

## 内部モデル制御によるPID補償器の設計法

### Design Method of PID Compensator by Internal Model Control

家城 篤史

Atsushi IEKI

熱式流量センサを用いたマスフローコントローラ(MFC)は、半導体産業におけるプロセスガスの流れを制御するために広く受け入れられている。新しい半導体製造技術は、スループットや歩留まりを向上させる為に、プロセスガスの高速な流量応答と応答再現性を向上する事がMFCに求められる。流量応答の高速化を実現し、かつMFCの製造時に一定の応答性を維持するために、MFCの制御系設計が重要となる。本稿では、内部モデル制御を用いた制御系の設計手法を提案し、実験結果にもとづき、提案手法の有用性を示す。

Mass Flow Controllers (MFC) using thermal flow sensors are widely accepted to control process gas flow in the semiconductor industry. New semiconductor fabrication techniques require faster response of process gas as well as improved response repeatability to reduce manufacturing costs and improve yield. In order to achieve fast response and maintain a constant performance of response among MFC products in a production, MFC controller design is critical. This paper proposes a control design method using Internal Model Control. Experimental results show the effectiveness of the proposed method.

### はじめに

半導体製造プロセスでは、プロセスガスの流体制御性能が半導体の品質を左右する重要な技術要素である。近年、半導体デバイスの微細化や製造時のスループットの向上のため、プロセスガスの高速な切り替えの要求がある。また、半導体製造装置の機差を小さくするために、装置間の流量応答の差を小さくする必要がある。マスフローコントローラ(Mass Flow Controller, 以下 MFC)に要求される流量制御性能として、流量の高速応答と整定時間の個体差を抑えることが重要な技術要素となっている。

流量制御を行うため、MFCの制御器はフィードバック制御の代表的な手法で、広く用いられているPID補償<sup>[1]</sup>を使用している。流量の高速応答と整定時間の個体差を抑えるために、比例ゲイン、積分ゲイン、微分ゲインを最適

化することで望ましい流量制御を得ることができる。本稿では内部モデル制御(Internal model control, 以下 IMC)の設計法<sup>[2]</sup>を適用し、理論的に制御器を設計し、検証した結果を示す。

### MFCの構成と制御対象

#### MFCの構成と過渡応答特性

MFCの主な構成をFigure 1に示す。

ここでは熱式流量センサと呼ばれる、センシング部がプロセスガスに直接接触しない構造により、耐食性や高耐圧の特徴がある質量流量センサを搭載したMFCについて示す。MFCの構成として熱式流量センサ・層流素子抵抗体(以下 バイパス)、流量制御バルブ、回路部から成り立っている。プロセスガスはInlet側より導入され、熱式流量センサによりガス流量が計測される。バイパスは、

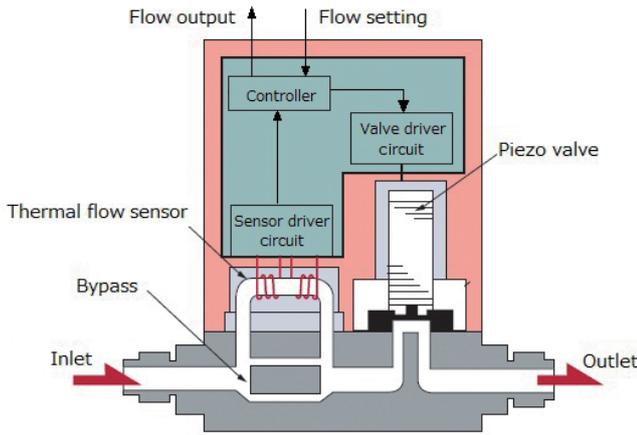


Figure 1 MFC internal structure.

熱式流量センサに流れる流量を一定比率に分流する特性を有する。目標流量に対する定常偏差を零にするため、流量制御バルブの開度を操作することで流量を制御する。回路部でPID補償器の出力を電圧に変換し、操作量として流量制御バルブに印加して開度を調整する。制御対象は、熱式流量センサと流量制御バルブとなる。

半導体製造プロセスでは、生産性の向上のため、プロセスチャンバへプロセスガスを所望の流量で瞬時に供給できる高速応答に対応したMFCが要求される。MFCの過渡応答特性の例をFigure 2に示す。ステップ応答時間と過渡時のオーバーシュート量またはアンダーシュート量で特性が評価される。

### 熱式流量センサのモデル

熱式流量センサは、発熱抵抗体を巻いた、ステンレス等の毛細管内を流れる流体の温度分布の変化量から質量流量を計測する。バイパスにより既知の比率で分流されたプロセスガスの質量流量を計測する。ガス毎にN<sub>2</sub>ガスに換算する変換係数(コンバージョンファクター)が明らかなため、代替ガス(N<sub>2</sub>)による調整が可能で、広く採用されている方式の1つである。

熱式流量センサの入出力間の特性は、センサ感度を $K_{sen}$ 、応答の時定数を $T_{sen}$ としたとき、Equation 1の1次系<sup>\*1</sup>の伝達関数 $P_{sen}(s)$ で示すことができる。

$$P_{sen}(s) = \frac{K_{sen}}{T_{sen}s + 1} \dots\dots\dots (1)$$

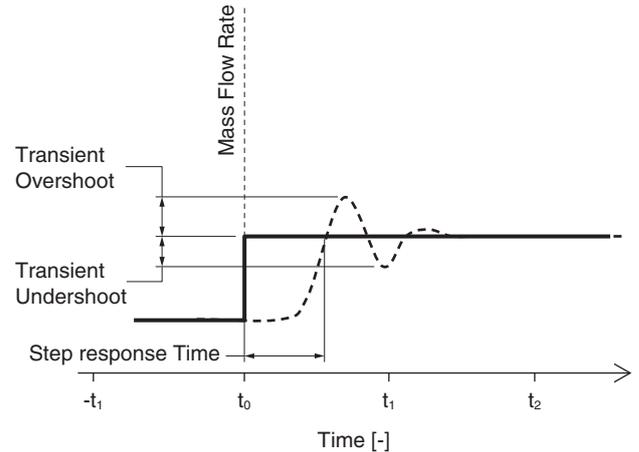


Figure 2 Step response conditions for MFC.

### 流量制御バルブのモデル

流量制御バルブの方式の1つに、ピエゾアクチュエータバルブがある。ピエゾスタックに印加する電圧によって生じるピエゾ素子の変位をバルブの駆動に利用する。流量制御バルブの入力出力特性は、ゲインを $K_{val}$ 、バルブの応答の時定数を $T_{val}$ としたとき、Equation 2の1次系の伝達関数 $P_{val}(s)$ で示すことができる。

$$P_{val}(s) = \frac{K_{val}}{T_{val}s + 1} \dots\dots\dots (2)$$

### 制御対象のモデル

MFCの制御対象は、熱式流量センサと流量制御バルブである。制御対象の伝達関数 $G_p(s)$ は、Equation 1およびEquation 2を用いて表現される。

$$G_p(s) = \left( \frac{K_{sen}}{T_{sen}s + 1} \right) \left( \frac{K_{val}}{T_{val}s + 1} \right) \dots\dots\dots (3)$$

\*1: 伝達関数: 制御対象の入出力特性を表現する数式モデルで、すべての初期値を0としたとき、Equation 4のような出力のラプラス変換と入力とのラプラス変換の比で与えられる<sup>[1]</sup>。

$$\text{伝達関数} = \frac{\text{出力のラプラス変換}}{\text{入力とのラプラス変換}} \dots\dots\dots (4)$$

## 制御系の設計

### 内部モデル制御の構成

目標流量 $r(s)$ に制御量 $y(s)$ を追従させる制御系の設計に

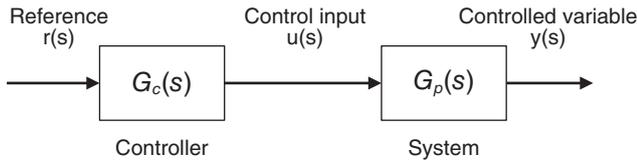


Figure 3 Feedforward control system.

において、フィードフォワード制御が有用である。Figure 3 においてEquation 3に示すMFCの制御対象の伝達関数  $G_p(s)$  が既知である場合、制御器の伝達関数  $G_c(s)$  に Equation 5に示す制御対象の逆数を適用することで、制御量  $y(s)$  が目標値に一致し、望ましい応答特性が得られる。

$$G_c(s) = G_p(s)^{-1} \quad \dots\dots\dots (5)$$

しかしながら、フィードフォワードのみでは、個体差または経時劣化に伴うモデル化誤差や外乱に対応できない<sup>[3]</sup>。これらに対応するために、Figure 4に示すIMC法を用いた制御系を設計した。ここで外乱を  $d(s)$ 、制御対象モデルの伝達関数を  $\hat{G}_p(s)$  とする。

Figure 4において、MFCの制御対象  $G_p(s)$  の出力  $y(s)$  と制御対象モデル  $\hat{G}_p(s)$  の出力  $y_M(s)$  を比較し、フィードバックすることでモデル化誤差や外乱  $d(s)$  を補償する。さらに、モデル化誤差の影響を最小限に抑えてロバスト性を向上するため、制御器  $G_c(s)$  にEquation 6に示すフィルタ  $F(s)$  を直列に接続した、Equation 7に示す  $G_{IMC}(s)$  を制御器として用いる<sup>[4]</sup>。

$$F(s) = \frac{1}{(T_I s + 1)^n} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$G_{IMC}(s) = F(s) G_c(s) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで  $T_I$  はフィルタの時定数であり、 $n$  は制御系の制御器  $G_{IMC}(s)$  が適切となるように選定する。

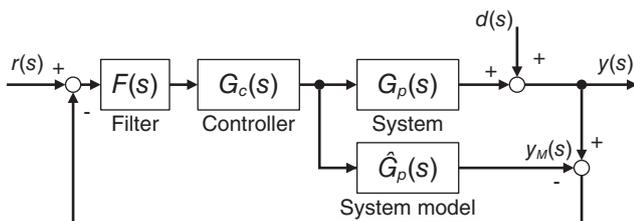


Figure 4 Internal model control system.

Figure 4の制御系の出力  $y(s)$  は、Equation 8となる。

$$y(s) = \frac{F(s) G_c(s) G_p(s)}{1 + [G_p(s) - \hat{G}_p(s)] F(s) G_c(s)} r(s) + \frac{[1 - F(s) G_c(s) \hat{G}_p(s)]}{1 + [G_p(s) - \hat{G}_p(s)] F(s) G_c(s)} d(s) \quad \dots\dots\dots (8)$$

Equation 8において、制御対象モデル  $\hat{G}_p(s)$  が制御対象  $G_p(s)$  の特性に十分近い場合、Equation 8の右辺分母は1に近くなる。このため、Equation 5が成立すれば出力  $y(s)$  はEquation 9であらわされる。

$$y(s) = F(s) r(s) + [1 - F(s)] d(s) \quad \dots\dots\dots (9)$$

Equation 9の右辺第1項は目標追従性能、第2項は外乱除去の特性を示す。

制御系応答のシミュレーション

MFCの制御対象は、Equation 3に示すように2次系<sup>[1]</sup>の伝達関数となるので、制御対象モデル  $\hat{G}_p(s)$  はEquation 10で与えられる。

$$\hat{G}_p(s) = \left[ \frac{\hat{K}_{sen}}{\hat{T}_{sen}s + 1} \right] \left[ \frac{\hat{K}_{val}}{\hat{T}_{val}s + 1} \right] \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここでEquation 6を  $n=1$  として設計すると、制御対象モデル  $\hat{G}_p(s)$  が制御対象  $G_p(s)$  の特性に十分近い場合、Equation 9はEquation 11で示される。

$$y(s) = \frac{1}{(T_I s + 1)} r(s) + \frac{T_I s}{(T_I s + 1)} d(s) \quad \dots (11)$$

Equation 11のシミュレーション結果をFigure 5に示す。  $r(s)$  に対して  $y(s)$  は時定数<sup>[1]</sup>が  $T_I$  の1次系の応答となる。

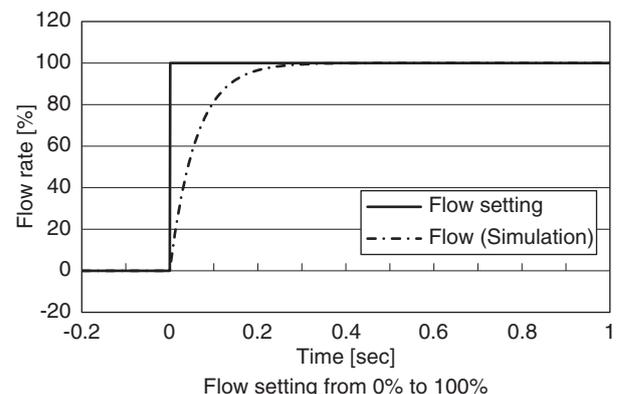
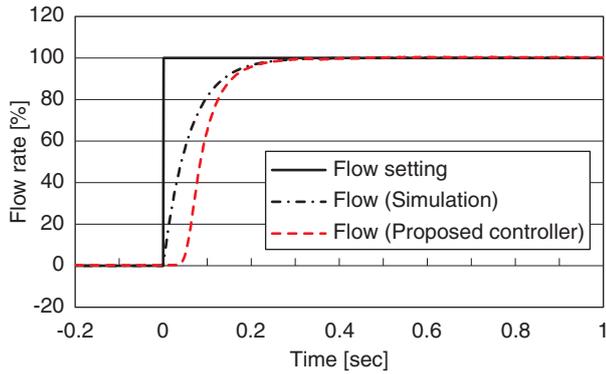
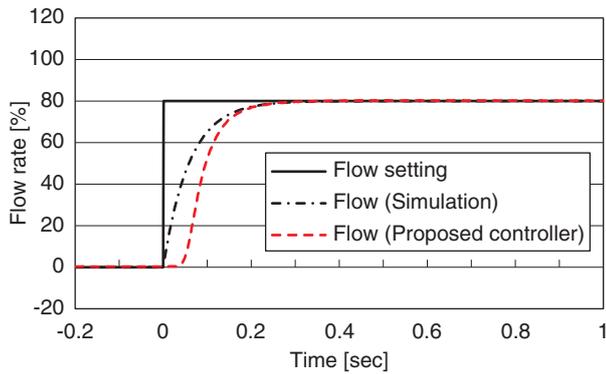


Figure 5 Simulation result of step-up response.



(a) Flow setting from 0% to 100%



(b) Flow setting from 0% to 80%

Figure 6 Step-up response comparison between simulation and experimental result.

## 実験検証

本章では、提案法を適用した制御系における流量応答の実測値とシミュレーションの比較結果を示す。横軸は時間を示し、シミュレーションの流量が98%に到達する時間で正規化した。

Figure 6に流量の立ち上りステップ応答の比較結果を示す。シミュレーションと提案法の整定時間が同等の結果を得ることができ、オーバーシュートは目標流量に対して1%以下に抑えられた。実際の制御対象においては、モデルで考慮されていないむだ時間が認められるが、提案法のロバスト性によりシミュレーションと同等の整定時間が得られた。

## おわりに

本稿では、理論的に制御器を設計する手法として、制御工学を用いたPID補償器の設計方法の適用を提案した。提案法を適用した制御系において、シミュレーションと実機試験により有効性を示すことができた。モデル化誤差をさらに考慮して設計することで、今後はさらにより精度よく制御器を設計できると考える。

## 参考文献

- [1] 杉江俊治, 藤田政之, フィードバック制御入門, コロナ社(1999)
- [2] M.Morari and E.Zafriou, Robust Process Control, Prentice-Hall International, Inc.(1989)
- [3] 澤田賢治, “サーボ系・内部モデル原理”, システム/制御/情報, 56-4, 188(2012)
- [4] Ming T. Tham, Internal Model Control, <http://www.lorien.ncl.ac.uk/ming/robust/imc.pdf> (参照 2014.9.12)

**家城 篤史**

Atsushi IEKI

株式会社 堀場エステック  
開発本部 開発設計1部