

技術論文

半導体製造装置における温度制御技術について
Temperature Control of Semiconductor Processing Machine

三村 和弘
Kazuhiro Mimura

半導体製造プロセスにおける温度制御はその製品品質や生産性を左右する重要なファクターである。近年のデバイスの線幅の微細化に伴い、多種の薬液の使用と複雑化するプロセスによって温度制御に要求される性能はますます厳しくなっている。このような状況に対応するための当社の取り組みを「PID制御の高度化」と「チューニングの高度化」という観点から、純水加熱装置及びCSヒータを例に紹介する。

Temperature control of the semiconductor process is the key factor for its quality and productivity. Recent trends such as the rapidly shrinking design rule promote an increase in the number of chemical and complex processes, which require higher temperature controllability. This paper introduces our recent advances in the PID control algorithm and tuning technique that were applied to a DI water heater and CS heater.

Key Words: 温度制御, PID制御, フィードフォワード制御, 外乱オブザーバ, オートチューニング

1. はじめに

半導体製造プロセスにおける温度制御はその製品品質や生産性を左右する重要なファクターである。近年のデバイスの線幅の微細化は性能向上の限界を突破するため

にトランジスタの電極や酸化膜、絶縁膜の材料の変更や、電極構造の見直しなどを推し進めてきた。その結果、多種の薬液の使用や運転条件の切り替えなどによってプロ

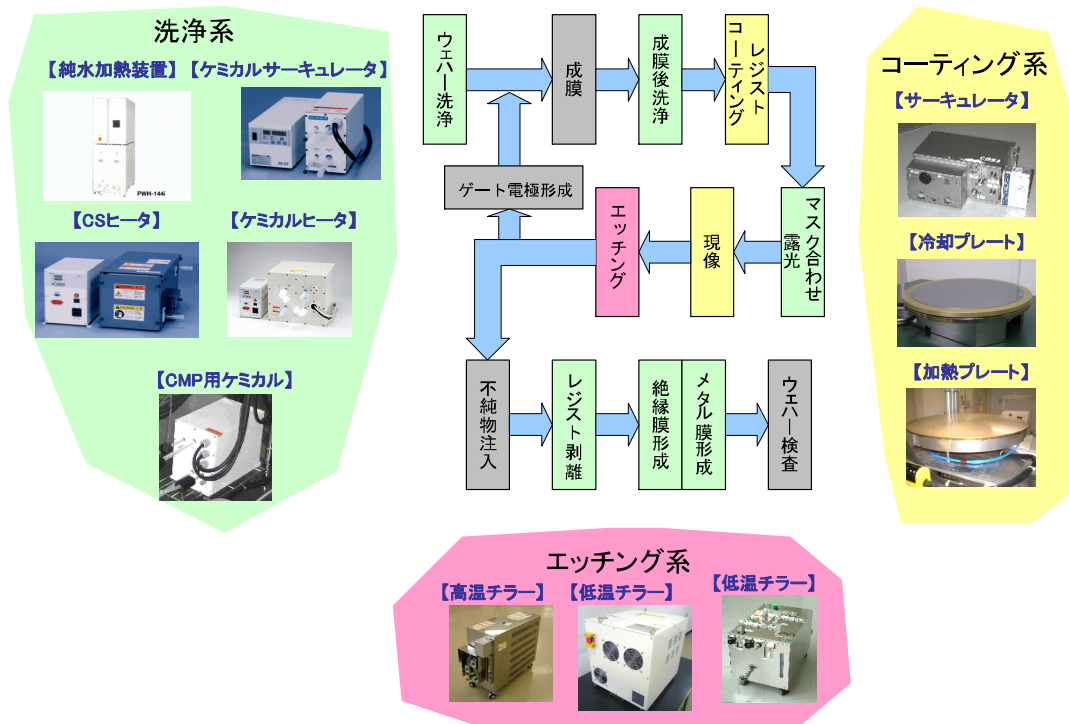


図1 前工程における当社製品の使用範囲（プロセスの色が装置グループの色を示す）

セスは複雑化し、温度制御に要求される性能はますます厳しくなっている。このような状況に対応するため、当社でも温度制御の性能向上に対して様々な取り組みを進めている。本論文ではその取り組みの一例を純水加熱装置における「PID 制御の高度化」、及び CS ヒータにおける「PID チューニングの高度化」について述べる。純水加熱装置における「PID 制御の高度化」では、古典制御に分類される PID 制御にフィードフォワード制御と現代制御理論の外乱オブザーバを併用することにより、流量変動やランプ出力の変動に対してロバストなシステムを構築した。また、CS ヒータにおける「PID チューニングの高度化」では限界ゲイン・限界周期にもうひとつの指標を加えることにより従来法よりも最適な PID 定数を求めることが可能となった。

2. 半導体製造プロセスにおける当社製品使用の概要

当社の温調機器は半導体製造プロセスの中でもウエハ上に集積回路を作りこむ「前工程」で使用される。図 1 は「前工程」の各プロセスと関連する当社製品である。大きく分けてウエハ洗浄用の「洗浄系」とレジスト液やウエハ自身の温調用である「コーティング系」、主にプロセスチャンバーの温調用である「エッチング系」の 3 種

に分類できる。中でも「洗浄系」の装置が占める割合が多く、当社の主力商品となっている。

図 2 は当社製品を制御の観点から 3 つのグループに分類したものである。図中 A(s)は加熱・冷却を行なう熱交換器、B(s)はタンクや薬液槽、C(s)はコントローラ、S(s)は温度センサの伝達関数を表している。分類 I は流体加熱系の場合、熱交換器を通過した流体がそのままユーザの装置に供給されるもので、タンクや液槽を持たない。熱交換器、コントローラ、センサが全て当社製品内にあるため製品内で制御系として閉じている。このためチューニングが開発段階でできると言う特徴がある。純水加熱装置や、流体を使わないプレート類がこれに属する。分類 II は流体が循環するため、タンクを持ち、熱交換器で加熱・冷却された流体は、ユーザの装置を経由してこのタンクに戻ってくる。当社製品内にタンク、熱交換器、コントローラ、センサが全てあるタイプである。このタイプも分類 I と同様に開発段階でのチューニングがやりやすい。エッチング系のチラー及びサーキュレータがこのグループに属する。分類 III は分類 II と同様に熱交換器で加熱・冷却された流体がユーザの液槽を経由して循環するタイプである。ただし、分類 II と異なり、液槽及びセンサはユーザの装置側にあるため、開発段階でチューニングと言うわけにはいかず、現地でのチューニングが必要になる。いずれの分類においても ①速い立ち上が

分類	I	II	III
システム構成			
特徴	<ul style="list-style-type: none"> コントローラ、熱交換器、センサが装置内 流体加熱の場合、流体は循環しない(one-path) 比較的チューニングがしやすい 	<ul style="list-style-type: none"> コントローラ、熱交換器、タンク、センサが装置内(サーキュレータはタンク無し) 流体は循環する 比較的チューニングがしやすい 	<ul style="list-style-type: none"> コントローラ、熱交換器が装置内、タンクまたは液槽、センサ仕様はユーザによって異なる 流体は循環する チューニングが必ず必要
該当製品	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>【純水加熱装置】</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>【冷却プレート】</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;"> <p>【加熱プレート】</p> </div> </div>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>【高温チラー】</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>【低温チラー】</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;"> <p>【低温チラー】</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>【サーキュレータ】</p> </div> </div>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>【ケミカルサーキュレータ】</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>【CSヒータ】</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;"> <p>【ケミカルヒータ】</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>【CMP用ケミカル】</p> </div> </div>

図 2 制御の観点から見た当社製品の分類

り特性 ②小さいオーバーシュート ③速い外乱時リカバリ ④1.0℃から 0.1℃までの温調精度 ⑤ プレートでは面内温度、過渡時温度プロファイルの均一性等の制御性能が要求される。

3. PID 制御の高度化—純水加熱装置の例

PID 制御は古典制御の範疇に属し、生まれてから 80 年以上が経つが、①構造が簡単 ②ユーザーが理解して使いやすい ③構造が簡単であるにもかかわらず優れた制御性能を発揮できる などの理由で、今なお産業界では 90%近くを占めている。半導体製造装置の温度制御においても上記の理由で PID 制御が中心となっている。しかしながら制御性能やコストなど、厳しくなる要求仕様に対応するためには PID 制御だけでは実現が難しい場合がある。このような場合、現代制御理論やロボスト制御のような高度な制御手法を使えば簡単に解決しように思えるが、一般的に高度な制御手法はフィードバックゲインの最適値の選定や現場でのチューニングのしやすさ、アクチュエータの飽和への対応などが PID 制御よりも困難になる。代替として考えられるのが PID をベースとして他の制御理論と融合させ、上述した PID 制御の長所を残しながら制御性能を高めていく、「PID 制御の高度化」である。当社では純水加熱装置の温度制御に対して PID 制御にフィードフォワード制御と外乱オブザーバを併用している。これによって①フィードフォワードの長所を生かして流量変動に対してすばやく補償動作を行うことができ、②外乱オブザーバにより従来機に対して温度センサを追加することなく、すなわちコストを増やすことなく制御の自由度を増やし、③外乱オブザーバの制御構造を応用して直列構造を持つシステムに特有な飽和問題を解決し、流量変動、ランプ出力のばらつき、ランプ断線などの外乱に対してロボストな温度制御システムを実現した。

3.1 純水加熱装置の概要

純水加熱装置はウエハ洗浄装置に洗浄や薬液の希釈に使用される温純水を供給する装置である。図 3 は純水加熱装置の加熱ボトルの写真と装置構成図である。図中の断面が示すように石英製のボトルには 6 個の中空の穴が開いており、その中にハロゲンランプが支持されている。ボトル内を通過する純水をハロゲンランプの輻射熱によって加熱する。ボトル 1 個につき 24kW のパワーがあり、加熱能力によって 24, 48, 72, 96, 144kW の 5 機種がある。ボトルが複数個の場合は図のように流路を直列に接続することによって純水を段階的に加熱する。ボトルの温度制御には大別して 2 通りある。ひとつは最上位（最下流）のボトルのみ PID 制御を行い、残りのボトルは必要電力を固定で供給する方法である。この方法では必要

な温度センサの数は抑えられるが制御の自由度は小さい。もうひとつの方法は各ボトルの出口に温度センサを設けてそれぞれを PID 制御する方法である。この方法では各ボトルが独立で制御できるので制御の自由度が高くなるが、温度センサがボトルの数だけ必要となり、周辺機器も含めてコスト増加につながる。当社の従来機「N シリーズ」は前者の方法を取っていたが、新型機「i シリーズ」では外乱オブザーバを用いることにより、最上位のボトルのセンサ温度から、残りのボトルの出口温度を推定するため、センサの数を増やすことなく、すなわちコストを増加することなく各ボトルを PID 制御することが可能となった。

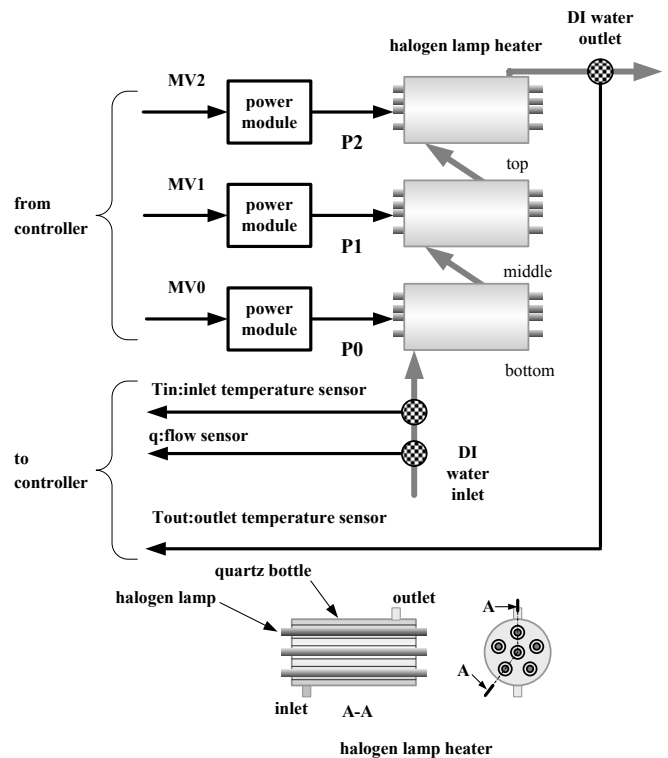


図 3 純水加熱装置加熱ボトルの写真と装置構成図

3.2 洗浄方式の変化

図4に示したようにウエハの洗浄方式には大きく分けて3種類ある。バッチ多槽式はもっとも古くからある方式で、槽ごとに異なる薬液が入っており、順番にウエハを浸けてゆく。この方式では純水の供給は定流量が主流であった。ところが、洗浄度が高くなるにつれて、ひとつの槽にウエハを浸けたまま、薬液を置換するワンバス方式が導入された。ウエハが外気に触れないため、汚染のリスクが低減される。この方式では純水の供給流量がプロセスによって切り替えられるようになった。さらにプロセスが複雑化し、洗浄工程ごとに最適な条件が求められるようになり、ウエハを一枚一枚洗浄する、枚葉式が導入された。この方式もワンバス式と同様に温純水の供給流量が切り替えられる。現在はこの3方式が目的とコストで使い分けられている。

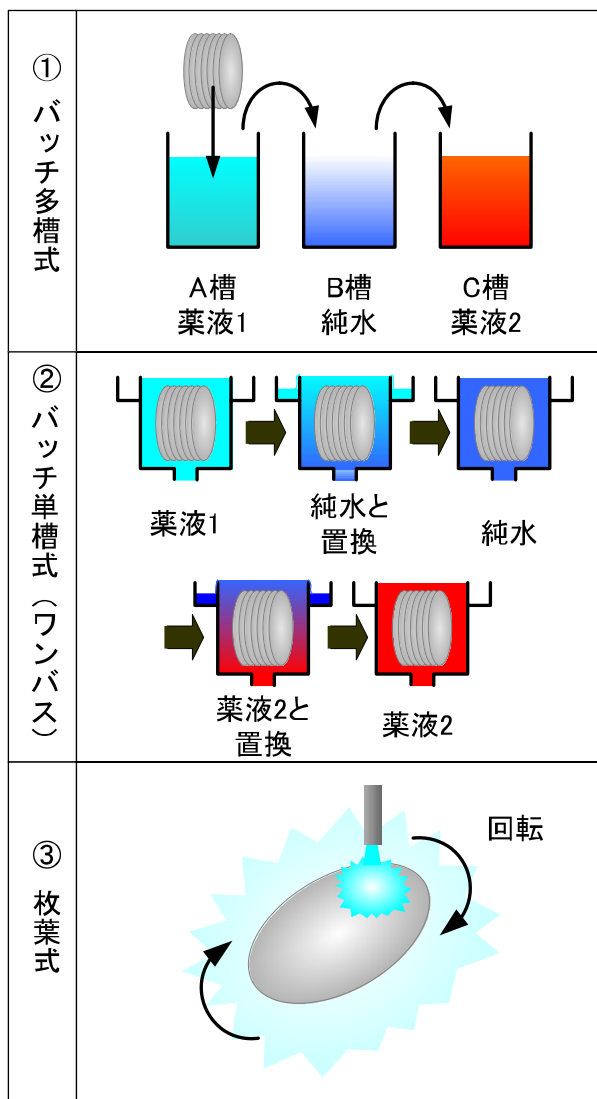


図4 ウエハ洗浄方式

3.3 フィードフォワード制御の併用

上述の通り、純水加熱装置で加熱された温純水はバッチ多槽処理においては一定流量で使われることが多かったが、バッチ処理槽のワンバス化、或いは枚葉プロセスの導入にしたがって、プロセス中に供給する温純水の流量を切り替える方法が主流になってきた。このため、流量の切り替えが純水加熱装置にとっては外乱となり、ボトル出口温度の変動が問題になった。これは従来機が流量の変動を温度変動として温度センサで検知するまでコントローラが補償動作を行なうことができないためである。この点を改善するため、新型機ではPID制御にフィードフォワード制御を併用した。図5にその構成を示した。ただし簡略化のため全てのボトルに温度センサがあるものとして表している。フィードフォワード制御では流量の変動を流量センサによって検知し、その流量変動に必要な電力を計算してPIDコントローラ出力に加算するため、流量変動発生後、コントローラの補償動作が直ちに行なわれる。

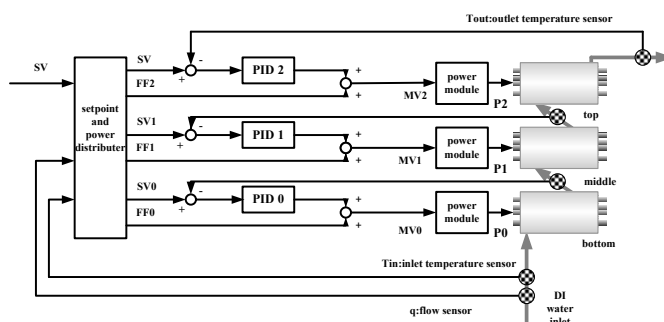


図5 PID制御+フィードフォワード制御

図6にフィードフォワード制御併用の効果を従来機と比較して示した。流量を 30L/min ± 10% (27L/min ⇄ 33L/min) でステップ状に切り替えたときのボトル出口温度の偏差を観測したものである。流量増加、減少のどちらの場合も温度変動幅は PID のみの場合は 2℃を超えるのに対して、フィードフォワード併用の場合は 1/10 の約 0.2℃に抑えられている。

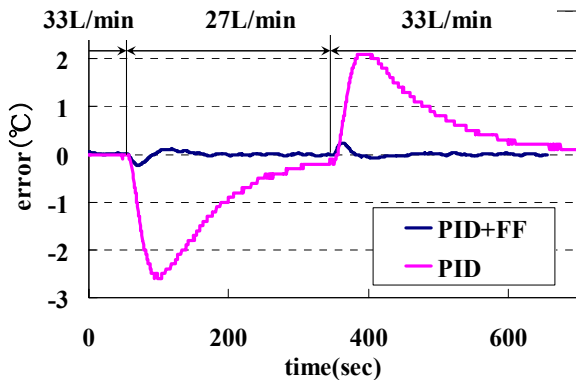


図6 流量変動テスト

3.4 外乱オブザーバの併用

図2で示したように、純水加熱装置の加熱ボトル一つ分はコントローラ、熱交換器、センサで分類Iの形態を取ったサブシステムと考えることが出来る。48kW以上の装置のようにボトルを複数個使用する場合はこのサブシステムをボトルの数だけ直列結合した構造を持っている。この構造を一般的に表したものを図7に示した。図中 $G_i(s)$ は熱交換器とセンサを含むプラント、 $C_i(s)$ はコントローラであり、添え字 i はサブシステムの数を表す。この構造ではひとつのサブシステムでは達成できない目標値に対して、サブシステムを直列結合することにより出力を目標値に段階的に近づけることが出来る。しかしながら、上流の誤差が下流に伝播するため、誤差の大きさによっては下流でその誤差の蓄積を補償しきれず、飽和することで最終目標値に到達できなくなり、オフセットが残るといった問題点がある。この問題点を解決するためにはすべてのボトルへの指令値が適切に分配され、途中で飽和すること無く制御されなければならない。PID制御に外乱オブザーバを併用した本制御方式では従来のように外乱を推定して相殺することが目的ではなく、外乱オブザーバの持つI型の制御構造を応用して、モデル化誤差を持つ系でもボトルへの指令値を適正に分配し、どのサブシステムも途中で飽和することなく制御可能とすることを実現した。

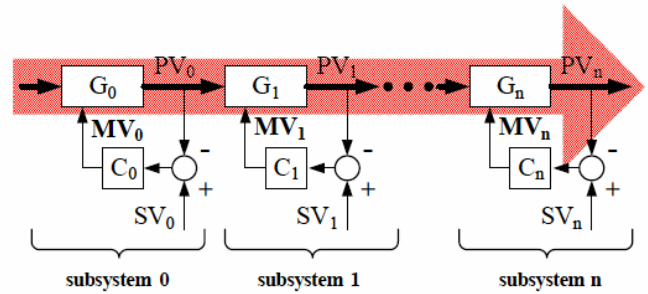


図7 サブシステムの直列結合構造

オブザーバは状態フィードバックと並び現代制御理論の核をなす手法であり、センサ等で直接観測できない状態量をプラントのモデルを使って推定する方法である。外乱オブザーバはプラントの状態量に加えて実際に加わる外乱やモデル化誤差などをひとまとめにして一状態量として仮定し、他の状態量と同様に推定する。推定した外乱を入力側に加えることによって外乱を相殺することができる。外乱オブザーバは特にモーションコントロールの分野でよく用いられ、文献も豊富に見られる^{1),2)}。 p 入力 1 出力のプラントにステップ状外乱 w が入力に加わったと考えると、状態方程式によって次のように表される。

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Bw(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで A は $n \times n$ 、 B は $n \times p$ 、 C は $1 \times n$ 行列、 $x \in R^n$ は状態空間ベクトル、 $u \in R^p$ は入力信号、そして $y, w \in R$ はそれぞれ出力と外乱である。外乱 w を状態として含めた拡大系は

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{w}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \\ &= Aa \cdot \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix} + Ba \cdot u(t) \\ y(t) &= [C \quad 0] \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix} = Ca \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

(Aa , Ca) が可観測であれば外乱オブザーバが成り立ち

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(t) \\ \hat{w}(t) \end{bmatrix} = Aa \begin{bmatrix} \hat{x}(t) \\ \hat{w}(t) \end{bmatrix} + Ba \cdot u(t) + L(Ca \cdot x(t) - Ca \cdot \hat{x}(t)) \quad (3)$$

ここで \hat{x} および \hat{w} は推定した状態量であり、 L はオブザーバゲインである。図 8 に 72kW の装置の場合の外乱オブザーバを含めたシステムを示した。ただし簡略化のためフィードフォワード項は省略してある。外乱を含めたプラントモデルは 5 次のモデルを使用している。推定された最下位と中位のボトル出口温度は、目標温度分配器によって適正に分配された、各ボトルの目標温度と比較され、偏差として各 PID コントローラに入力される。

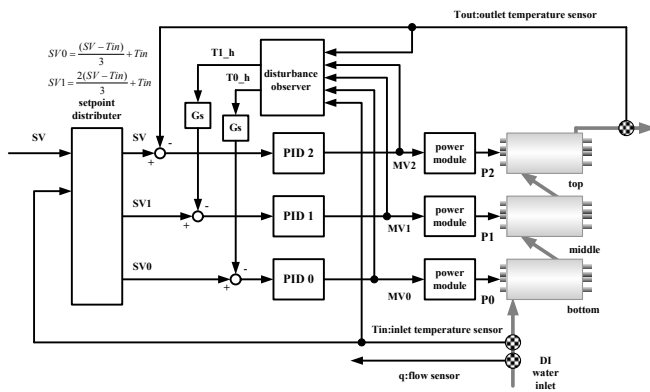


図 8 PID 制御+外乱オブザーバ

外乱オブザーバを適用することによって、センサ数を減らすことを可能にするだけでなく、直列構造を持つシステムにおいてランプ出力のばらつきがある場合やランプが断線するような場合でもオフセットを残すことなく、最適な出力で制御することが可能になる。図 9 は図 8 で示した 72kW の場合の外乱オブザーバの内部構造を示したものである。全ての入力に等しい外乱が加わったと仮定することにより、内部の積分器の個数が 1 となり、これによって各ボトルへの指令値が適正に分配できるような構造となっている。

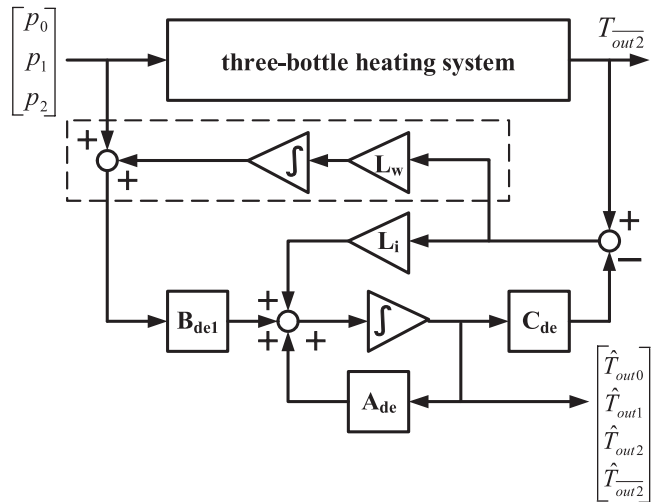


図 9 外乱オブザーバの内部構造

図 10 には外乱オブザーバの効果を示した。ランプ断線を想定し、ボトル出口温度が目標温度で定常となった後に、時刻 100 秒で真ん中のボトルのランプを全て消灯させている。図 10(a) は外乱オブザーバを用いたものであり、図 10(b) は全てのボトルに温度センサを設けて PID 制御したものである。外乱オブザーバを用いた場合、ボトル出口温度は消灯後約 100 秒で元の設定温度に戻っており、このとき各ボトルの指令値はほぼ等しい値に制御されている。これに対して、PID 制御だけの場合は設定温度への復帰はできていない。これは最下位のボトル出口温度が目標温度に到達しているため、たとえ真ん中のボトルが目標温度に到達していなくてもそれ以上の補償動作をすることができないからである。

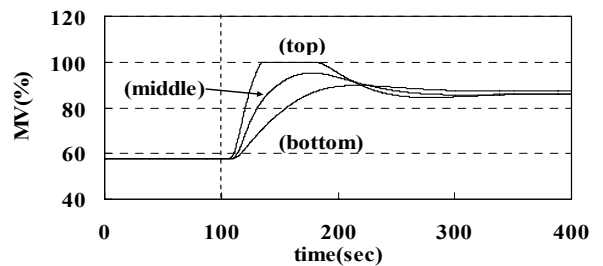
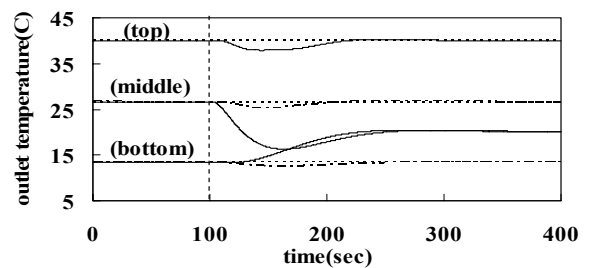


図 10(a)

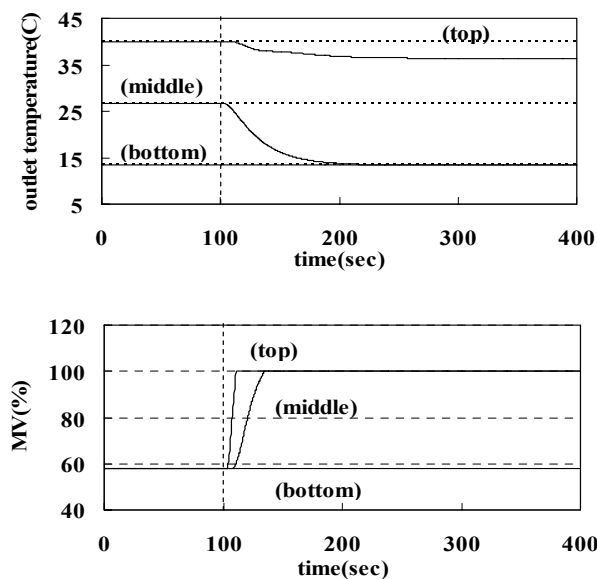


図 10(b)

図 10 ランプ断線を想定した温度制御結果

- (a) 外乱オブザーバ併用の場合
 (b) 全てのボトルにセンサを設けて PID 制御する場合
 上段：ボトル出口温度 下段：操作量

4. チューニングの高度化—CS ヒータの例

PID 制御では PID 定数の選定が必須である。前述した制御の形態による分類で I および II に属するものは、システム全体が装置内にあるため、開発段階で定数を決定することができる。しかし、分類 III に属するものは、システムの動特性に大きくかわる薬液槽やセンサがユーザ側にあるため、その仕様はユーザによってまちまちであり、装置の新規立ち上げ時はもちろん、プロセスや運転条件の変更時には PID 定数の調整作業（チューニング）が必要になる。チューニングを最適に行なうには、熟練したオペレータの経験に負うところが多く、しかもその作業に費やす時間は無視できない長さである。これは PID 制御誕生以来の課題であるが、1942 年に Ziegler&Nichols によって膨大な実験データから得た、チューニングの指針となる調整則が提案され³⁾、「当たらずも遠からず」の値を得ることができるようになった。しかし、この調整則を利用するにも、オープンループでのステップ応答テスト(ステップ応答法)や限界感度、限界周期を求めるため、系を安定限界まで持っていくような作業(限界感度法)が必要であった。この煩わしいチューニング作業を自動化したものがオートチューニングであり、1984 年に Åström によって提案されたリミットサイクル法⁴⁾は限界

感度法を非常に簡単に実現することができ、現在のほとんどの汎用温調器に採用されている。ただし、あくまで限界感度法がベースであるため、得られた PID 定数が最適値とは限らない。なぜならば限界感度法で得られる限界ゲイン、限界周期はシステムの動特性における「点」の情報であり、1 点を通る直線の方程式が何本もあるように限界ゲイン、限界周期だけではそのシステムの動特性を完全に特定することは難しいからである。この問題点を解決するために現在も様々な研究がなされている^{5),6)}。当社ではリミットサイクル法実施時に温度波形の特徴点を抽出し、限界ゲイン、限界周期とあわせてもうひとつの情報として調整則に織り込む方法を考案した。本調整則を当社製品の CS ヒータに適用することにより、従来の調整則よりも、立ち上がり時および外乱が加わった場合の温度リカバリー時のオーバーシュートを小さくすることが実現できた。

4.1 CS ヒータの概要

図 11 は CS ヒータによる加熱システムの構成を示したものである。CS ヒータは主にウエハ洗浄用の薬液の温調に使用される。加熱方法は純水加熱装置と同様にハロゲンランプヒータの輻射熱であり、薬液槽とヒータ間をポンプによって循環させ徐々に加熱していく。薬液槽の容積、放熱に関連する材質、循環流量、薬液の物性、センサの特性などは全てユーザによって異なるので最適な PID 定数を得るためにはチューニング作業が必要になる。

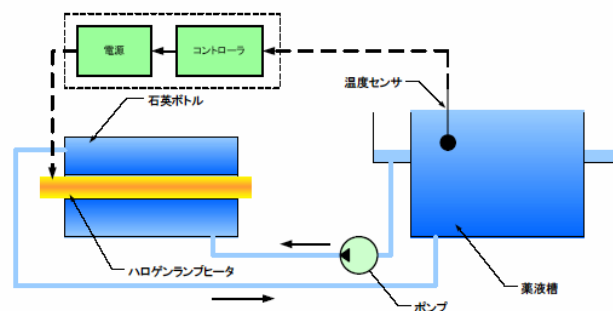


図 11 CS ヒータの構成

4.2 チューニングの最適化

図12はリミットサイクル法によるチューニング時の温度波形である。CSヒータは冷却時は自然放熱のみのため、このように上下非対称な波形となる。そこで加熱時間と冷却時間の比をそのプロセスの特性を表す指標のひとつと考え、これを X とする。

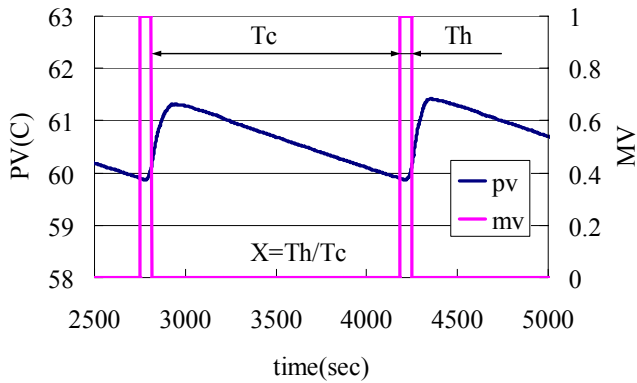


図12 リミットサイクル法での波形

X に対してプロセスの限界ゲイン，限界周期，そして最適な PID 定数がどのような関係にあるか，図13に示したような手順で調査した。まず CS ヒータで想定される運転条件を考え，条件に範囲を設けて，組み合わせて水準を作る。条件の主なものには槽容積，設定温度，循環流量，センサ時定数などがある。これらの水準についてプラントを「無駄時間+3次遅れ系」で表し，シミュレーション上でリミットサイクル法によって限界ゲイン Kc ，限界周期 Tc 及び X 等を求める。次に限界ゲイン，限界周期から PID 定数の水準を作り，シミュレーション上で温度立ち上がり時と外乱印加時の応答波形を求め，オーバーシュート OS ，整定時間 TS ，評価指標などを求める。ここで言う評価指標とは偏差 $e(t)$ の積分値がベースであり，

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \tag{4}$$

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)|dt$$

で表される。ITAE は立ち上がり特性，IAE は外乱印加時の特性でよく用いられる。これらの指標に加えてコントローラ及びプラントモデルから感度 M_s を求めた。感度とは感度関数の最大値であり，プラントの伝達関数を $G_p(s)$ ，コントローラの伝達関数を $G_c(s)$ とすれば

$$M_s = \max_{0 \leq \omega \leq \infty} \left| \frac{1}{1 + G_p(i\omega)G_c(i\omega)} \right| \tag{5}$$

で表される。一般に $M_s=1.3\sim 2$ が適している⁷⁾。

シミュレーションで得られたこれらの値を以下の評価関数で評価し，それぞれの最小値となる組み合わせを PID 定数の最適値とする

$$J_{set} = \sqrt{w_1 OS^2 + w_2 ITAE^2}$$

$$J_{dis} = \sqrt{w_3 IAE^2 + w_4 M_s^2} \tag{6}$$

ここで w_i $i=1,2,3,4$ は重みである。最後に各水準の最適値を Tc ， Kc の倍率に変換し， X の関数として表す。倍率をそれぞれ Y_1 ， Y_2 とすれば

$$Y_1 = f(X), \quad Y_2 = g(X) \tag{7}$$

これによってリミットサイクル法で Tc ， Kc ， X を求めれば最適 PID 定数は

$$Kp_{set} = Y_1 Kc = Kc \cdot f(X)$$

$$Ki_{set} = Y_2 Tc = Tc \cdot g(X) \tag{8}$$

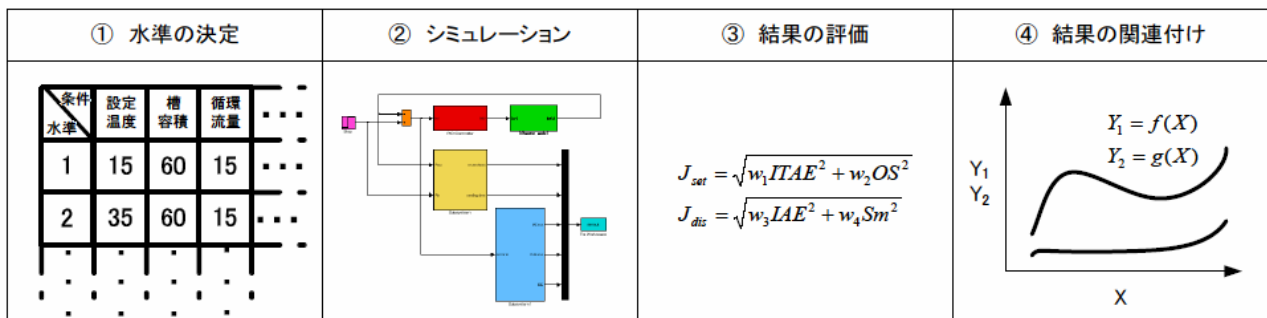


図13 特徴量 X と PID 定数の関連付けの手順

のように求まる。図 14 に従来の調整則と比較した実験結果を示した。図中 ZaN は Ziegler&Nichols 法, CHR は Chien, Hrones, and Reswik 法を示す。図 14 (a) は温度立ち上がり特性であり, 図 14 (b) は外乱として 300mm ウエハ 50 枚相当のダミーを槽に投入した場合の温度リカバリー時の特性である。温度立ち上がり時も外乱リカバリー時も提案手法の方が小さいオーバーシュートで目標温度に到達しているのがわかる。

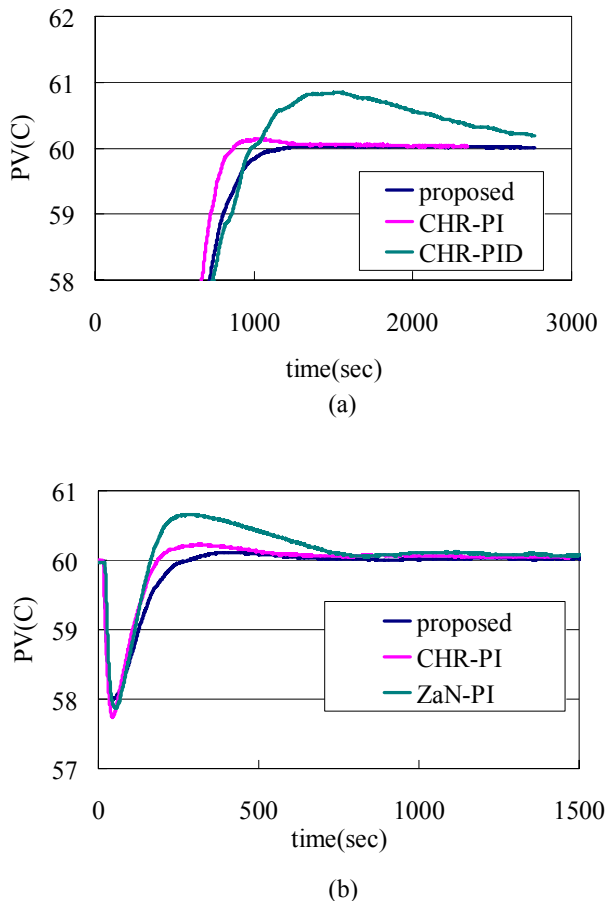


図 14 各調整則の比較

(a) 立ち上がり特性 と (b)外乱リカバリー特性

5. 終わりに

半導体製造装置における温度制御技術についての当社の取り組みを「PID 制御の高度化」及び「PID チューニング法の高度化」という観点から純水加熱装置と CS ヒータを例として説明した。今後は本論文で示した制御性能に加えて大流量化, 小流量化, 環境・省エネルギーへの対応等が重要なキーワードとなるだろう。

参考文献

- 1) G. F. Franklin, J. D. Powell, M. L. Workman, *Digital Control of Dynamic Systems*, 2nd ed., Addison Wesley, 1990, pp. 292-295
- 2) K. Asano, T. Kaji, H. Aoki, "A Molten Steel Level Control Method for Continuous Casting Based on the Disturbance Observer Theory", *Trans. on SICE*, Vol.30. NO.7, pp 836-844, 1994 (in Japanese)
- 3) J. G. Ziegler, N. B. Nichols, "Optimum Settings for Automatic Controllers", *Trans. ASME*, Vol. 64, pp 759-768, 1942
- 4) K. J. Åström, T. Hägglund, "Automatic tuning of simple regulators with specification on phase and amplitude margins", *Automatica*, 20, pp.645-651, 1984
- 5) W. L. Luyben, "Getting more information from relay-feedback tests", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 40, pp4391-4402, 2001
- 6) K. J. Åström, H. Panagopoulos, T. Hägglund, "Design of PI controller based on non-convex optimization", *Automatica*, 34, pp585-601, 1998
- 7) K. J. Åström, T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, 2nd ed., ISA, 1995

筆者紹介



Kazuhiro Mimura

三村和弘 1983年, コマツ入社。
現在, ㈱KELK 機器開発部所属。

【筆者からのひと言】

半導体製造装置用温調機器の制御に携わって7年, PID 制御は奥が深く, 非常にチャレンジングな研究テーマです。今後も高性能でかつユーザーにとって使いやすい制御を目指して研究を続けていきたいと思っています。