のむだ時間には水流



**Fig. 7 Responses to 1% step change in FORWARD MODE**



**Fig. 8 Responses to 1% step change in REVERSE MODE**

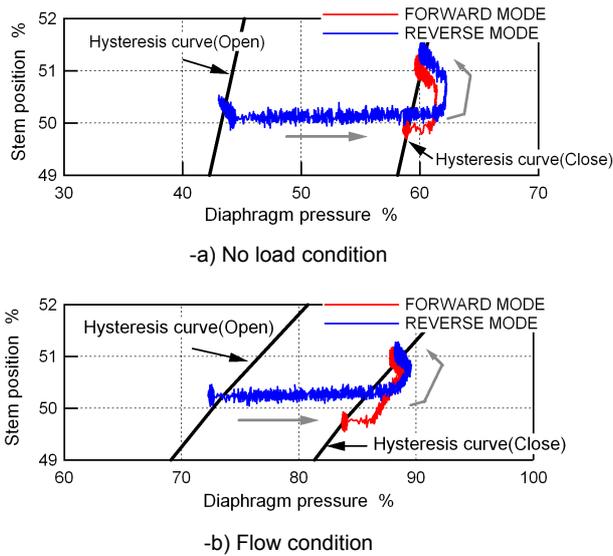


Fig. 9 Behavior of control valve to 1% step change

の有無で違いが見られないことから、ヒステリシス幅は流体反力の影響を受けないことを確認できる。以上の応答を Fig. 9 に示すダイヤフラム室内圧力とステム位置との関係に見る調節弁の挙動で評価する。図には調節弁のヒステリシス特性曲線を併せて示しているが、無負荷状態下、水流状態下いずれの場合も、REVERSE MODE では、ステム位置の目標値変化が入力する以前は FORWARD MODE の場合と反対側のヒステリシス特性曲線上で整定していることがわかる。しかし、目標値が変化すると、FORWARD MODE 時のヒステリシス特性曲線に到達するまでダイヤフラム室内圧力が変化して初めてステムは動き出し、その後の整定するまでの挙動は FORWARD MODE とほぼ同様になる。

なお、初期弁開度が異なると給気、排気応答の速度に差異を生じるが、圧力制御調節計を付与することでその影響は十分小さくなること、また、Fig. 3, Fig. 4 に見るように、ヒステリシス幅はいずれの弁開度においてもほぼ同様であることから、本論文では、初期弁開度を 50% とし、閉動作となるステム位置の目標値ステップ状変化に対する挙動を持つ系の特性を代表している。なお、実験調査を通して、他の初期弁開度や開動作においてもほぼ同様の挙動が得られることを確認している。

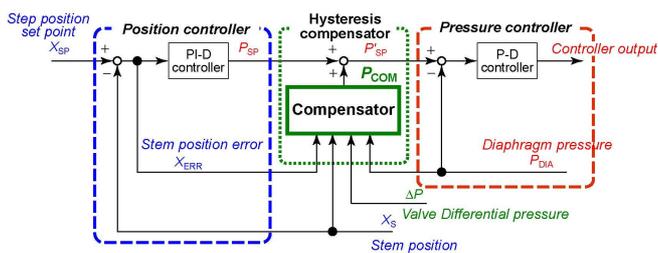


Fig. 10 Block diagram of cascading controller with valve hysteresis compensation

## 5. 調節弁のヒステリシス補償

### 5.1 ヒステリシス補償の概要

前章での調査を踏まえると、カスケード制御による不具合 (REVERSE MODE の時に生じる長いむだ時間) を改善するためには、圧力制御調節計の目標値 (位置制御調節計の出力信号) に調節弁のヒステリシスの影響を低減する圧力操作信号を加えることで、必要な圧力変化量の積分器への依存を極力小さくすることが有効と言える。そこで、Fig. 10 に示すように、位置制御調節計と圧力制御調節計との間に新たに補償器を設け、ステム位置の目標値変化に対して、ステムがすぐに動き出すよう、ダイヤフラム室内圧力をフィードフォワード操作するヒステリシス補償を導入する。具体的には、補償器で調節弁のヒステリシス特性を把握し、まず、ステム位置の目標値変化に対して、調節弁のヒステリシスを打ち消してステムが動き出すまでに必要なダイヤフラム室内圧力の変化量を補償信号  $P_{COM}$  として算出する。この補償信号を位置制御調節計の出力信号  $P_{SP}$  に加えたものを圧力制御調節計の目標値  $P'_{SP}$  とし、ダイヤフラム室内圧力をこれに追従させる制御動作を行うものである。

#### 水流下での調節弁のヒステリシス特性の把握方法

調節弁のヒステリシス特性は無負荷状態下と水流状態下で大きく異なるが (Fig. 4)、本論文では、Fig. 11 に示すように、水流状態下でのヒステリシス特性が、無負荷状態下でのヒステリシス特性と流体反力より構成されることに着目する。そこで、水流状態下で静特性実験を行い、弁軸推力より算出した流体反力 (ダイヤフラム室内圧力に換算) と弁前後差圧の

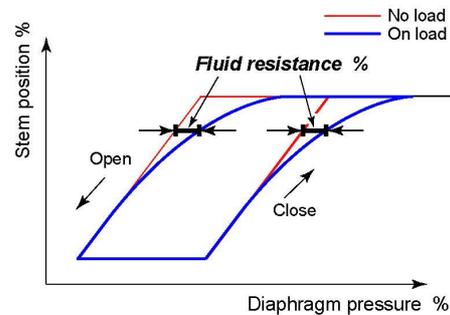


Fig. 11 Model of valve hysteresis characteristics under flow condition

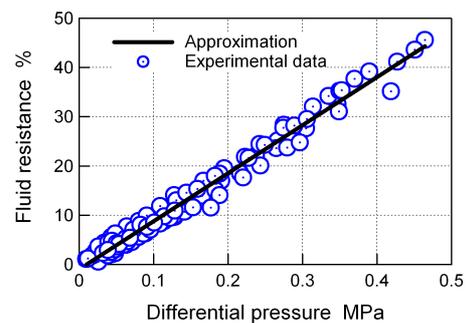


Fig. 12 Relation between fluid resistance and valve differential pressure

関係を整理した結果を Fig. 12 に示す. 流体反力は弁前後差圧にほぼ比例することがわかる. ここでは, 運転中も準定常的にこの線形関係が成立するものと仮定し, 前述の補償器にて把握している無負荷状態下でのヒステリシス特性 (Fig. 3 に見るように 2 つの直線で近似可能) に, 計測した弁前後差圧より算出する流体反力に起因するダイヤフラム室内圧力の増加分を加えることで, 水流状態下のヒステリシス特性を得る.

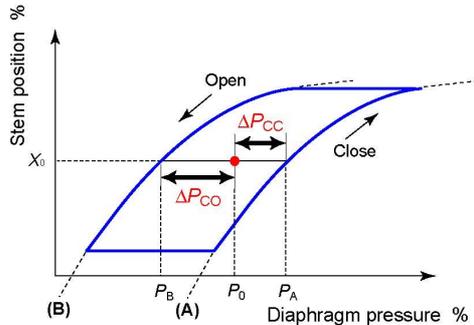


Fig. 13 Calculating method of compensation signal

### 補償信号の算出方法

補償信号はステム位置, ダイヤフラム室内圧力, ステム位置の目標値との偏差, そして弁前後差圧より算出する. Fig. 13 は水流状態下での調節弁のヒステリシス特性を模式的に示しているが, 弁が閉じる時にはダイヤフラム室内圧力が図中の曲線(A)上に, 弁が開く時には図中の曲線(B)上に到達して, 初めてステムは動き出すことができる. よって, 調節弁がステム位置  $X_0$ , ダイヤフラム室内圧力  $P_0$  なる初期動作点にある場合, 閉動作 (ステム目標値との偏差が正) に対してステムが動き出すために必要な圧力操作量  $\Delta P_{CC}$  は,

$$\Delta P_{CC} = P_A - P_0 \quad (1)$$

ここに,  $P_A$ : ステム位置  $X_0$  における曲線(A)上のダイヤフラム室内圧力.

また, 開動作 (ステム目標値との偏差が負) に対してステムが動き出すために必要な圧力操作量  $\Delta P_{CO}$  は,

$$\Delta P_{CO} = P_0 - P_B \quad (2)$$

ここに,  $P_B$ : ステム位置  $X_0$  における曲線(B)上のダイヤフラム室内圧力.

となる. 補償器はこの圧力操作量に相当する補償信号  $P_{COM}$  を出力する. また, 積分器入力信号に設けている  $\pm 0.25\%$  幅のギャップとの干渉を避けるため, ステム偏差が  $\pm 0.5\%$  より大きくなった場合に補償信号を出力する.

### 5.2 ヒステリシス補償の実証試験

以上に構築した調節弁のヒステリシス補償を導入した場合の, 1%幅のステム位置の目標値ステップ状変化 (初期ステム位置 50%, 初期弁上流圧力 0.3[MPa], 閉動作) に対するステム位置, ダイヤフラム室内圧力, 圧力制御調節計の目標値, 弁上流圧力の応答を Fig. 14 に示す. ここでは, 調節弁のヒステリシスの影響が現れる REVERSE MODE を取り上げ, カスケード制御のみを行う場合の応答についても併せて示してい

る. なお, ヒステリシス補償の有無によらず, 調整値はこれまでと同様 (Table 2) である. ヒステリシス補償を導入する場合には, ステム位置の目標値変化の入力に応じて, 位置制御調節計の出力信号に補償信号が加算されるため, ダイヤフラム室内圧力が調節弁のヒステリシス分を速やかに変化させる (図中 A). よって, ステム位置の応答に見る無駄時間が著しく短くなり, Fig. 7 に示す FORWARD MODE の場合とほぼ同様の挙動になることがわかる. なお, 本ヒステリシス補償は流体反力によるダイヤフラム室内圧力に対するステム位置のゲイン  $dx/dP$  の低下を補償するものではないため, ステムの応答速度の改善は期待できない. さらに, 1%, 0.1% 幅のステム位置の目標値連続ステップ状変化に対する系の応答を Fig. 15, Fig. 16 にそれぞれ示す. 目標値入力の変化幅が 1% の場合 (Fig. 15) は 60[s] 毎に目標値が変化し, 180[s] と 420[s] において REVERSE MODE となる目標値変化が入力される. この時の調節弁の動作点と弁前後差圧はそれぞれ Fig. 14 の場合と異なるが, 適切な補償信号が算出されているため, それぞれ FORWARD MODE とほぼ同様の挙動が得られていることがわかる. また, 近年導入が進む高度制御で重視される極微小変化に対する追従性<sup>9)</sup>を評価するための 0.1% 幅の目標値連続変化入力に対する応答では (Fig. 16), 位置制御調節計の出力信号を積分器がほぼ全て担うことになる. この場合, 目標値入力が 30[s] 毎に変化し, 330[s] と 930[s] において REVERSE MODE となる目標値変化が入力される. これに対

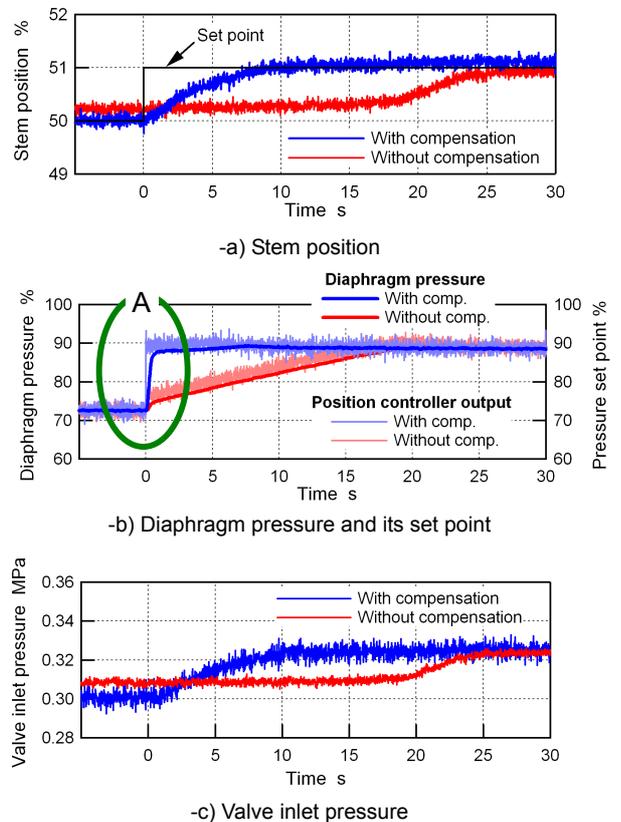


Fig. 14 Comparing result of responses to 1% step change in REVERSE MODE

してヒステリシス補償器では、偏差が±0.5%に到達すると補償信号を出力するため、カスケード制御のみを行う場合に比べて、ステムが速やかに目標値に追従することを確認できる。

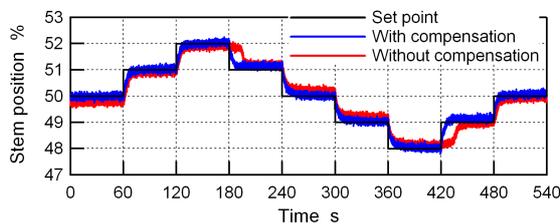
なお、位置制御調節計の出力信号に加算する補償信号量を変化させた場合の実験を行った結果、補償信号をより大きくした場合には、ステムの応答速度は向上するものの、積分器入力に付与するギャップを越えるオーバーシュートを生じ、系が整定するまでに多くの時間を要する。また、補償信号を小さくした場合には、ヒステリシスの影響を十分に低減することが出来ず、依然としてむだ時間が生じる（カスケード制御のみを行う場合に比べると著しく短くなる）ことを確認している。よって、補償信号は調節弁のヒステリシス特性曲線に到達するための圧力操作量とすることが望ましい。

## 6. 結 言

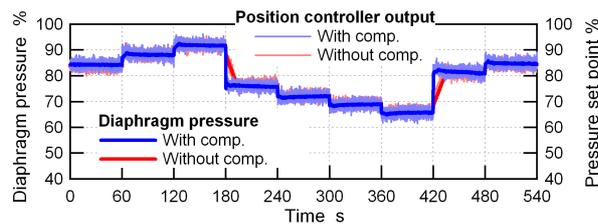
空気圧式調節弁・電子式ポジションナを一制御系と捉え、調節弁のヒステリシスが大きな場合に生じる不具合を改善し、制御性能を向上させるための系の制御手法を検討した。これまでに、電子式ポジションナの位置制御調節計の積分器入力信号にギャップを設けて微小偏差を許容し、さらにダイヤフラム室内圧力の制御ループを付与したカスケード制御を導入することで、系の制御性能が著しく向上することを明らかにしている<sup>3)</sup>。しかし、ステム位置の目標値変化幅が小さい場合

には、調節弁のヒステリシスにより長いむだ時間を生じるため、本論文では、このヒステリシスの影響を十分に低減しうる補償機能を提案し、その有効性を実証した。本論文で得られた成果を以下にまとめる。

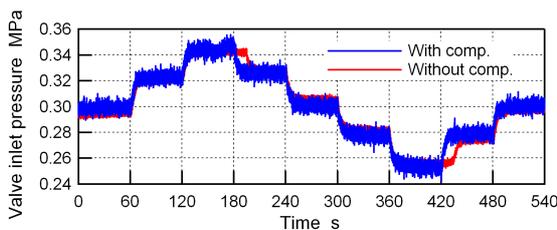
- 1) REVERSE MODE の時に発生する長いむだ時間は、ステムが動き出すまでにダイヤフラム室内圧力がヒステリシス相当分を変化する必要があるのに対して、位置制御調節計の出力信号（圧力制御調節計の目標値）の大部分を積分器が担うことにより生じる。
- 2) 水流状態下では調節弁に流体反力が作用するため、ステムの応答速度が無負荷状態下よりも緩やかになり、ヒステリシス特性も大きく異なる。静特性実験より流体反力は弁前後差圧から推定できることを明らかにした。
- 3) REVERSE MODE の時のむだ時間を改善するため、位置制御調節計と圧力制御調節計との間に補償器を設け、水流状態下での調節弁のヒステリシスの影響を相殺してステムがすぐに動き出すための圧力操作信号を算出し、ダイヤフラム室内圧力をフィードフォワード操作するヒステリシス補償を構築した。
- 4) 水流設備による実証試験を行った結果、本補償機能を導入することにより、調節弁のヒステリシスの影響が十分小さくなり、REVERSE MODE におけるむだ時間が著しく改善された良好な応答が得られることを確認した。



-a) Stem position

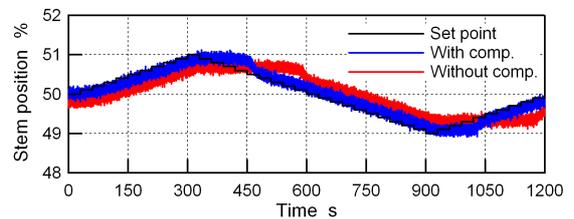


-b) Diaphragm pressure and its set point

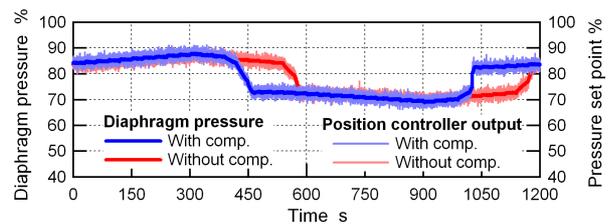


-c) Valve inlet pressure

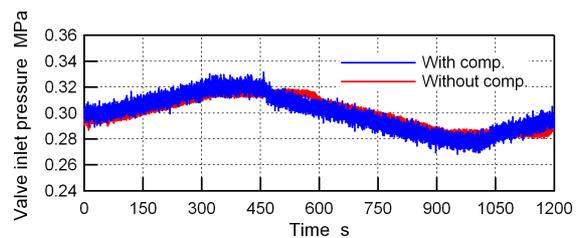
Fig. 15 Comparing result of responses to 1% continual step change



-a) Stem position



-b) Diaphragm pressure and its set point



-c) Valve inlet pressure

Fig. 16 Comparing result of responses to 0.1% continual step change

なお、本論文では、静特性実験より得られた流体反力と弁前後差圧の相関関係を準定常と仮定し、その関係を補償器にて数式化しているが、実証実験の結果より、このような仮定が相応の妥当性を持つものと考えられる。以上より、カスケード制御系にヒステリシス補償機能を装備することで、電子式ポジションナをヒステリシスの大きな調節弁に使用した場合でも、その制御性能が著しく向上しうることを明らかにした。

本論文で構築したヒステリシス補償機能の実装に当たっては、適切な圧力操作量を算出するために、無負荷状態下での調節弁のヒステリシス特性を把握する必要がある。調節弁のヒステリシスは周囲の外気温度やグランドパッキンの劣化等の影響を大きく受けるため、この点を考慮したオンライン診断機能の開発<sup>7)</sup>が不可欠といえる。また、無負荷状態下では、電子式ポジションナ内の離散演算方法のみを変更することでヒステリシス補償が構築できることを確認しているが<sup>8)</sup>、水流状態下では、ヒステリシス特性に流体反力を考慮するため、弁前後の差圧を計測する圧力センサが新たに必要となることには留意を要する。近年普及の進むフィールドバス対応機器を用いることで、補償機能の構築が容易になるものと考えられるため、この点についても引き続き検討を加えたい。

### 参考文献

- 1) 石塚光正：バルブのスマート化がもたらすもの～ユーザ評価と開発課題を通して、計装，44-5，27/29 (2001)
- 2) 呂，友近：インテリジェントポジションナからインテリジェントバルブへの進展，計装，44-5，35/38 (2001)
- 3) 涌井，橋詰，西島，石井：ヒステリシスの大きな空気圧式調節弁に使用する電子式ポジションナの高性能化，計測自動制御学会産業論文集，2-5，34/41 (2003)
- 4) たとえば，香川，清水，本田，小山：空気圧パイロット弁の非線形性を考慮した電空ポジションナの特性解析，計測自動制御学会論文集，29-11，1337/1341 (1993)
- 5) K.L. Chien, J.A. Hrones and J.B. Reswick : On the Automatic Control of Generalized Passive System, Transaction of ASME, 74, 175/185 (1952)
- 6) Entech : Control Valve Dynamic Specification Ver.3.0, 1/20 (1998)
- 7) 長谷川，真島：ヒステリシス特性のオンライン同定法，計測自動制御学会論文集，33-7，732/734 (1997)
- 8) T.Wakui, T. Hashizume and T. Nishijima : Hysteresis Compensation Loaded in Digital Positioner for Pneumatic Control Valve with Tightened Grand Packing, Proceedings of SICE Annual Conference 2003, WPI-6-2, 2220/2224 (2003)

### [著者紹介]

#### 涌井 徹也 (正会員)



2001年早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。1999年日本学術振興会特別研究員，早稲田大学理工学総合研究センター助手を経て，2003年同客員講師，現在に至る。エネルギーシステムの最適運用に向けた計測制御システム，フィールド機器の開発・研究に従事。日本機械学会，電気学会他会員

#### 橋詰 匠 (正会員)



1979年早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。工学博士。76年同大学理工学研究科助手，同専任講師，同助教授を経て，87年同教授，現在同大学理工学総合研究センター教授。エネルギー・動力システムに関する研究等に従事。日本機械学会，電気学会，日本フルードパワーシステム学会他会員

#### 西島 剛志 (正会員)



1981年東京都立大学理学部物理学科卒業。同年(株)北辰電機製作所(現)横河電機(株)入社。これまでに，バルブポジションナ，電磁流量計，温度伝送器など，フィールド機器の開発に従事。現在に至る。