

## 第7章 モデル駆動PID制御 —その特徴と応用例—

モデル駆動PID制御についての解説

執筆者

行友 雅徳

(株)東芝 電力・産業システム技術開発センター

重政 隆

東芝ITコントロール(株)

## 7.1. はじめに

PID 制御<sup>[1]</sup>は産業界の基本制御技術として広く使われている。プロセス制御分野では、90年代にプラントの高収率・高効率運転を実現するためにモデル予測制御が導入され、より効率の良い運転管理を推進しつつ、同時に下位ループであるPID制御ループの性能底上げの必要性が高まった。すなわちモデル予測制御による最適な操作量(MV)を下位の制御ループの目標値(SV)とするので、下位の制御ループの Auto 化や制御性能の向上化が課題となった。また分散した計器室の統合による運転監視制御の省力化・効率化、省エネルギー・高効率化、環境対応を一段と推進するには、下位の PID 制御ループの見直し・底上げも必要である。

世界のプロセス制御ループ数全体の1/3程度が良好で満足できるが、手動のまま使われているのが1/3、制御性能が poor あるいは Fair と評価されているのが残りの1/3という報告<sup>[2]</sup>もある。PID 制御が苦手の制御対象も実はある。具体的にはむだ時間系、積分系、不安定系、ゼロ点系などである。この2/3の制御対象のなかには、この PID 制御が苦手なケースが含まれているように思われる。このような問題点を解決するためにこれまで I-PD 制御や 2 自由度 PID 制御などのアドバンス PID 制御が提案されてきた<sup>[1]</sup>。これらアドバンス PID 制御でも、むだ時間が長いプロセスに対しては十分な制御性能が得られなかった。

近年”モデル駆動制御”という概念が東京大学木村教授より提案された<sup>[5]</sup>。この概念は、“a control system architecture which uses a model of the plant as a principal component of controller”と定義され、制御構造を理解しやすい、調整が容易、高いロバスト性を持つといった利点がある。Dr.Shinsky が提案する PID  $\tau d$  制御<sup>[3]</sup>や Prof.Morari 等の IMC(Internal Model Control)<sup>[6]</sup>などはこのモデル駆動制御の概念に属すると考えられる。しかし、これら PID  $\tau d$  制御や IMC は、不安定プロセスに対して使いにくく制御性能が得られないという課題がある。

そこで、モデル駆動制御の概念に沿い、PID 制御に比べ適用範囲が広く、しかも2自由度制御機能まで付加したモデル駆動 PID 制御システムを提案してきた<sup>[7]~[11]</sup>。実フィールドでの実績もでてきたので、ここではモデル駆動 PID 制御の構造、特徴などをレビューし、実システムでの適用結果を紹介する。

## 7.2. モデル駆動 PID 制御システムの構造

モデル駆動 PID 制御システムのブロック図を Fig.1 に示す。ここで、 $r, u, y, d$  は各々目標値、操作量、制御量、外乱信号を表し、 $P(s)$ が制御対象を表している。次の3点が構造上の特徴である。

- 1) 主制御器(Fig.1 内の Main Controller)が用いるモデルとして、制御対象(Process)の特性によらず、むだ時間を持つ 1 次遅れを用いたモデル駆動制御構造とした。
- 2) 主制御器内部に2次の進み遅れから構成される Q Filter を備えている。この Q Filter は現場調整要素の役割を果たしており、パラメータ  $\lambda$  は目標値からの応答速度を調節でき、更にパラメータ  $\alpha$  は目標値からの応答速度を変えることなく外乱に対する抑制性を調整できる。

主制御器の Q Filter と Model からなる正帰還ループ内に積分器が形成されるので、内部モデル原理に

よりステップ外乱やステップ目標値に対してオフセットは発生しない。

3) 制御対象  $P(s)$  に対して比例と微分から構成されるローカルフィードバック(PD Feedback)を用意している。この制御対象  $P(s)$  と PD Feedback 全体を“見かけの制御対象”とし、これを  $G(s)$  とすると、これが主制御器である Main Controller の制御対象となる。

4) Set Point Filter を用意し、目標値  $r$  から制御量  $y$  までの特性がむだ時間を有する1次遅れ系の応答を持たせることができるようになっている。

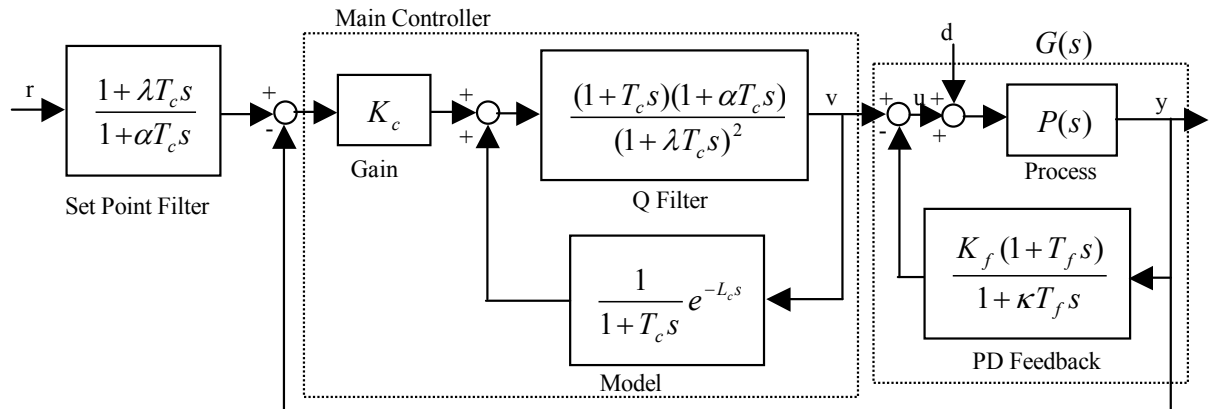


Fig.1 Model Driven Two Degrees of Freedom PID Control System

### 7.3. 設計方法

PD Feedback を設計し、“見かけの制御対象”  $G(s)$  のゲイン  $K$ 、時定数  $T$ 、むだ時間  $L$  を求めるところまでが重要で、後はモデル駆動制御の利点である、再設計計算することなくパラメータ  $\lambda$  と  $\alpha$  を調節するだけで応答特性を変えられる。

#### Step1: PD Feedback 設計

PD Feedback の役割は、制御対象  $P(s)$  と PD Feedback 全体からなる“見かけの制御対象”  $G(s)$  の特性がむだ時間を持つ1次遅れ特性と近似できるように変換することである。例えば、制御対象が積分特性、振動特性、不安定特性などの場合でも PD Feedback ゲインを適切に定めることにより  $G(s)$  の特性を1次遅れ特性とすることができる。以上より、PD Feedback を含めた“見かけの制御対象”の特性が(1)式のようなゲイン  $K$ 、時定数  $T$ 、むだ時間  $L$  のむだ時間を持つ1次遅れ特性で近似できるように PD Feedback を設計することである。

$$G(s) = (1 + P(s)F(s))^{-1} P(s) \cong \frac{K}{1 + Ts} e^{-Ls} \quad (1)$$

$$F(s) = \frac{K_f(1 + T_f s)}{1 + \kappa T_f s} \quad (2)$$

制御対象  $P(s)$  の伝達関数や状態方程式が求められているならば、いろいろな PD Feedback 設計が可能である。例えば  $v$  から  $y$  の  $K_f$  や  $T_f$  を変えて得られたステップ応答から直接決定する方法や、 $G(s)$  の周波数領域での低次元化により求める方法もある。文献<sup>[7]</sup>では、北森の部分的モデルマッチング法<sup>[4]</sup>を利用した設計方法を紹介している。後者の方法では、 $v$  から  $y$  までの特性がオーバーシュートを持たない規範モデルに一致するように PD Feedback ゲインを決定するものである。この他、極配置や周波数応答に基づく方法なども設計可能である。

一例として、むだ時間がある積分系なる制御対象  $P(s)$  に対し、PD feedback ゲイン  $K_f$  を 0.25 で用いた場合の、“見かけの制御対象”  $G(s)$  と、さらに低周波特性が同じ特性になるように周波数領域での低次元化法で求めたむだ時間を持つ 1 次遅れモデル  $\hat{G}(s)$  のステップ応答を Fig2 に示す、簡単な方法であるが十分使えると判断している。

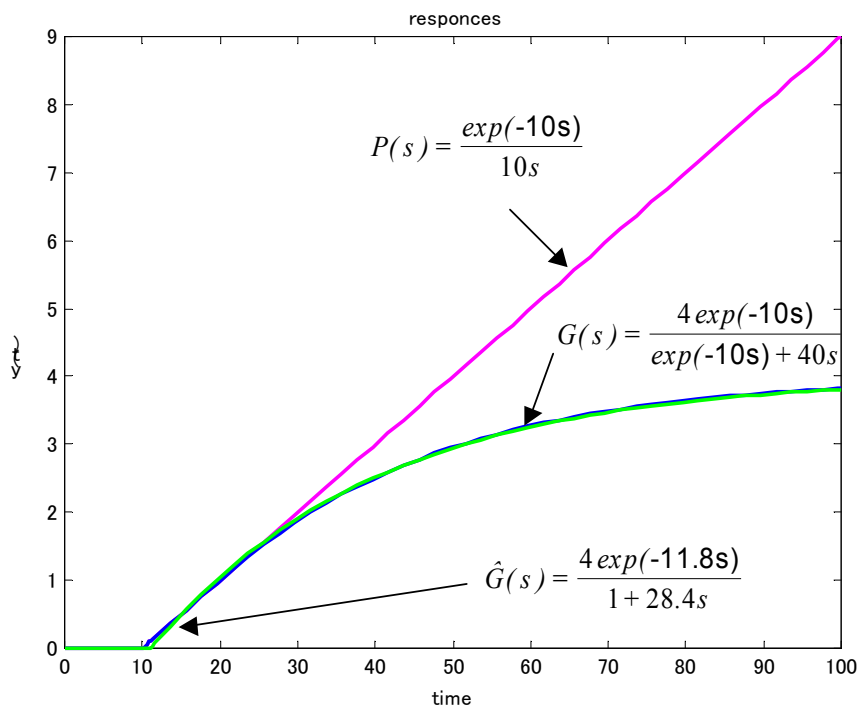


Fig.2 Step response curves of a PD feedback loop

#### Step2: Main Controller 設計

$v$  から  $y$  の特性がむだ時間を持つ 1 次遅れ特性に近似できるなら、IMC の設計則から、主制御器の制御パラメータは下記のように決定される。

$$K_c = 1/K, \quad T_c = T, \quad L_c = L \quad (3)$$

### Step3: 調整パラメータ設計

このように制御系が構成されたなら、 $y$ の応答は目標値 $r$ と外乱 $d$ からは(4)式のように表せる。

$$y = \frac{e^{-L_c s}}{1 + \lambda T_c s} r + \frac{e^{-L_c s}}{K_c (1 + T_c s)} \left( 1 - \frac{(1 + \alpha T_c s) e^{-L_c s}}{(1 + \lambda T_c)^2} \right) d \quad (4)$$

この式から、目標値応答はパラメータ $\lambda$ により調整でき、 $\lambda$ の調整だけでは外乱抑制特性が不十分な場合、パラメータ $\alpha$ により外乱応答を調整できることが分かる。

$$G(s) = \frac{1}{1 + 5s} e^{-10s} \quad (5)$$

(5)式で表される制御対象  $G(s)$  に対して、パラメータ $\alpha$ を1とし、 $\lambda$ を0.5(一点鎖線)、1(実線)、1.5(破線)とした3ケースのシミュレーションを行なった。

Fig.3 は、時刻10で目標値が0から1へステップ状に変化し、時刻100で振幅0.75のステップ外乱が操作量側に印加された場合である。 $\lambda=1$ を基本とすると、 $\lambda < 1$ とすることで、速応性が向上し、 $\lambda > 1$ とすると応答が緩慢になっている。

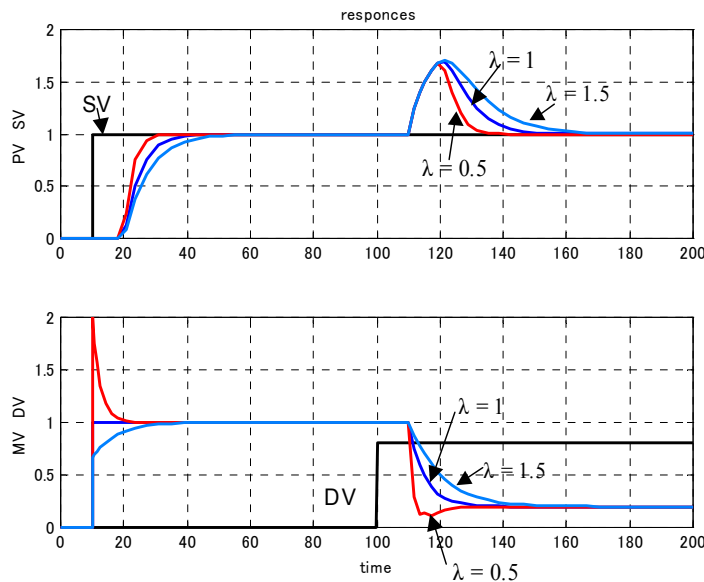
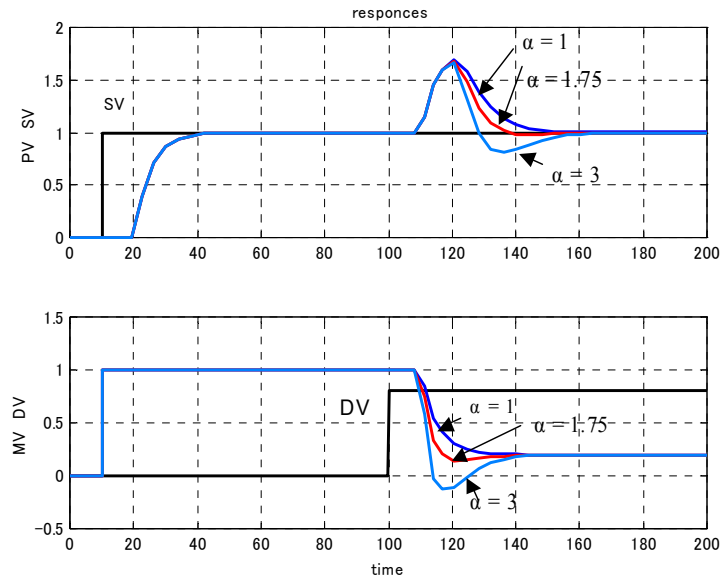


Fig.3 Responses of MD PID Control system with different  $\lambda$

$\lambda=1$ で $\alpha=1$ と $\alpha=1.75$ とした場合のシミュレーション結果をFig.4に示す。実線が $\alpha=1.75$ の場合、破線が $\alpha=1$ の1自由度の場合である。目標値応答は変化させずに、外乱応答の改善されていることが分かる。

Fig.4 Responses of MD PID Control system with different  $\alpha$ 

## 7.4. 特徴

### 7.4.1. 汎用化・適用範囲の拡大

IMC では、安定な制御対象の特性が分かればコントローラ構造が決まるが、汎用コントローラを実現するには複雑になるので、モデル駆動 PID コントローラでは、制御対象の異なる性質は PD Feedback による“見かけの制御対象”の特性すなわち、むだ時間を持つ 1 次遅れ特性とし、Main Controller には、モデル駆動制御の概念に沿ったむだ時間を有する 1 次遅れ特性を共通のモデルとして用意し、その Main Controller には、ゲイン  $K$ 、時定数  $T$  とむだ時間  $L$  を設定するだけで済むので、設計ノウハウは汎用化していると言えよう。従って、従来の PID 制御が苦手としていた、むだ時間系、不安定系から、得意としていた単なる遅れ系も扱えるので適用範囲は広がったと言えよう。

### 7.4.2. 分かりやすい調整方針

再設計することなく、Fig.3 と Fig.4 のようにパラメータ  $\lambda$  と  $\alpha$  を調節するだけで応答特性を変えられる容易性を持っている。その前に制御対象の動特性パラメータが必要になるが、制御性能に問題がある場合には原因追求を行うので、ある意味でモデルを意識せざるを得ない。一般には、制御対象の開ループでのステップ応答やインパルス応答からのグラフィカルな方法により、むだ時間を有する 1 次遅れ系や積分系を求めることができる。 $\lambda = \alpha = 1$  の場合は、モデル駆動 PID 制御系の目標値のステップ応答は、“見かけの制御対象”  $G(s)$  のステップ応答と一致するので、これからも動特性の確認ができる。

### 7.4.3. PID 制御の上位互換性

制御パラメータを工夫するだけでモデル駆動 PID 制御から、従来 PID 制御、PI-PD 制御、PID  $\tau d$  制御

や IMC 制御などを Fig.5 のように実現できる使いやすさも実現した。

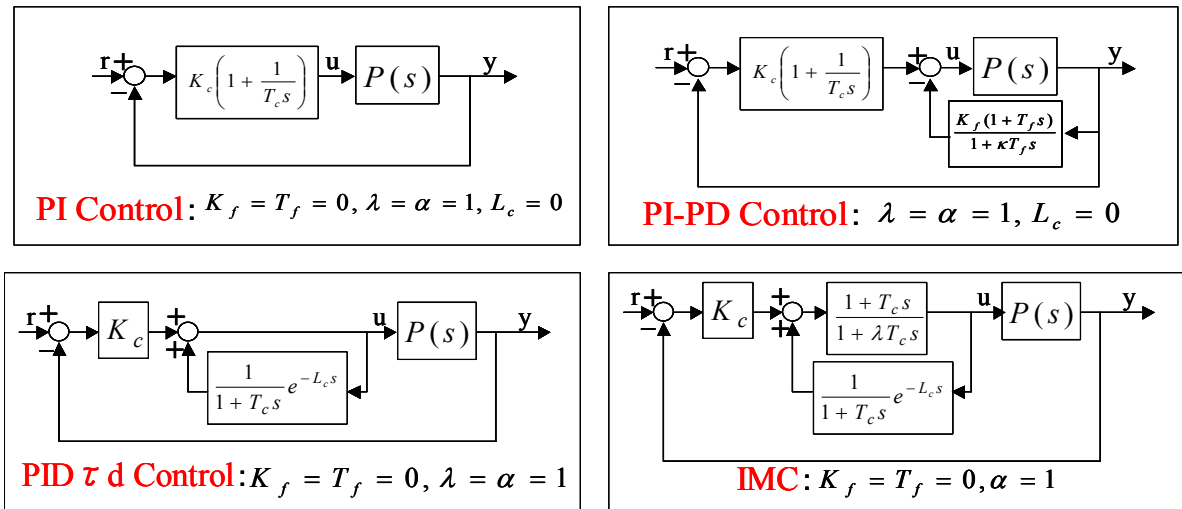


Fig.5 Various conventional PID control systems

#### 7.4.4. 安定性とロバスト性

PD feedback によりローカルループの安定化が図られれば、基本構造は IMC であるので、制御系の安定性とロバスト性の一般論は説明されている<sup>[5]</sup>。むだ時間を持つ1次遅れ系について、最も基本的な  $\alpha = \lambda = 1$  で調べた安定余裕を Fig.6 に示す。

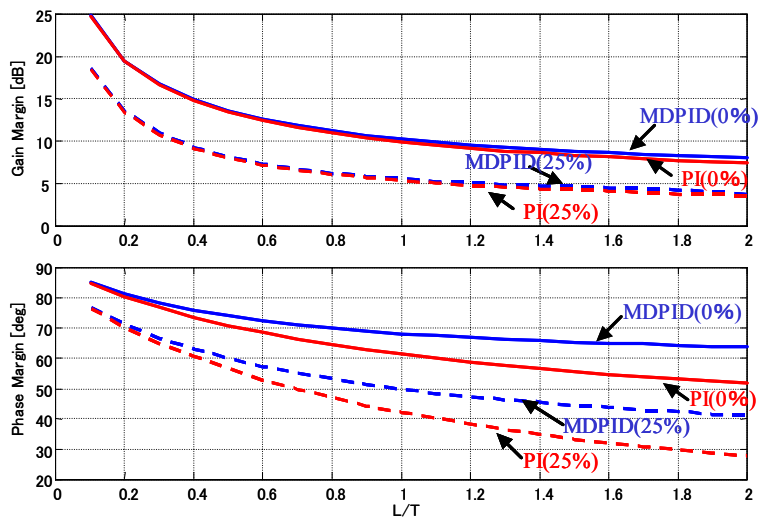


Fig.6 Stability margins for MD-PID control and PID control

横軸は制御対象のむだ時間と時定数の比 ( $L/T$ ) で、縦軸はゲイン余裕と位相余裕である。モデル駆動 PID コントローラは、 $L/T$  の大きな領域でもノミナル値でも25%のモデル誤差があった場合でも PID に比べ安定余裕は大きいことが分かる。また制御系としての応答をむだ時間のある1次遅れ系になるように設

計すると、ゲイン余裕と位相余裕は一定でなく制御対象に応じて変化していることも分かる。

## 7.5. 実適用例

DCS モジュールやループコントローラを用いた2つの適用例を紹介する。

### 7.5.1. 沈殿池レベル制御

紙の製造工場では大量の水を使う。この例では、川の取水口から水を可変速ポンプで汲み上げ約600 m離れた沈殿池に送り、工場内のいろいろな工程に供給されているが、その需要に応じて変る沈殿池のレベルに応じ可変速ポンプで PI 制御されていた。この制御対象は、むだ時間と 1 次遅れと積分モードのある系であり、従来 PI 制御ではレベルの持続的長周期動揺が発生し、一挙に需要があると追いつけない状況もあった。モデル駆動 PID 制御を適用した結果、Fig.7 のように従来の PID 制御と比較し、レベル変動幅を約1/3に安定化でき、目標値(SV)を下げて省エネ運転も達成できた。

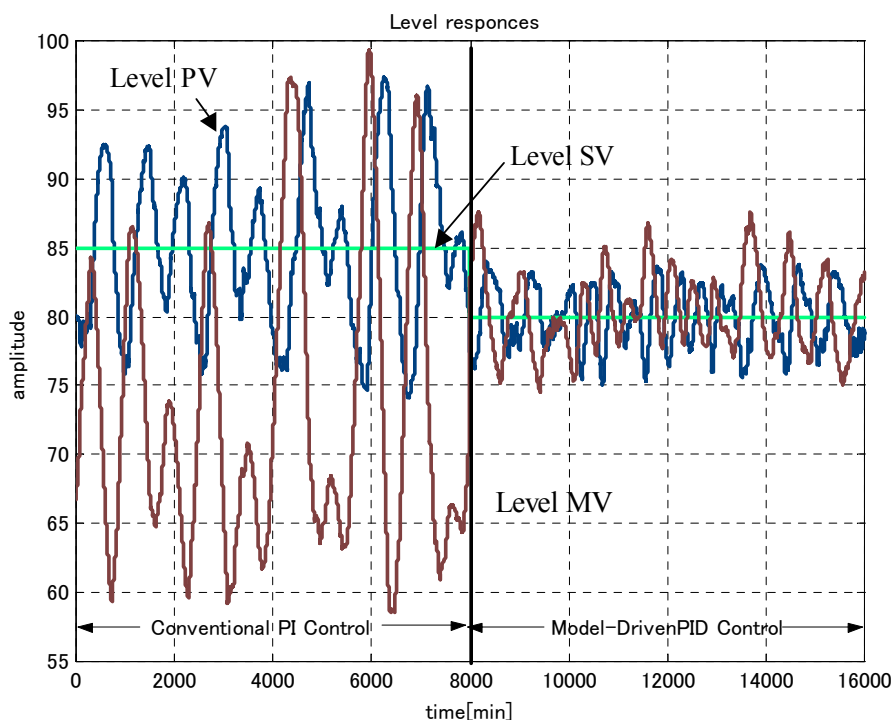


Fig.7 Comparison of level controls using Model-Driven PID Control and PI control

### 7.5.2. 反応器温度制御

化学プロセスの代表は蒸留塔や反応器であり、長いむだ時間と長い時定数がつきものである。むだ時間が長かったために、オペレータによる手動運転で対応せざるを得なかったところにモデル駆動 PID 制



御を適用した。これにより Auto モードで運転管理できるようになったばかりでなく、制御量

(PV)のばらつきを抑制し、更に生産量変更時の安定化を達成でき、省力化と製品品質の安定化に寄与することができた。

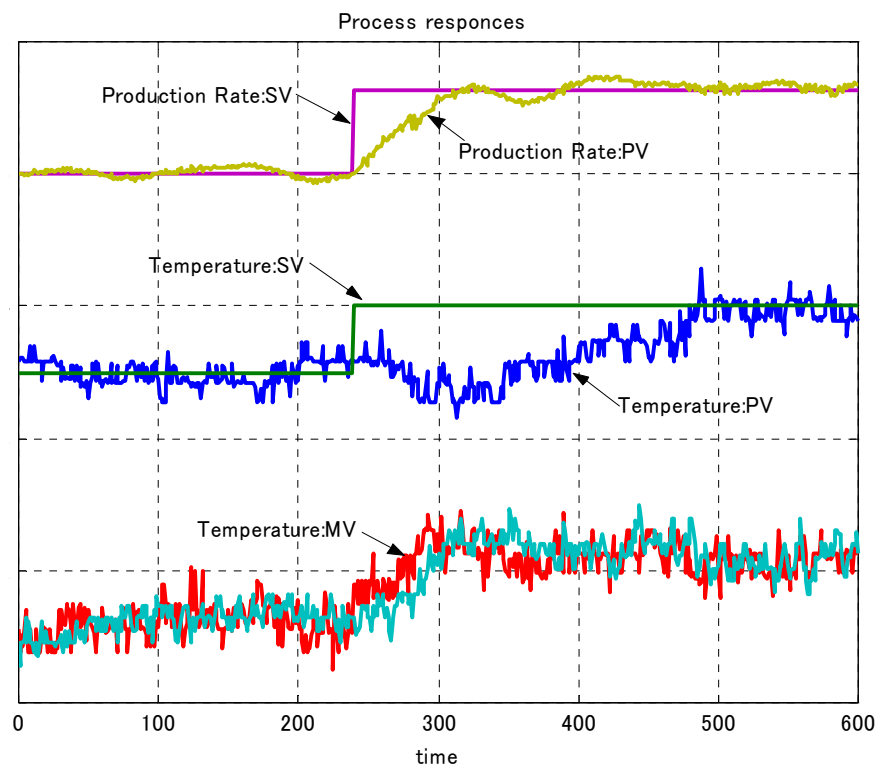


Fig.8 Distillation column temperature control using MD PID Control

#### 7.6. まとめ

PID 制御は産業界の基本制御技術として広く使われているが、実際には苦手な制御対象もある。特にむだ時間の長い制御対象や積分系を含む不安定な制御対象がそれである。これらの制御対象にも適用できる汎用PID制御器として、更に従来型PID制御にも戻れる柔軟性を備えたモデル駆動PID制御器の構造・特徴をレビューし実適用例を紹介した。

#### 参考文献

- [1]須田信英:PID 制御,朝倉書店(1992)
- [2] Desborough L. ,Randy Miller: Increasing Customer Value of Industrial Control Performance Monitoring, Preprints of Chemical Process control-6, 153/186 (2001)
- [3]F.G.Shinsky:PID-dead time control of distributed process, IFAC PID2000 Workshop, 14/18(2000)
- [4]北森俊行:制御対象の部分的知識に基づく制御系の設計法、計則自動制御学会論文集、

Vol15, No.4, 549/555(1979)

[5] Kimura Hidenori: Is the Model a Good Controller ?, 39th IEEE Conference on Decision and Control, (2000)

[6] Morari M. and E. Zafrou: Robust Process Control, Prentice Hall (1989)

[7] Shigemasa T., M. Yukioto, R. Kuwata, T. Hattori and Y. Baba: A Model-Driven PID Controller, Proceedings of INTERMAC 2001, (2001)

[8] 行友, 重政: モデル駆動 PID 制御システムとその安定性, 第2回制御部門大会予稿集, (2002)

[9] Shigemasa T., M. Yukioto, R. Kuwata: A Model-Driven PID Control System and its Case Studies, Proceedings of IEEE CCA and CACSD, Glasgow, (2002)

[10] 行友, 重政, 馬場: モデル駆動 PID 制御システムとそのチューニング方法, 第3回制御部門大会予稿集, (2003)

[11] Baba, Y, T. Shigemasa, M. Yukioto, F. Kojima, M. Takahashi, E. Sasamura : Model-Driven PID Control System in Single-Loop Controller, Proceedings of SICE Annual Conference in Fukui, August 4-6, 2003

[12] Iino Y, Shigemasa T: Practical Modelling and Control System Design Methods for CAE system, Proceedings of ACC, (1989)