

## 知的制御手法のプロセス制御への適用に関する研究(第2報)

生産技術部  
大坪昭文, 林健一郎

本研究においては、一般産業機器分野において特に本県でニーズの高いプロセス制御への知的制御技術を適用することにより、プロセス制御の高度化と高機能化を図ることを目的としている。平成13年度は、一般産業機器分野において実際によく使用される流量制御システムを想定したモデル装置を用いて、そのモデル装置の非線形特性を補償したフィードフォワード制御を行ったが、フィードバック動作が存在しないので定常偏差が残るという問題が生じた。そこで、平成14年度は、制御対象に非線形特性が存在しても制御パラメータの調整が比較的容易で、フィードバック制御の代表的な PID 制御による流量制御を行い、フィードフォワード制御における定常偏差の問題を解決した。しかしながら、この場合制御対象であるモデル装置のむだ時間の影響のため、低流量域において目標値付近で制御応答に振動が発生したので、そのむだ時間の補償を知的制御技術のモデル予測により行って、低流量域で発生する制御応答の振動の低減を図った。

### 1. はじめに

知的制御技術の特徴は、あたかもその機器装置に熟知したオペレータが行うような巧妙な判断制御を、コンピュータで比較的容易に実現できる点にある。このような特徴を有することから、知的制御技術は主として家電製品分野への応用を中心として高付加価値化に貢献してきたものの、一般産業機器分野への応用はそれほど進展していないというのが現状である。本県では、一般産業機器分野において特にプロセス制御への応用のニーズが高いと思われるので、このプロセス制御への知的制御技術を適用することにより、県内企業におけるプロセス制御の高度化と高機能化を図ることを本研究の目的とする。プロセス制御においては、管路内を単位時間に流れる流体の体積を調節するような流量の制御がその基本となることが多いので、本研究では一般産業機器分野において実際によく使用される流量制御システムを想定したモデル装置を用いて、知的制御技術をプロセス制御の流量制御へ適用することを検討する。

このモデル装置においては空気式調節弁の弁開度と流量との間に非線形特性が存在するので、平成13年度においてはその非線形特性を最小2乗法を用いて補償したフィードフォワード制御を行ったが、フィードバック動作が存在しないので制御応答に目標値との間に定常偏差が残るという問題があった。そこで、平成14年度においては、制御対象に非線形特性が存在しても制御パラメータの調整作業を比較的容易に行える、フィードバック制御の代表的な

PID 制御を用いた流量制御を行い、平成13年度に行ったフィードフォワード制御における問題を解決する。しかしながら、このモデル装置においてはむだ時間が存在するため、この場合低流量域において目標値付近で制御応答に振動が発生するが、知的制御技術のモデル予測を用いた制御対象のむだ時間補償によりその振動の低減を試みる。

### 2. パソコンを用いた流量制御の実験手順

本研究では、プロセス制御において基本となる流量の制御を行うために、制御現場で実際によく使用されている各種の制御要素から構成される、流量および液面制御システムを想定した図1に示すようなモデル装置を用いる。その内の流量制御システムに関するモデル装置の構成要素だけを取り出し図2に示しているが、このモデル装置においては、NEC社製のパソコン PC-9821Xa16の拡張スロットにユニオンデータ(株)製の12ビット A/D 変換ボードと12ビット D/A 変換ボードを挿入して流量制御の実験を行う。

本実験では、ある一定のサンプリング周期で制御量である流量の検出を電磁流量計により行い、検出された制御量と目標値との偏差から制御量が目標値に一致するような制御演算をパソコンで行って、操作量である空気式調節弁の弁開度を決定している。ここで、管路内の流量の検出は検出部の電磁流量計からの電圧信号が A/D 変換器を通してパソコンに取り込まれることにより行われる。また、弁開度は

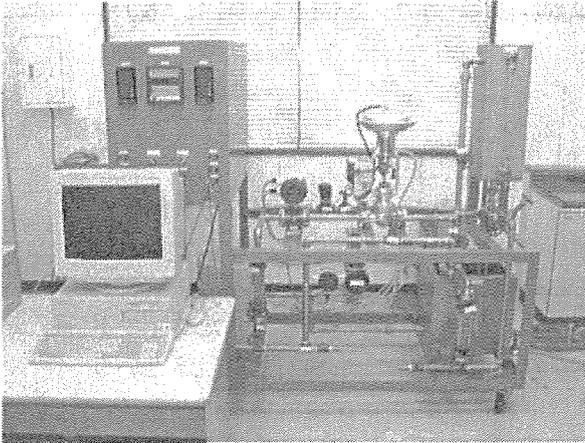


図1 流量/液面制御システムのモデル装置

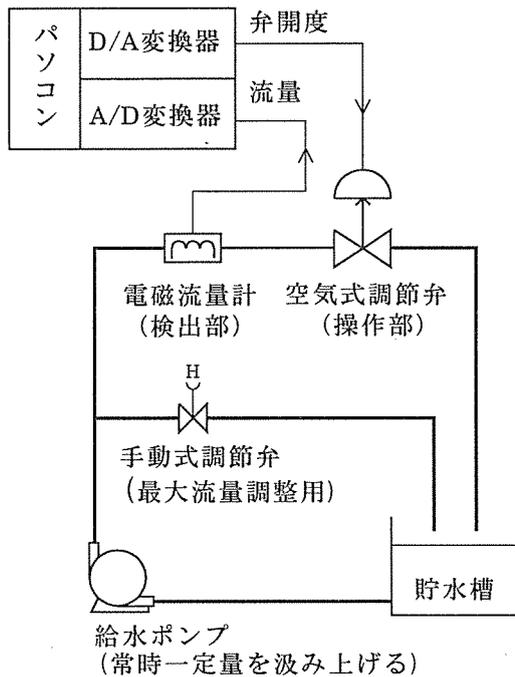


図2 流量制御システムのモデル装置の構成

パソコンから D/A 変換器を通して操作部の空気式調節弁へ電圧信号として出力される。なお、正確なサンプリング周期を実現するために、パソコンに内蔵されているタイマー/カウンタ LSI の8253を用いて CPU に一定周期のインターバルタイマー割り込みを発生させている。そして、割り込みが発生した場合に実行させる関数内でその割り込み回数をカウントさせることにより、現在のカウント値と割り込み周期の積から時間が計算できるようにプログラムを作成している。

このパソコンによる流量制御実験においては、制御量と操作量の数値とグラフによる表示により制御

経過の様子が画面上でリアルタイムにモニターできるようになっている。また、制御パラメータの調整において必要な情報となる、制御量の最大値と目標値への到達時間の数値表示を行えるようにするとともに、制御終了後において制御性能の評価を行えるように、制御経過の時系列データをファイルに保存できるようにしている。

### 3. フィードバック制御による流量制御

一般にフィードバック制御では制御対象をある目標値近傍で線形とみなして制御系を設計するが、流量制御システムのモデル装置においては空気式調節弁の弁開度と流量との関係が飽和の非線形特性となっているので、目標値を変更すると制御パラメータを再調整しなければならない。ここでは、目標値の変更に対して制御パラメータの調整が比較的行える、フィードバック制御の代表的な PID 制御を用いて流量の制御系を設計することにする。なお、この流量制御では制御応答が速いためノイズの制御に及ぼす影響を考慮して、P, I, D 動作の内 D 動作を除いた PI 制御を用いる。

連続時間系の場合、PI 制御の時刻  $t$  における操作量の演算式は

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt \quad (1)$$

となるが、パソコンによる制御ではアナログ(連続値)制御ではなくデジタル(離散値)制御を用いるので、式(1)を離散時間系で表現すると

$$u(k) = K_p e(k) + K_I \Delta t \sum_{i=0}^k e(i) \quad (2)$$

のようになる。ここで、 $u$  は操作量、 $K_p$  は比例ゲイン、 $K_I$  は積分ゲイン、 $e$  は制御偏差(=目標値-制御量)、 $\Delta t$  はサンプリング周期、 $k$  はサンプリング時点を表している。

フィードバック制御の PI 制御を行う場合には、制御パラメータの比例ゲイン  $K_p$  と積分ゲイン  $K_I$  を適切な値に設定しなければならないが、それらの値を制御対象の特性の大まかな特徴に基づいて求めるために、ここでは PID 制御のパラメータの最適調整法として最もよく用いられる Chien, Hrones and Reswick の調整則 (CHR 法とも呼ばれる) を用いる。この方法は、制御対象のステップ応答から制御対象を一次遅れとむだ時間のシステムとしてとら

表1 制御パラメータの最適値

目標値 [L/h]	$K_P$	$K_I$
100	0.065	0.048
200	0.070	0.048
300	0.075	0.049
400	0.068	0.045
500	0.076	0.048
600	0.107	0.055
700	0.117	0.060
800	0.100	0.062
900	0.048	0.048

え、その一次遅れの時定数とむだ時間から比例ゲイン  $K_P$  と積分ゲイン  $K_I$  の値を決定するものである。

しかしながら、この方法で求めた制御パラメータの値を用いたとしても、必ずしも十分に満足できる制御性能が得られるとは限らないので、それらの値を実際の制御応答を見ながら現場で再調整することが必要となる。この再調整には、PI 制御のパラメータ調整に関する以下に示すような4つの経験則を用いることができる。

- ① 制御応答が振動的な場合、 $K_P$ 、 $K_I$  を共に小さくすれば、目標値への整定は遅くなるが制御

応答の振動は小さくなる。

- ② 制御応答が振動的で目標値への整定が遅い場合、 $K_P$  を小さくし  $K_I$  を大きくすれば、制御応答の振動周期は長くなり目標値への整定は早くなる。
- ③ 制御応答の振動周期が長くてオーバーシュートが大きい場合、 $K_P$  を大きくし  $K_I$  を小さくすれば、制御応答の振動周期は短くなりオーバーシュートは小さくなる。
- ④ 制御応答にオーバーシュートが無くても目標値への整定が遅い場合、 $K_P$ 、 $K_I$  を共に大きくすれば、制御応答は振動的となりオーバーシュートも大きくなるが目標値への整定は早くなる。

ただし、 $K_P$ 、 $K_I$  いずれの値も大きくし過ぎると制御応答は不安定となり、逆に小さくし過ぎるとなかなか目標値へ整定しなくなる。

表1に示した制御パラメータの値は、目標値を100[L/h]から900[L/h]まで100[L/h]毎に変更した場合に、制御応答がオーバーシュート無しで目標値にできるだけ早く整定するように CHR 法と経験則を用いて調整したものである。ここでは、目標値を500[L/h]とした場合に制御パラメータの値を CHR 法により求め、その値を経験則に基づいて再調整し

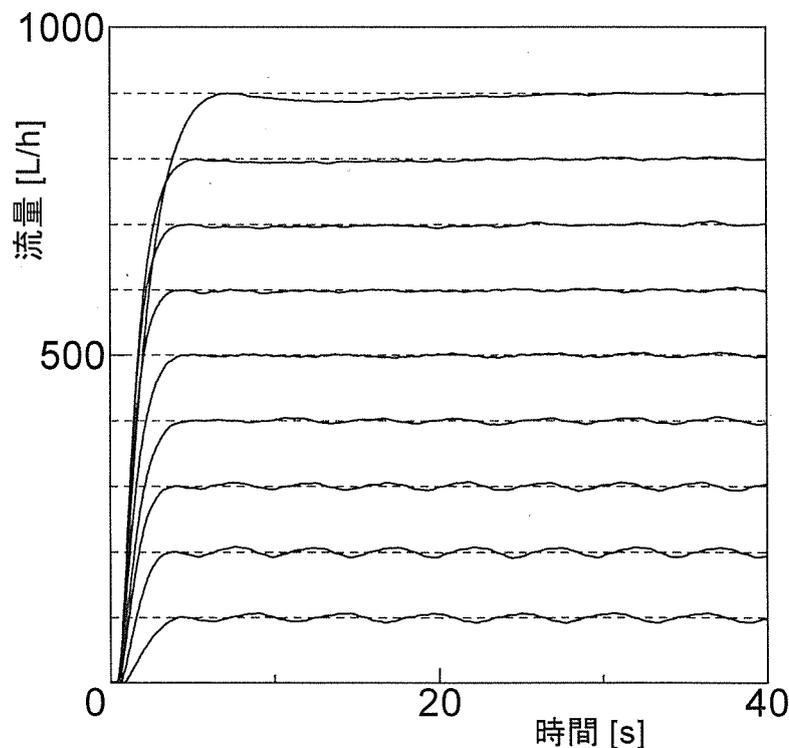


図3 フィードバック制御による流量制御結果

た後に、目標値500[L/h]の場合の値を初期値として経験則により各目標値毎に制御パラメータの値の再調整を行っている。

表1の制御パラメータの値を用いたフィードバック制御のPI制御を、流量制御システムのモデル装置へ適用した場合の制御結果を図3に示す。図3の制御結果から分かるように、目標値が中流量域から高流量域においてはまずまずの制御応答を得ることができたが、目標値が低流量域になるにしたがって目標値付近で不安定となり制御応答に振動が生じる結果となっている。

#### 4. モデル予測による流量制御の改善

図3の制御結果において、制御がスタートして暫くの間制御応答が何ら変化しない部分があるのは、この制御対象にむだ時間が存在することを意味している。図4にはこのモデル装置における空気式調節弁の弁開度と流量の関係及びその単位弁開度あたりの流量の変化分を示している。この図において点線で示した単位弁開度あたりの流量の変化分を見ると、弁開度が小さい範囲(流量で言えば低流量域)で流量の変化分が大きくなっているのが分かる。従って、低流量域においては僅かな弁開度の変化に対して流量が大きく変化してしまうことになる結果、むだ時間の影響を受けやすくなり不安定となって制御応答に振動が生じているものと考えられる。

そこで、制御対象のモデル装置をむだ時間+一次遅れ系でモデル化し、そのモデルから予測したむだ時間後の制御量を用いて現在の操作量を決定することにより、制御対象に存在するむだ時間を補償してこの流量制御の低流量域における制御性能の改善を試みる。

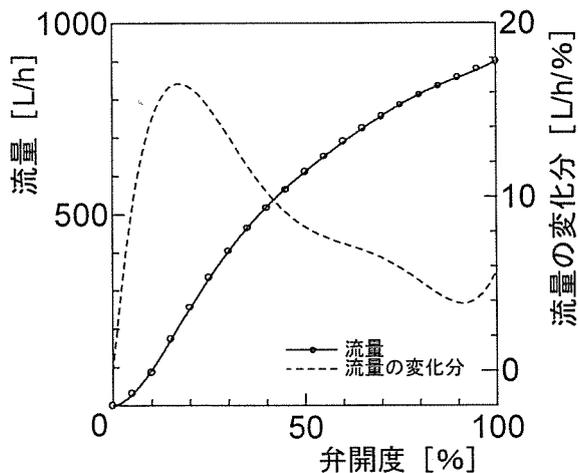


図4 空気式調節弁の弁開度-流量特性

#### 4.1 モデル予測を用いた制御対象のむだ時間補償のアルゴリズム

ここでは、制御対象をむだ時間+一次遅れ系のモデルで近似した場合に、現時点での制御量とむだ時間分の過去の操作量を用いて、むだ時間後の制御量を予測するアルゴリズムを導出する。

むだ時間+一次遅れ系の伝達関数は式(3)のように表現される。

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{1+Ts} \quad (3)$$

ここで、 $U(s)$ 、 $X(s)$ は連続時間系の操作量  $u(t)$ 、制御量  $x(t)$ をラプラス変換したもの、また、 $K$ 、 $T$ 、 $L$ はそれぞれモデルのシステムゲイン、一次遅れの時定数、むだ時間を表すパラメータである。

式(3)の伝達関数において、両辺の分母、分子をたすき掛けにして整理した後、ラプラス逆変換を行って連続時間系の状態方程式を求めると、式(4)のようになる。

$$\frac{dx(t)}{dt} = ax(t) + bu(t-L) \quad (4)$$

ここで、 $a = -\frac{1}{T}$ 、 $b = \frac{K}{T}$

非常に小さなサンプリング周期  $\Delta t$  を用いるとすると、式(4)の左辺の微分は前進差分を用いて  $dx(t)/dt \approx \{x(t+\Delta t) - x(t)\}/\Delta t$  と近似することができる。更に、 $t = k\Delta t$  ( $k=0,1,2,\dots$ )、 $L = l\Delta t$  ( $l$ は定数)とおくことにより、式(4)の連続時間系の状態方程式は式(5)のように変形できる。

$$x((k+1)\Delta t) = (1+a\Delta t)x(k\Delta t) + b\Delta t u((k-l)\Delta t) \quad (5)$$

従って、むだ時間+一次遅れ系のモデルの離散時間系の状態方程式は、式(6)のように差分方程式の形で表現される。

$$x(k+1) = px(k) + qu(k-l) \quad (6)$$

ここで、 $p = 1 + a\Delta t = 1 - \frac{\Delta t}{T}$ 、 $q = b\Delta t = \frac{K\Delta t}{T}$

現在の離散時刻が  $k$  時点であるとした場合に、むだ時間後の  $k+l$  時点の制御量  $x(k+l)$  は、現時点での制御量  $x(k)$  と  $l$  時点前から1時点前までの操作量 ( $u(k-l)$  から  $u(k-1)$  まで) が既知であることより、制御量を式(6)を用いて式(7)に示すように

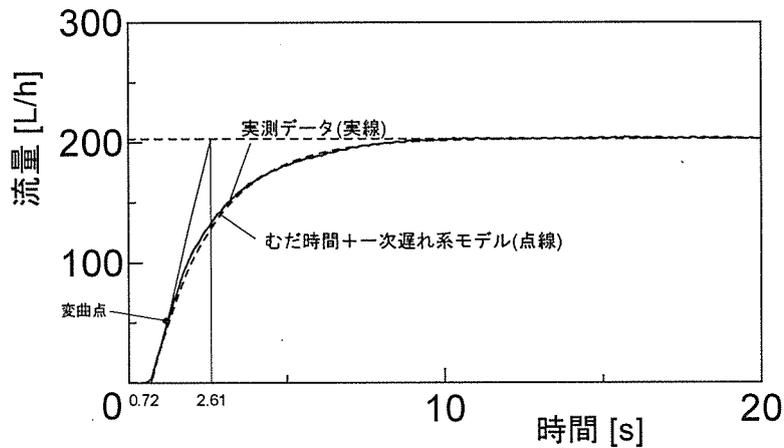


図5 むだ時間+一次遅れ系による制御対象のモデリング

$k+1$ 時点から  $k+l$  時点まで逐次に計算することで求められる。

$$\begin{aligned}
 k+1 \text{ 時点} : & x(k+1) = px(k) + qu(k-l), \\
 k+2 \text{ 時点} : & x(k+2) = px(k+1) + qu(k+1-l), \\
 & \vdots \\
 k+l \text{ 時点} : & x(k+l) = px(k+l-1) + qu(k-1) \quad (7)
 \end{aligned}$$

その結果、最終的に求められたむだ時間後の制御量  $x(k+l)$  を用いて、(この場合フィードバック制御の PI 制御により) 現時点に出力すべき操作量  $u(k)$  を決定することにより、制御対象のモデル装置に存在するむだ時間を補償した制御を実行することができる。

#### 4.2 モデル予測による低流量域における制御性能の改善

流量が低流量域の200 [L/h] 近辺で整定しているステップ応答の例を図5に示すが、このステップ応

答を基にして制御対象のモデル装置をむだ時間+一次遅れ系によりモデリングする。図5の実測データの曲線において最も勾配が急な所(すなわち曲線の変曲点)で接線をひき、接線が横軸の時間軸と交わる点の時刻をむだ時間  $L$  とし、ステップ応答が最終的に整定する値を通る横線と交わる点の時刻からむだ時間  $L$  を差し引いた時間を一次遅れの時定数  $T$  とする。また、システムゲイン  $K$  はステップ応答が最終的に整定する値をステップ入力の操作量で割り算した値として求められる。この場合のモデルパラメータは、むだ時間  $L=0.72$  [s]、一次遅れの時定数  $T=1.89$  [s]、システムゲイン  $K=11.89$  となる。

このモデルパラメータを用いてむだ時間後の制御量である流量を予測し、その流量の値と目標値との偏差を PI 制御器への入力として制御演算を行い、操作量である空気式調節弁の弁開度を決定すること

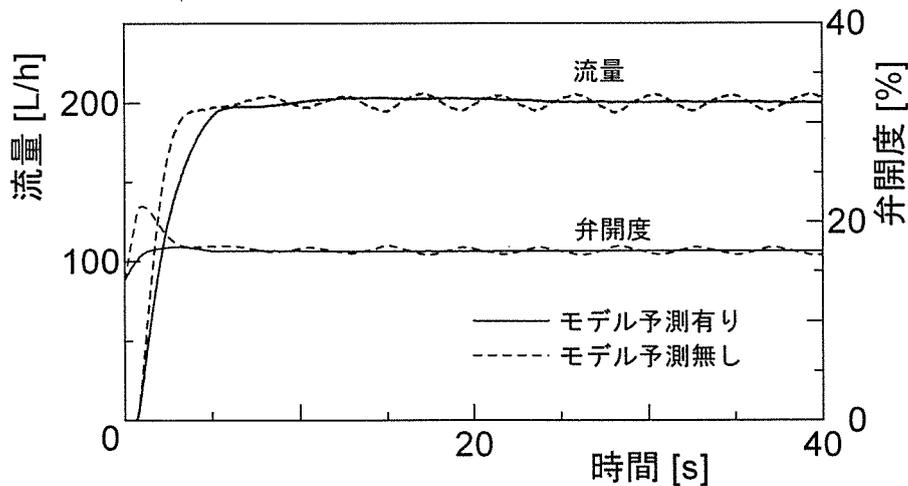


図6 低流量域における両制御性能の比較(目標値200 [L/h]の場合)

により、制御対象のむだ時間の補償を行って低流量域における制御性能の改善を図る。

図6は、流量の目標値を低流量域の200[L/h]とした場合に、モデル予測を用いたPI制御の場合とモデル予測無しの従来のPI制御の場合との、両制御性能の比較を行った結果を示したものである。ここで、モデル予測を用いたPI制御の場合においても、従来のPI制御の場合においてオーバーシュート無しで目標値へできるだけ早く整定するように調整した制御パラメータを用いている。図6に示した低流量域における両制御性能の比較結果から、モデル予測を適用したPI制御の場合がモデル予測無しのPI制御の場合と比較して、目標値付近での制御応答の振動が大幅に低減される結果となっており、モデル予測による制御対象のむだ時間補償の効果が実証された。

## 5. おわりに

本研究では、一般産業機器分野で実際によく使用される流量制御システムを想定したモデル装置を制御対象として、制御パラメータの調整が比較的容易でフィードバック制御の代表的なPI制御による流量制御を行った結果、フィードフォワード制御において生じた目標値における定常偏差は改善され、流量の目標値が中流量域から高流量域においてまずまずの制御性能を得ることができた。しかしながら、

制御対象であるモデル装置に存在するむだ時間の及ぼす影響のため、低流量域において目標値付近で制御応答に振動が発生したので、知的制御技術のモデル予測により制御対象のむだ時間を補償したところ、目標値付近における制御応答の振動を大幅に低減することができた。

なお、本研究を進めるにあたり以下に示すような文献を参考とした。

## 参考文献

- 1) 宮崎誠一，プロセス計装におけるデジタル制御系の設計と改善，工業技術社，1989.
- 2) 宮崎誠一，宮崎仁，パソコンで学ぶ自動制御の応用学，CQ出版社，1992.
- 3) 自動制御基礎（プロセス制御），(株)昭和電業社，1996.
- 4) 雨宮好文，高木章二，デジタル制御入門(改訂2版)，オーム社，1999.
- 5) システム制御情報学会編，PID制御，朝倉書店，1992.
- 6) 山本重彦，加藤尚武，PID制御の基礎と応用，朝倉書店，1997.
- 7) 大坪昭文，林健一郎，白仁田和彦，佐賀県工業技術センター研究報告書，No.10，pp.87-90，2001.