

# モデル駆動PID制御

## Model-Driven PID Control

馬場 泰 重政 隆 小島 文夫

BABA Yasushi

SHIGEMASA Takashi

KOJIMA Fumio

プロセス制御などで使用されるPID(比例・積分・微分)制御には、むだ時間が長い系では良い制御性が得られないという難点がある。制御対象の特性は多様であり、これらに対応するにはPID制御でなくモデル予測制御などが必要だった。

モデル駆動PIDは、単純なモデルと独自のPD(比例・微分)フィードバック機構により適用範囲を広げ、特にむだ時間が長い系で威力を発揮する新しい制御方式である。既に東芝製制御システムに実装して客先プラントに適用し、制御性を大きく改善して好評を得た実績がある。今後、統合コントローラでのソフトウェアパッケージ化を予定している。プロセス制御以外の分野でも適用可能なので、広範囲な活用を期待する。

Although proportional integral differential (PID) control is widely used, it cannot achieve good control results when applied to systems with long dead times. Because PID is not always the best method, Toshiba has been investigating more sophisticated and specially designed control technologies such as model predictive control.

Model-driven PID (MD-PID) consists of proportional differential (PD) local feedback and a simple control model. It has a wide range of capabilities, and is especially suitable for systems with long dead times. We have applied it to customers' systems and have obtained very encouraging results. MD-PID is not only applicable to process control but to any control target. It is therefore expected to be used in a broad variety of fields.

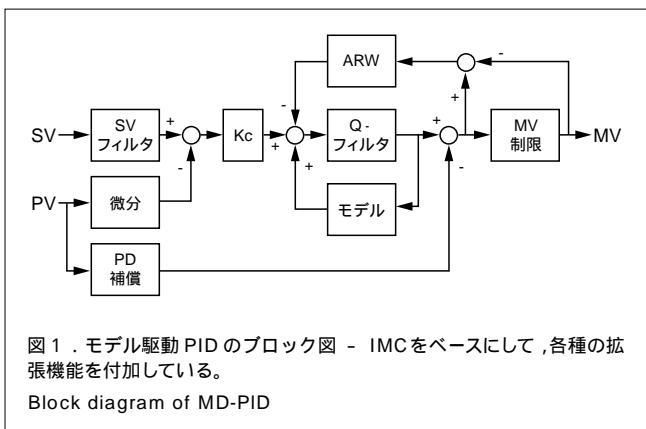
## 1 まえがき

PID制御はモデルを実装していないので、どんな対象でも適用して制御できるという特長があり、世界中で使われている。しかし一方では、PIDのパラメータが適切にチューニングされていない例もあり、制御性をもっと改善できるはずのところも多い。更に、適切なチューニングを行っても、なおよまく制御できない例として、むだ時間の長い系などがある。難しい対象を制御するためには、モデル予測制御が知られているが、設計が困難、ロバスト性に欠けるなど、適用が限られている。

東芝が開発したモデル駆動PIDは、むだ時間の長い系でも良好な制御が可能で、モデル予測制御よりも単純で、PIDよりも設計が容易であるという特長がある。既に実際のプラントで制御性を改善した実績があり、更に適用範囲を拡大しているところである。

## 2 システムの構成

モデル駆動PIDは、いわゆるIMC(内部モデルコントローラ)として知られている構造を基本形とし、これにローカルフィードバックをはじめとする各種の機能改善を追加した構造をしている。制御構造のブロック図を図1に示す。



### 2.1 IMC

IMCはモデル駆動制御の一形態で、制御対象の特性を持つモデルを内蔵して、実際の制御対象の応答との偏差を修正するように出力を更新していくものである。しかし、制御対象が変わるごとにモデルを設計しなければならない。

そこで、このモデルの構造を“むだ時間+一次遅れ”の形式に固定した。これは、プロセス制御の対象の多くがこの特性を持つこと、そして、これ以外の特性の対象に対しても後述するPD補償を使えば、むだ時間+一次遅れとして近似できるからである。

このように、内部モデルを単純な形に固定できるので、対

象ごとにモデルを設計しなおす必要がなくなり、コントローラへの実装が簡単になった。

## 2.2 PD 補償器

制御対象に対して比例と微分をフィードバックするPD補償器を実装した。このPD補償器を適切に設計すると、“制御対象 + PD補償器”という見かけの特性を、むだ時間 + 一次遅れに変換できる。つまり、制御対象の特性にかかわらず、前記内部モデルが有効に働くように変換できることになる。

このようにして、モデル駆動PIDは広範囲の制御対象に適用できる特長が得られた。

## 2.3 Q - フィルタ

制御応答を早くするためには、制御ゲインを上げることが一つの方法である。しかし従来のPIDでは、比例、積分、微分の3パラメータを独立に設定することができず、変更時には試行錯誤が必要だった。

モデル駆動PIDでは、偏差情報部分に位相補償器(Q - フィルタ)を導入し、このパラメータだけを独立して設定することで応答性を変化させることができる。つまり、他の制御パラメータを確定させた後、Q - フィルタだけの調整で、より早い応答から変化の少ないゆっくりした応答までを連続的に選択できる。

## 2.4 二自由度化

PIDでは、目標値(SV)変化に対する最適パラメータと、外乱抑制のための最適パラメータは両立しない。これを改善する技術として二自由度化がある。

モデル駆動PIDでは制御ゲインをプロセスゲインの逆数に設定するので、ゲインが高くとれて外乱抑制性も高い。それでも、SV変化時の応答とのバランスを調整する手段として、SVフィルタの形で二自由度化を実現した。

## 2.5 その他

PID制御にもある機能として、出力の制限、アンチリセットウィンドアップ(ARW: Anti Reset Windup)、微分の導入がある。

操作出力(MV)に対して、上限、下限、変化率制限を加える。このとき、いわゆるリセットウィンドアップが発生するので、これを抑えるためにARW機能を導入する。ARWには各種の方法があるが、ここではクランプされた量をフィードバックしてキャンセルする方法を選択した。フィードバックゲインを使用することにより、ウィンドアップのレベルをある程度変化させることもできる。

モデル駆動PIDでむだ時間をゼロにするとPK(比例・積分)制御と同等になる。これを測定値微分先行型のPIDと同等にできるように、プロセス変数(PV)値の微分項を追加した。これを生かすことにより、従来型の微分先行PIDを使っている状態から、モデル駆動PIDへ連続的に移行することができるようになる。

## 3 特長

### 3.1 パラメータ設定

モデル駆動PIDの制御パラメータは次のものがある。

Kc : 制御ゲイン

L : むだ時間

Ti : 遅れ時間

Kf : PD補償器ゲイン

Tf : PD補償器微分時間

: Q - フィルタ係数

: 二自由度化SVフィルタ係数

Td : PV微分時間

モデル駆動PIDをチューニングするには、前記各パラメータの値を設定する必要がある。実際の設計手順では、とを1に固定し、微分時間ゼロにするなど単純化もできる。

### 3.2 適用対象範囲

適用できる制御対象の例を、PIDの場合と比較して示す。

(1) むだ時間 + 一次遅れ 一般の制御系である。従来のPIDの設計でも典型的な制御対象のモデルとして使用されている。

モデル駆動PIDでは、そのむだ時間、遅れ時間などの特性値をほぼそのままパラメータとして使用できる。

(2) むだ時間 + 二次遅れ 実際のプラントで、むしろ一次遅れよりも実例が多いとも言われている。PIDでも適切なパラメータ設定で良好な制御が可能である。

二次遅れを一次遅れで近似するか、又はPD補償器で応答特性を改善することで対応できる。

(3) 積分系 PIDでも適切なパラメータを設定することにより制御が可能である。しかし、実際には試行錯誤となり改善の余地が残る場合がある。また、よく知られた各種の調整則を使ったパラメータ値でのシミュレーションで良い応答が確認できるが、比例ゲインが大きくなって実際には採用されないような値になることもある。

むだ時間、遅れ時間の有無にかかわらず、PD補償器によってむだ時間 + 一次遅れという安定系に近似できる。この結果、制御パラメータも単純化して設定できる。

(4) その他の系 高次遅れ、逆応答系、振動系など、PIDでは事実上制御をあきらめていた制御対象がある。

いずれもPD補償器を適切に設計することにより安定系に近似できる場合が多い。なお、こうした特殊な特性を示す制御対象については、個別に調査、同定のうえシミュレーションが必要となる。

## 4 実証試験

統合コントローラやそのほかの産業用コントローラに実装

して、いくつかのプラントで実証試験が完了した。また一部客先では実運転中である。

#### 4.1 圧力制御

圧力、流量制御のためのテストプラントで、統合コントローラ L1 に実装して圧力制御に適用した。

PID と応答性を比較し、誤差面積と収束時間を指標にして 30 % 程度の改善が見られた。200 ms 周期でも十分実行が可能であることが確認できた。PID とモデル駆動 PID の応答波形をそれぞれ図 2、図 3 に示す。

図 2 のように、PID 制御ではむだ時間の長さに対応できないので、相対的に制御ゲインを高くとれないようになっている。この結果、外乱抑制特性、目標値応答ともにゆっくりした特性を示している。

一方、図 3 のように、モデル駆動 PID ではむだ時間に対応しているので、相対的にゲインが高くなったことに相当し、外乱抑制の特性も改善されている。

#### 4.2 レベル制御 1

CIEMAC<sup>TM</sup> のコントローラである PCS (Process Control Station) に実装して、水位レベル制御に適用した。

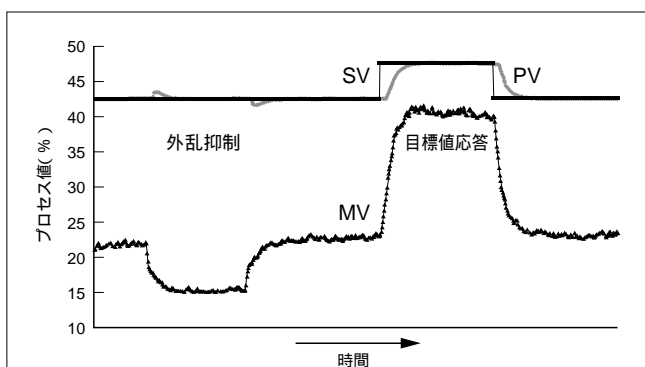


図 2 . 圧力制御 PID の応答波形 - 従来の PID で圧力制御した例である。応答が遅くなっている。

Response of PID control

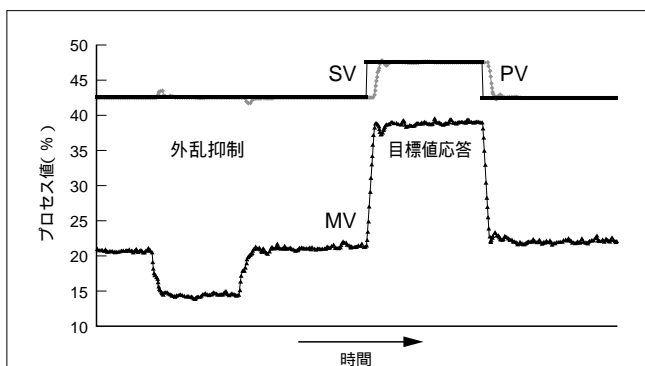


図 3 . 圧力制御モデル駆動 PID の応答波形 - モデル駆動 PID で圧力制御した例である。応答が改善されている。

Response of MD-PID control

むだ時間が長い対象で、PID ではハンチングが発生していたが、モデル駆動 PID では安定化ができています。

典型的な積分系なので、PD 補償器を使ってむだ時間 + 一次遅れ系に変換して対応した。PD 補償器の設計にあたり、事前に制御対象の物理的、理論的な構造と特性を解析した。

水位レベルが安定化できて目標値を選択できるようになったので、これまでのアラーム発生が激減するなど、オペレーターの負荷から見ても大きな効果が得られた。

適用前後の制御波形を図 4、図 5 に示す。

#### 4.3 レベル制御 2

統合コントローラ L1 に実装し、既設のシステムである CIEMAC<sup>TM</sup> と組み合わせてレベル制御に適用した。この対象はむだ時間が長いことと同時に外乱の影響が大きく、従来は自動制御をあきらめて手動で制御していた。適用後は安定化に成功し、オペレーターの負荷が大幅に緩和されている。

#### 4.4 客先評価

オペレーター負荷の軽減など客先からは高く評価されている。この実績を元に、更に制御が困難とされている対象を特に指定して適用を検討依頼されている。

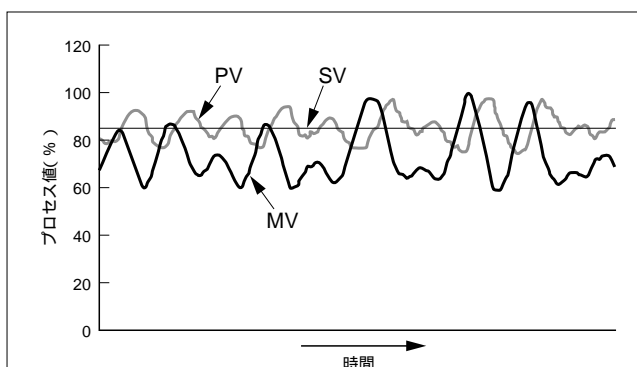


図 4 . レベル制御 PID の応答波形 - PID で制御していたレベル応答波形である。変動幅が大きい。

Response of PID level control

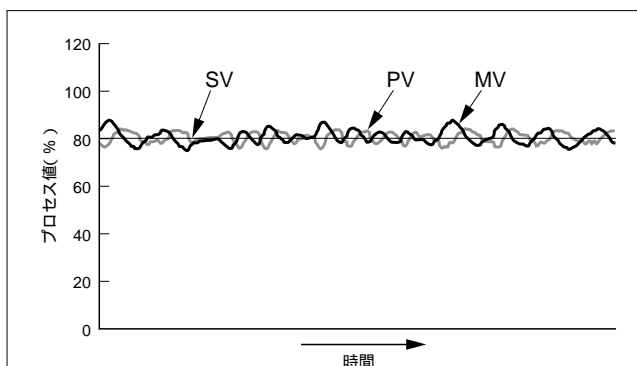


図 5 . レベル制御モデル駆動 PID の応答波形 - モデル駆動 PID で制御したレベル応答波形である。変動幅が小さく安定化されている。

Response of MD-PID level control

## 5 チューニングとシミュレーション

モデル駆動PIDを適用する手順について、PIDと比較しながらその考え方と効果を示す。なお、数式による設計手法ではなく、シミュレーションによる応答波形を見ながらパラメータを変更して確認していくようにしている。

制御対象は、むだ時間と遅れを持つ積分系を選んだ。設計そのものの考え方の違いが明らかになる対象である。

### 5.1 PID の設計

PIDパラメータを決める代表的な方法として、多くの経験則や設計手順が知られているが、特にグラフィカルに決定する方法はない。既知の設計則による値を初期値として、シミュレーションで応答性を見ながら試行錯誤で決定する。

PIDのチューニングでは、PID各パラメータを同時に変更していく必要があり、これが調整の難しさの要因の一つとなっている。

### 5.2 モデル駆動PID の設計

積分系のままでは発散するので、補償器を使って安定系に変換する。安定化した波形のオーバーシュートを小さくするように調整して補償器を決定する。補償器を適用した結果を図6に示す。

PD補償で安定化した対象を、むだ時間 + 一次遅れで近似して制御モデルのパラメータを決定する。

### 5.3 応答性評価

モデル駆動PIDでの制御結果を図7に示す。モデル駆動PID(破線)ではPID制御(実線)に比べてオーバーシュートを抑えられ、外乱抑制性も向上する。

PIDではチューニングが試行錯誤になり、終了させる判断が難しいのに対して、モデル駆動PIDではほぼ一意にパラメータが決まるという特長がある。

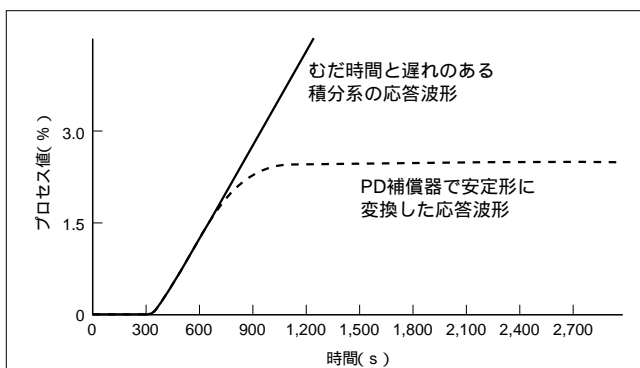


図6．むだ時間と遅れのある積分系の応答例 - むだ時間と遅れのある積分系の応答波形と、PD補償器で安定形に変換した後の応答波形である。積分系が時間とともに発散していく応答であるのに対して、安定形に変換した結果、時間とともに収束する特性に変わっている。

Response of integral system with dead time

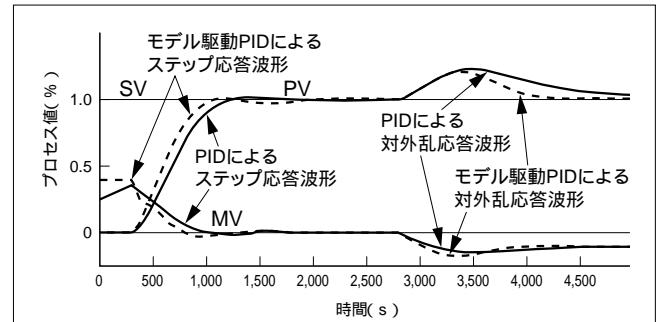


図7．PIDとモデル駆動PIDとの応答比較 - むだ時間と遅れのある積分系を、PIDとモデル駆動PIDとで制御したときの応答波形の比較である。PIDは試行錯誤で応答性を見ながらパラメータを決定した。モデル駆動PIDは、図6の安定形にしたうえで、むだ時間と遅れ時間を近似してモデルに設定することによって制御系を設計した。試行錯誤でなく、特性近似でよい応答性が得られている。

Responses of PID and MD-PID

## 6 あとがき

モデル駆動PIDの特長と適用の概要を述べた。

モデル駆動PIDはモデル駆動制御という新しい概念に基づくものであり、PIDよりはむしろモデル予測制御に近い。しかし、比例・積分・微分という特性を持ちうることで、測定値微分先行型PIDと等価にできることなどから、あえてPIDという名称とした。

プロセス制御分野だけでなく、むだ時間やその他の応答性に悩む制御対象に適用すれば大きな改善の可能性を持っているので、広く活用していただきたい。

## 文 献

- (1) Morari, M.; Zafirov, E. Robust Process Control. Prentice Hall, 1989.
- (2) Takashi Shigemasa, et al. A Model-Driven PID Controller. INTERMAC 2001, Joint Technical Conference, Tokyo, Japan CO-4( 1083 ).
- (3) 行友 隆,ほか. 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, 2002, p.371 - 374 .



馬場 泰 BABA Yasushi

電力・社会システム社 府中電力・社会システム工場 計測制御機器部主査。計測制御機器システムサポートに従事。計測自動制御学会会員。

Fuchu Operations - Social Infrastructure Systems



重政 隆 SHIGEMASA Takashi

東芝ITコントロールシステム(株) 東日本事業所チーフスペシャリスト。アドバンス制御技術の研究・実用化に従事。計測自動制御学会会員。

Toshiba IT & Control Systems Corp.



小島 文夫 KOJIMA Fumio

東芝ITコントロールシステム(株) プラントシステム事業部チーフスペシャリスト。産業システムのエンジニアリング業務に従事。計測自動制御学会会員。

Toshiba IT & Control Systems Corp.