

あるクラスの非対称プロセスのPIDオートチューニングに関する一提案[†]

三村和弘*・汐月哲夫**

A Proposal of PID Auto-Tuning for a Class of Unsymmetrical Processes

Kazuhiro MIMURA* and Tetsuo SHIOTSUKI**

In this paper, we propose a new tuning method for PID parameter especially for a class of unsymmetrical processes. The advent of relay auto-tuning of PID controllers got rid of previous troublesome tuning procedure. However, when the process is unsymmetrical the ultimate gain and ultimate period obtained are no longer reliable since describe functional analysis that assumes sinusoidal input can't be applied properly. The proposed method uses pseudo-ultimate gain, pseudo-ultimate period, and heat time ratio obtained from conventional relay feedback method, which gives better PI parameter for a lamp heater circulator system than conventional tuning rule. The experimental test result showed proposed rule achieved less overshoot and quicker disturbance recovery.

Key Words: PID control, relay auto-tuning, unsymmetrical process

1. はじめに

1984年にÅström¹⁾によって提案された、リレーフィードバックをベースとしたチューニング法はボタンを押せば自動的にPID定数のチューニング作業が行なわれ、これまでの経験に基づく手動チューニング作業や、ステップ応答や周波数応答の結果を基にZiegler and Nicholsなどの調整則を適用するチューニング作業を一変させる画期的な方法であり、今日のメカ製のPIDコントローラの多くがこの方法を採用している。しかしながら、リレーフィードバック法で、求めた限界ゲイン、限界周期に対して従来のZiegler and Nichols等の調整則を使うのであれば、制御性能の向上は望めない。また、リレーフィードバックで得られた波形が正弦波波形とは見なせない場合、この方法の基本となる、記述関数による近似が成り立たなくなり、適切な限界ゲイン、限界周期が求められなくなる。第二の問題点に当てはまるプロセスに非対称プロセスがある。非対称プロセスは加熱・冷却、正転・逆転のように二つの動作モードを持ち、その動特性が異なるようなプロセスである。HägglundとTengvall²⁾は非対称プロセスの例として加熱炉を取り上げ、熱収支の関係から2次の状態方程式を求め、その解とリレーフィードバックの結果を対

応させて近似的にプロセスパラメータを求めている。Wangら³⁾はHägglund, Tengvallらと同じ加熱炉を取り上げ、2次の連続時間系微分方程式の解にリレーフィードバックの結果を当てはめ、近似することなくプロセスパラメータを求めている。また、リレーフィードバックの実測値の微分値を使うことなく極の近似値を求める方法も提案しており、極配置法によって加熱側のPID定数と冷却側のPID定数を求めている。Tanら⁴⁾は従来のリレーフィードバックのリレー要素に補正要素を追加し、信号の方向によってリレーの位相、およびゲインを逐次調整して非対称な応答から対称な応答とすることにより両方向の限界ゲイン、限界周期を推定し、さらに目標値変更によってプロセスの定常ゲインを求め、最終的に無駄時間+1次遅れ系に近似している。

Hägglundの提案法ではWangらが指摘したように、プロセスパラメータの推定に近似手法を使用しており、プロセスの非対称性の度合いによっては推定精度が悪化する。Wangらの提案法では加熱炉のパラメータ推定には効果が認められるが、制御性能が従来法に対してどれだけ優れているかには言及していない。Tanらの方法は応答波形の修正に4から5サイクルのリレーフィードバックの試行が必要であり、さらにプラントの定常ゲインを求めるために設定値変更による観測が必要であるため、時定数の大きい制御対象ではチューニング作業に多大な時間を要し、実用的とは言えない。これら3者に共通している点は提案手法が実機には必ず存在するアクチュエータの入力の制約を考慮していないという点である。加熱冷却系では目標温度にできるだけ早く到達させるためにアクチュエータ出力を飽和させて使用する場合が多い。このため特に目標値応答では飽和を考慮したチューニングが必要である。また、アクチュエータの入力の制約が考慮された場

[†] ICCAS-SICE 国際合同講演会で発表(2009・8)

* (株)KELK 機器開発部 神奈川県平塚市四之宮 3-25-1

** 東京電機大学未来科学部ロボット・メカトロニクス学科
東京都千代田区神田錦町 2-2

* Technical Department, KELK Ltd., Hiratsuka-shi, Kanagawa

** Dept. of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University, Chiyoda-ku, Tokyo

(Received October 28, 2009)

合、動作モードがひとつのシステムにおいても操作量の平衡点位置によってリレーフィードバックは非対称な応答を示す。本研究では非対称プロセスにおいて、特に冷却側に積極的な冷却手段のないプロセスに特定し、リレーフィードバックで得られる限界ゲイン、限界周期に相当する値を擬似限界ゲイン、擬似限界周期として取り扱う。この2値に加えて擬似限界周期に対する加熱時間の比を用いて実験的に構築した調整則を提案する。提案する調整則は半導体用シリコンウエハ洗浄装置などに使われる、ハロゲンランプ式循環加熱システムにおいて、従来の調整則に比較してより優れた制御性能を示すPI定数を求めることができた。最後に提案する調整則の一般性を検討し、適用可能な条件を示す。

2. リレーフィードバック法

リレーフィードバック法に基づくチューニング法はPID定数を自動的にかつ効率よく決定することのできる非常に効果的な方法である。

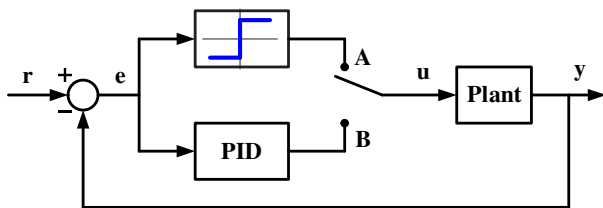


Fig. 1 Block diagram of a standard relay auto-tuner

Fig. 1 にリレーフィードバックによる自動チューニング機構の典型的な形態を示す。チューニング工程(図中 A)ではプラントとリレー要素で構成された閉ループ系がリミットサイクルを発生する。この振動周期 T_c が限界感度法で求まる限界周期に相当し、振幅 a から記述関数法による近似法を用いてつぎの式より限界ゲインに相当する K_c が求まる。¹⁾ここで M はリレー要素の振幅である。以後 K_c, T_c をそれぞれ限界ゲイン、限界周期と呼ぶ。

$$K_c = \frac{4M}{\pi a} \quad (1)$$

得られた限界ゲイン、限界周期を用いて Ziegler and Nichols 等の調整則を適用すれば適当な PID 定数が求まる。コントローラはここで制御工程(図中 B)に移り、通常の PID 制御を行なう。

リレーフィードバック法には2つの問題点がある。第一に、リレーフィードバック法は制御対象の限界ゲイン、限界周期を自動的に求めるものである。したがってPID定数を決定する調整則が従来法と同じであれば制御性能の改善は期待できない。第二に、リレーフィードバックで得られた応答波形が正弦波波形とは見せせない場合、この方法の基本となる、記述関数による近似が成り立たなくなり、適切な限界ゲイン、限界周期が求められなくなる。

3. 非対称プロセス

本研究では非対称プロセスの一例としてハロゲンランプによる薬液循環加熱システムを取り上げる。Fig. 2 にその概略図を示す。薬液はハロゲンランプヒータを備えた石英ボトル内と薬液槽の間をポンプを介して循環する。石英ボトル内の薬液はハロゲンランプヒータの輻射熱によって加熱され、薬液槽内の温度センサによって液温を観測される。ハロゲンランプヒータと温度センサはPIDコントローラとともにフィードバック制御系を構成し、望ましい薬液温度になるようにヒータの出力が制御される。加熱側はヒータの出力上限値まで加熱可能であるが、冷却側は周囲温度との温度差による自然放熱のみである。

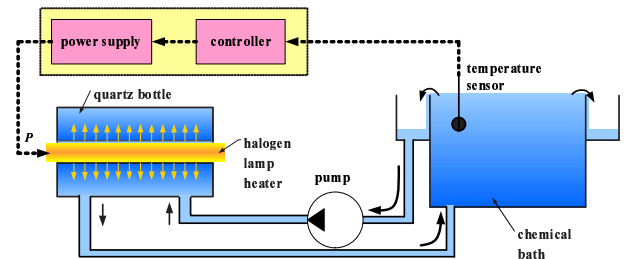


Fig. 2 Halogen lamp heater circulator

薬液槽の液温が目標温度に到達して定常となった時、操作量に相当するヒータ出力がシステム全体の放熱量と釣り合う。このときの操作量を「平衡点」と呼ぶことにする。この循環加熱システムにリレーフィードバックを適用すると、平衡点の位置によってその応答波形は Fig. 3 のように非対称となる。

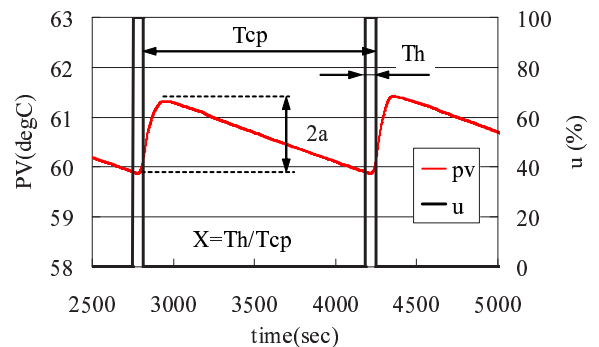


Fig. 3 An example of relay auto-tuning of unsymmetrical response

加熱ヒータおよび自然放熱は能力におのおの上下限が存在する。(Fig. 4 の U_{max}, U_{min}) ここで平衡点とこれら上下限値との差をそれぞれ加熱余裕 $U_{max} - U_{bal}$ 、冷却余裕 $U_{bal} - U_{min}$ と呼ぶことにする。Fig. 4(a) のように平衡点

U_{bal} からの加熱余裕と冷却余裕が等しければ、加熱、冷却の応答波形はほぼ等しく対称となるが、Fig. 4(b) のように U_{bal} からの加熱余裕と冷却余裕が等しくない場合は加熱側と冷却側の応答波形が大きく異なり、非対称な波形となる。このため波形は正弦波と見なすことができず、記述関数による近似が成り立たなくなり、適切な限界ゲイン、限界周期が求められなくなる。

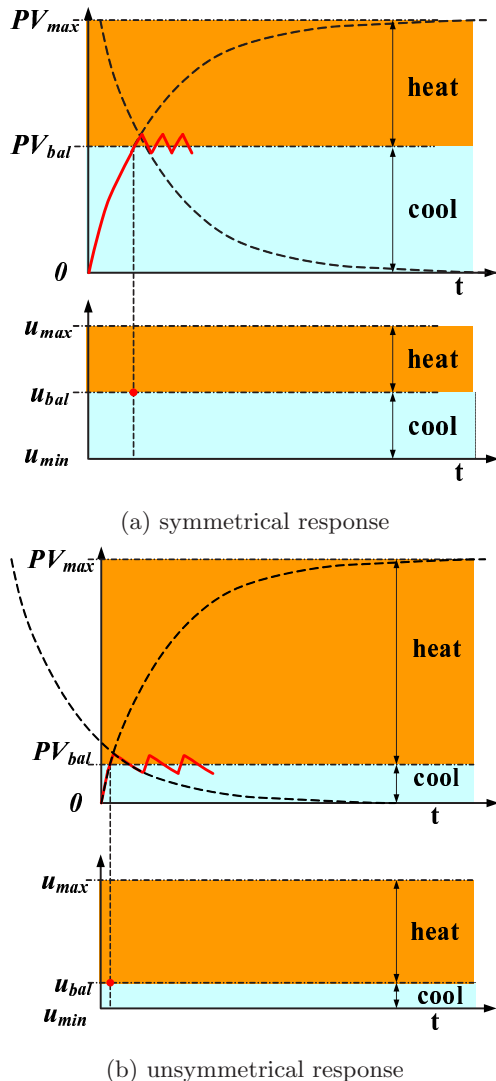


Fig. 4 An example of relay auto-tuning of unsymmetrical response. PV:output temperature, u:manipulated variable

本研究ではこれらの値を擬似限界ゲイン K_{cp} 、擬似限界周期 T_{cp} と呼び、さらに Fig. 3 中に示した擬似限界周期に対する加熱時間の比、加熱時間比

$$X = \frac{T_h}{T_{cp}} \quad (2)$$

を加えた3つのパラメータを非対称プロセスの最適PI定数と関連付けることを実験的に行ない、実機で確認した。

4. 調整則の構築

本研究で対象としたハロゲンランプによる循環加熱システムは時定数が数千秒と非常に長く、実機を使った実験ではデータの収集に膨大な時間がかかる。そこで循環加熱システムのモデリングを行ない、このモデルを基にシミュレーションによって非対称プロセスに対する調整側を構築した。手順としては、1) モデリング 2) 実験条件および水準の計画 3) シミュレーションの実施 4) 結果の評価 5) 調整則の構築 の順に実施し、最後に実機による実験によって提案手法を評価した。

4.1 モデリング

ハロゲンランプによる循環加熱システムのモデルを熱収支の条件に基づいて導出する。Table 1, 2 に変数および定数を示す。

1) ハロゲンランプヒータ (Fig. 5)

$$V_1 \rho C_p \frac{dT_b(t)}{dt} = P(t) - q \rho C_p (T_b(t) - T_a(t)) \quad (3)$$

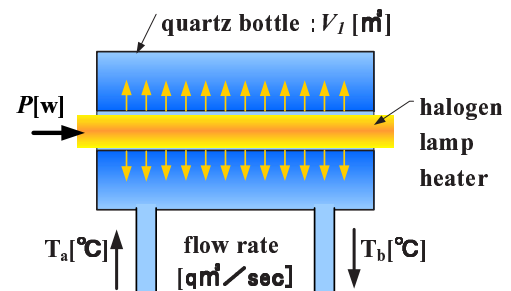


Fig. 5 Halogen lamp heater

2) 薬液槽 (Fig. 6)

$$V_b \rho C_p \frac{dT_a(t)}{dt} = q \rho C_p (T_b(t) - T_a(t)) - \alpha_0 V_b \rho C_p (T_b(t) - T_r(t)) \quad (4)$$

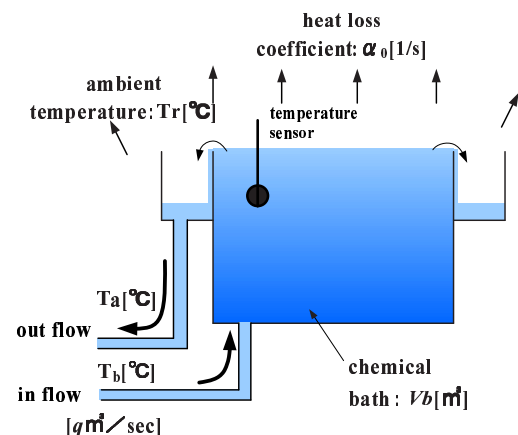


Fig. 6 Chemical bath

Table 1 Variables in the equation(3)(4)

| notation | description | unit |
|----------|---|------|
| T_a | temperature at the heater bottle inlet and bath outlet | [°C] |
| T_b | temperature at the heater bottle outlet and bath inlet | [°C] |
| P | halogen heater power applied to the chemical | [W] |

Table 2 Parameters in the equation(3)(4)

| notation | description | unit |
|------------|-------------------------------|-----------------------|
| V_1 | heater bottle volume | [m ³] |
| V_b | chemical bath volume | [m ³] |
| ρ | density of the chemical | [kg/m ³] |
| C_p | specific heat of the chemical | [J/kgK] |
| q | flow rate of the chemical | [m ³ /sec] |
| α_0 | heat loss coefficient | [1/sec] |

Table2 中の α_0 はシステム全体の放熱量を代表する値であり次式で表わされ、実機試験の結果より得る。

$$\alpha_0 = \frac{P_{ss}}{V_b \rho C_p (T_{ss} - T_r)} \quad (5)$$

ここで P_{ss} , T_{ss} , T_r はそれぞれ平衡点での投入電力、定常時の薬液槽の温度、雰囲気温度を表わす。実機においては α_0 は薬液槽と雰囲気温度の差に依存するが、モデリングでは目標温度近傍では α_0 は一定として考える。Fig. 7 に示すように、(3),(4) 式より求まるそれぞれの伝達関数を結合し、さらに薬液槽の温度 PV を計測するセンサの伝達関数（時定数を T_{sen} [sec] とする一次遅れ系として考える）および循環にかかわる無駄時間 L [sec] を追加してシステム全体を考えると、伝達関数は (6) 式で表わされる。

$$G_p(s) = \frac{\frac{q - \alpha_0 V_b}{\rho C_p}}{(V_1 V_b s^2 + (V_1 + V_b)qs + \alpha_0 V_b q)} \times \frac{1}{T_{sen}s + 1} e^{-Ls} \quad (6)$$

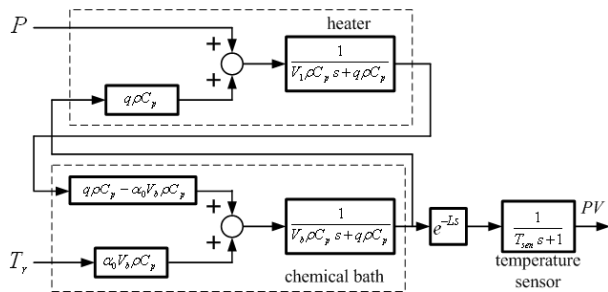
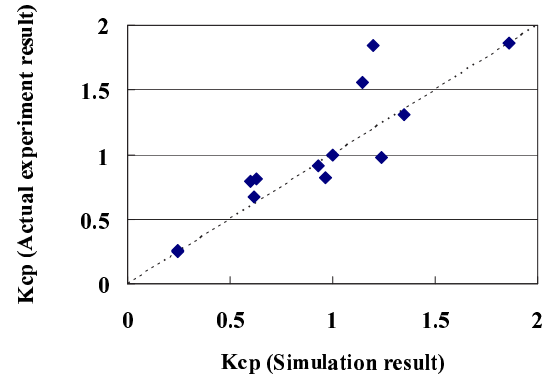


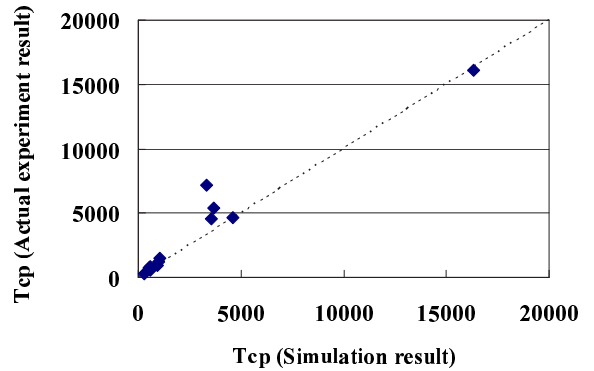
Fig. 7 Whole plant block diagram

このモデルと実機との整合性を確かめるために、後述する実機運転条件中、薬液槽の容積、目標温度、放熱の状況などを変えた 12 の水準について実機テストおよびモデルによるシミュレーションでリレーフィードバックを実施し、得られた擬似限界ゲインおよび擬似限界周期を比較した。Fig. 8 に

示すようにモデルの擬似限界ゲイン、擬似限界周期ともに実機のそれを良く表わしている。



(a) Pseudo-ultimate gain



(b) Pseudo-ultimate period

Fig. 8 Comparison of pseudo-ultimate gain (a) and pseudo-ultimate period (b). X-axis shows the simulated result and Y-axis shows the actual experiment result.

4.2 実験条件および実験水準の計画

実験水準を決定するために、まず実機運転条件の中で実システムの動特性に影響を強く与える条件を抽出し、つぎに抽出された運転条件について想定される範囲内で 3~5 水準を作った。この水準の例を Table 3 に示す。約 1500 水準の中から動特性に近いものを削除し、162 水準を残した。

Table 3 Some test conditions and levels

| condition | level |
|-------------------------------|---|
| set point [°C] | 15, 35, 55, 95, 145 |
| chemical bath volume [L] | 20, 40, 60 |
| heat loss coefficient [1/sec] | $5 \times 10^{-5} \dots 5 \times 10^{-4}$ |
| delay time [sec] | 30, 60, 180 |

4.3 シミュレーション

1) リレーフィードバックシミュレーション

得られた 162 の実験水準についてそれぞれの擬似限界ゲイン、擬似限界周期、加熱時間比を求めるため、MATLAB /

Simulink 上でシミュレーションを行なった。

2) PI コントロールシミュレーション

各水準の擬似限界ゲイン K_{cp} , 擬似限界周期 T_{cp} , 加熱時間比 X を基に PI 制御のシミュレーションを実施した。PI 定数の最適値を探索するために比例ゲイン K_p , 積分時間 K_i を式のように, それぞれ擬似限界ゲイン, 擬似限界周期の定数倍 m, n で表わし, 比例ゲインの水準 8 種類, 積分時間の水準 11 種類の計 88 種類の組み合わせについてシミュレーションを実施した。

$$K_p = K_{cp}/m, \quad m = 1.5, 2.0, 2.5, \dots, 5.0$$

$$K_i = T_{cp} \times n, \quad n = 0.50, 0.75, 1.00, \dots, 3.00 \quad (7)$$

シミュレーションで用いた PI 制御器は実機と同様にアンチウィンドアップ機能として, 操作量が上下限界を超えたときは積分動作を停止させる。シミュレーションでは目標値応答特性と外乱印加時のリカバリー特性を観測した。印加する外乱は通常ステップ状の外乱が使われるが, 薬液槽にウエハを浸漬するプロセスは浸漬後, ウエハ自身も設定温度に収束するので, 時間とともに減衰していく外乱を薬液槽温度に加算した。

温度波形よりオーバーシュート, アンダーシュート, 安定時間, ITAE, IAE 等の性能指標を計測した。さらに, 各コントローラと実験水準のシステムについて次式で表わされる, 感度の最大値 M_s を求めた⁵⁾。ここで $P(j\omega)$ はプラントの伝達関数, $C(j\omega)$ はコントローラの伝達関数を表わす。

$$M_s = \max_{1 \times 10^{-5} < \omega < 1} \left| \frac{1}{1 + P(j\omega)C(j\omega)} \right| \quad (8)$$

M_s はパラメータの変動に対するロバスト性の指標となり, 通常 $1.3 < M_s < 2.0$ が望ましい値とされる。Fig. 9 は 1 水準のシミュレーション結果例である。X-Y 軸は比例ゲイン, 積分時間の組み合わせを示し, Z 軸は ITAE を示す。

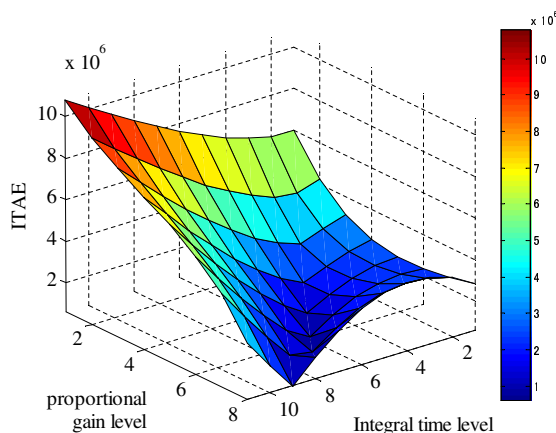


Fig. 9 disturbance profile

4.4 シミュレーション結果の評価

シミュレーションによって得られた性能指標を用いて制御

性能を評価する。各性能指標を正規化し, 目標値応答特性, 外乱応答特性それぞれについて評価関数 J_{set} , J_{dis} を定義する。目標値応答特性ではオーバーシュートが小さく早く安定するもの, 外乱応答ではオーバーシュートが小さく, パラメータ変動に対してロバストなパラメータを選ぶ。

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

$$J_{dis} = \sqrt{w_3 IAE^2 + w_4 M_s^2} \quad (9)$$

ここで w_1, w_2, w_3, w_4 は重みである。各水準のシミュレーション結果でそれぞれの評価関数の値が最小のものを選び出し, これを最適 PI 定数と呼ぶことにする。Fig. 10 は最適 PI 定数の場合と擬似限界ゲイン擬似限界周期をベースとした従来の調整則との目標値応答特性および外乱応答特性の比較である。目標値応答特性では CHR (Chien, Hrones, Rezwik) 法の PI 制御, 外乱応答特性では Z and N (Ziegler and Nichols) 法の PI 制御と比較している。Table 4 に各調整則のパラメータを示した⁷⁾。

Table 4 Ziegler and Nichols, CHR tuning rule.
Kc: ultimate gain, Tc: ultimate period

| tuning rule | P | I | D |
|--------------|--------|--------|---------|
| Z and N: PI | 0.45Kc | 0.83Tc | 0 |
| Z and N: PID | 0.6Kc | 0.5Tc | 0.125Tc |
| CHR: PI | 0.3Kc | 1.0Tc | 0 |
| CHR: PID | 0.45Kc | 0.6Tc | 0.1Tc |

いずれの場合も最適 PI 定数の方が目標値応答ではオーバーシュートが小さく, 外乱応答ではリカバリーが早い。

4.5 調整則の構築

前項で得られた各水準での PI 定数の最適値と加熱時間比との関係から調整則を構築する。Fig. 11 に加熱時間比 X と PI 定数の擬似限界ゲイン, 擬似限界周期に対する倍率 m, n との関係を示す。これより新しい調整則では PI 定数が次式のように加熱時間比 X の関数として表わすことができる。

1) 目標値応答用

$$K_p = K_{cp} / (A_{Kp} e^{B_{Kp} \times X})$$

$$K_i = T_{cp} \times (A_{Ki} e^{B_{Ki} \times X}) \quad (10)$$

2) 外乱応答用

$$K_p = K_{cp} / (C_{Kp} X + D_{Kp})$$

$$K_i = T_{cp} \times (C_{Ki} X + D_{Ki}) \quad (11)$$

ここで K_p は比例ゲイン, K_i は積分時間であり,

$A_{Kp}, B_{Kp}, A_{Ki}, B_{Ki}, C_{Kp}, D_{Kp}, C_{Ki}, D_{Ki}$ は定数である。Fig. 12 は Fig. 10 と同じ実験水準に対して, 提案する調整則を適用した場合の目標値応答特性と外乱応答特性である。調整則で得られた PI 定数は最適 PI 定数の近似値であるためいくつかの水準では性能が悪化している。

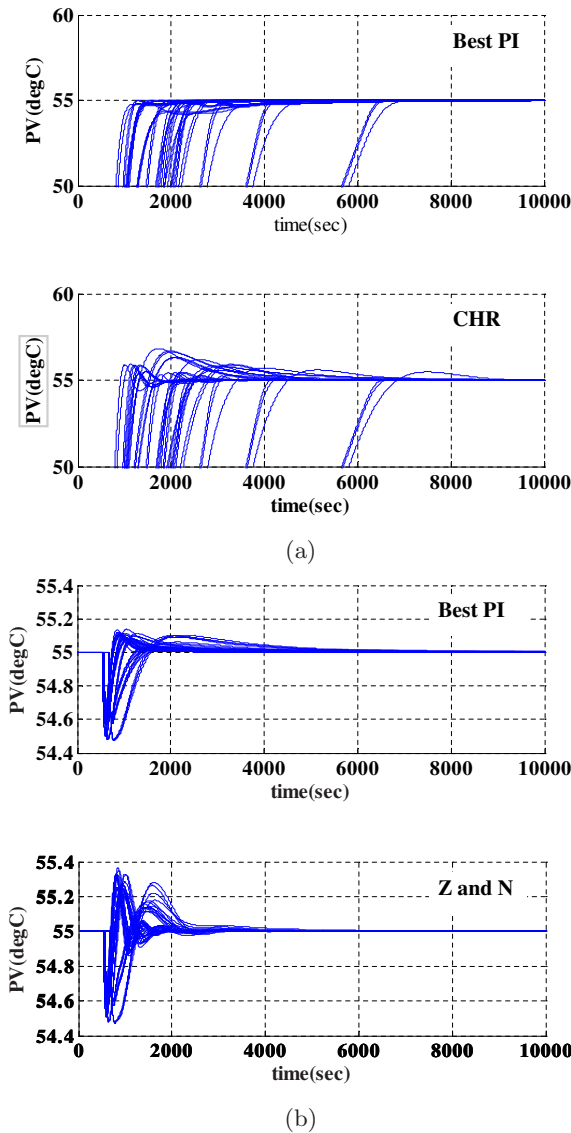


Fig. 10 Comparison of response at SV=55 [°C] (a) Set point response of best PI parameters (top) and CHR (bottom). (b) Disturbance response of best PI parameter (top) and Ziegler and Nichols (bottom).

Fig. 13 では Fig. 12 中の応答速度の異なる 5 種類の目標値応答について抜き出し、制御量と操作量を合わせて示したものである。いずれの場合でも飽和した状態からオーバーシュートの少ない応答となるような操作量が得られている。

Fig. 14 と Fig. 15 は加熱時間比 $X = 0.02, 0.25, 0.50, 0.75$ となる水準における目標値応答特性と外乱応答特性について提案手法と Ziegler and Nichols 法, CHR 法, および Hägglund⁶⁾らによって提案された AMIGOf (Approximate MIGO based on frequency response data) 法を比較したものである。ただし, AMIGOf では調整則にプラントの定常ゲイン, 限界周期の替わりに位相が 135° 遅れる点の周期が必要となり, 通常のリレーフィードバックでは求められないため, ここではプラントの伝達関数から直接計算で求めた値を使用している。提案法では目標値応答には (10) 式による PI

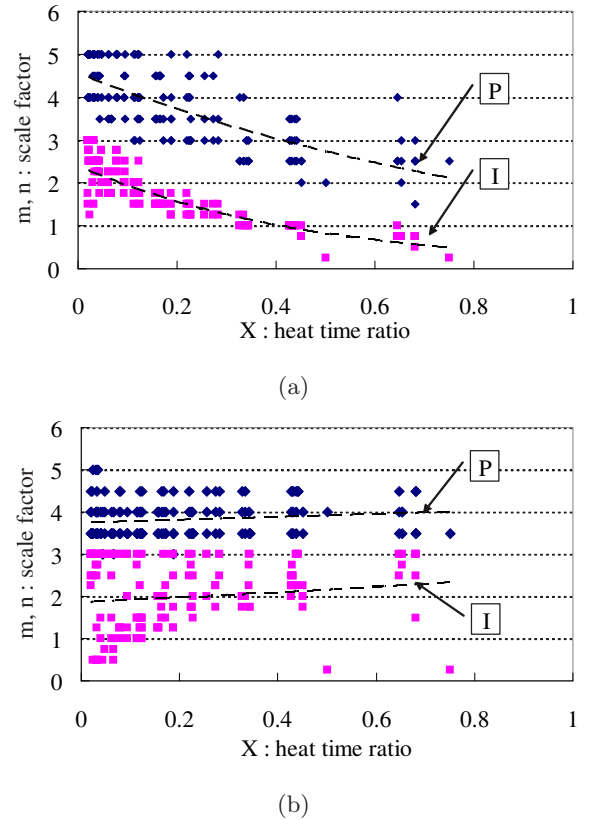


Fig. 11 Relationship between the heat time ratio X and scale factor m, n . (a) set point response and (b) disturbance response

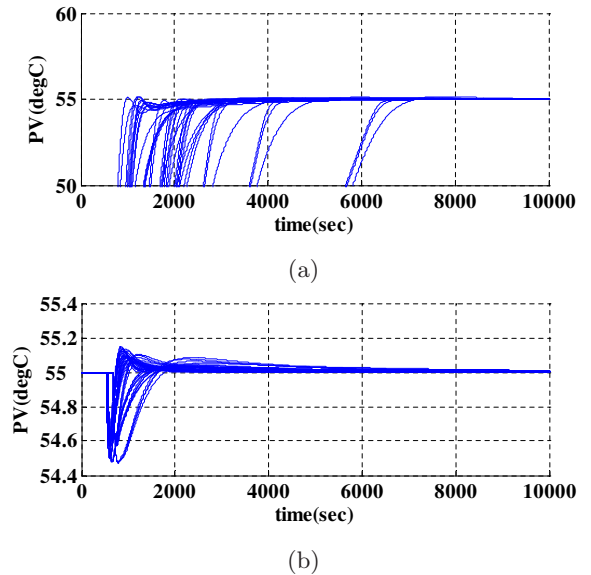


Fig. 12 Responses of the proposed method at SV=55 [°C]. (a) set point response and (b) disturbance response

定数, 外乱応答には (11) 式による PI 定数を使用する。結果から, 提案手法が目標値応答, 外乱応答ともに X の広い範囲で良好な応答を示しているのがわかる。

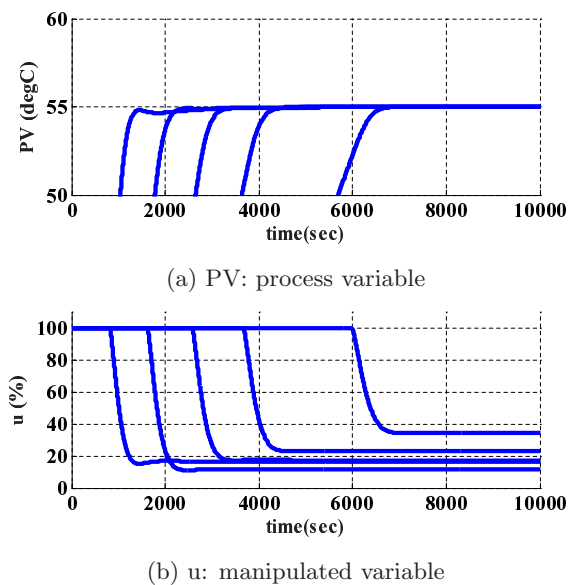


Fig. 13 Set point responses of different response speed

5. 実機による検証

提案する調整則の効果を確認するために、設定温度、薬液槽の容積、放熱状態などを変えた9水準で実機による実験を実施した。結果は目標値応答特性はCHR法と、外乱応答特性はCHR法およびZiegler and Nichols法と比較した。なお実機試験において外乱はウエハ洗浄のパッチプロセスを想定し、50枚の300mmウエハ相当のアルミ板を薬液槽に浸漬した。また薬液は純水を使用した。Fig. 16に実験結果を示す。従来法と比較して提案手法の方がオーバーシュートが少なく外乱のリカバリーも早いことがわかる。以上より提案法が実機に対しても効果があるということが確認できた。

6. 考察 提案法の一般性の検討

実験的に構築した提案法について一般性があるかどうかについて、特に目標値応答用調整則について検討した。一般にプロセス系は高次系であっても無駄時間+1次遅れ系として考えられるものが多いとされている。本研究で扱った非対称プロセスは(6)式で表わされる無駄時間+3次遅れ系であるが、3つの極のうち薬液槽にかかわる極が支配的であり、無駄時間+1次遅れ系と近似できる。そこで無駄時間+1次遅れ系について提案手法がどこまで適用可能かシミュレーションによって調べた。通常、ゲイン K 、時定数 T 、無駄時間 L の無駄時間+1次遅れ系を正規化して扱う場合、 K 、 T を固定値とし、 L/T の水準を作る場合が多い。本研究で扱った非対称プロセスの場合、すでに述べたように、プラントの伝達関数が同じでもゲイン K に対する目標温度 SV の比によって擬似限界ゲイン、擬似限界周期の値が異なるので、 SV/K も水準として考える。 L/T 、 SV/K の水準はつぎの通りであり、合計91水準について考える。

$$L/T = 0.001, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.06, 0.08$$

$$0.09, 0.10, 0.11, 0.40, 0.75, 1.00$$

$$SV/K = 0.025, 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 0.9$$

ゲイン K と時定数 T はそれぞれ $K = 200$ 、 $T = 1600$ とした。それぞれのプラント水準に対してリレーフィードバック法により擬似限界ゲイン、擬似限界周期、加熱時間比を求め、提案法によって比例ゲイン K_p 、積分時間 K_i を求めた。プラント入力 u は $u = 1$ で飽和し、コントローラ側も $u = 1$ で積分を停止するアンチwindアップを備えている。提案法で得た K_p 、 K_i による目標値応答のシミュレーション後、提案法で得た K_p に対してオーバーシュートが小さく整定が早いより最適な K_i を選び出すため、同シミュレーションを実施した。提案法で得られた積分時間および最適積分時間をプラント時定数 T で除したものを L/T の水準別にプロットしたものの一例をFig. 17(a)~(f)に示す。この結果からつぎのことが言える。

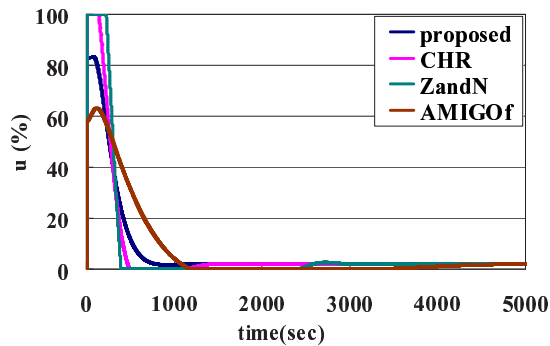
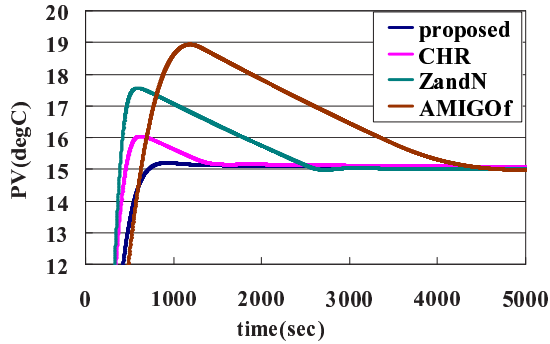
1) 目標値応答に対する提案法は $L/T < 0.1$ の範囲でオーバーシュート3%以下の応答が得られる。ただし $K_i/T > 1$ になると整定時間が悪化し、そのときの最適積分時間はプラント時定数 T に等しい。

2) $L/T > 0.1$ を超えると SV/K の小さい方から応答は悪化し、 $L/T = 1$ に近づくにつれて提案法では最適値が求められなくなる。

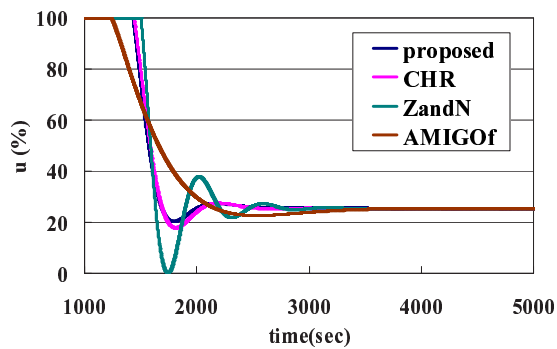
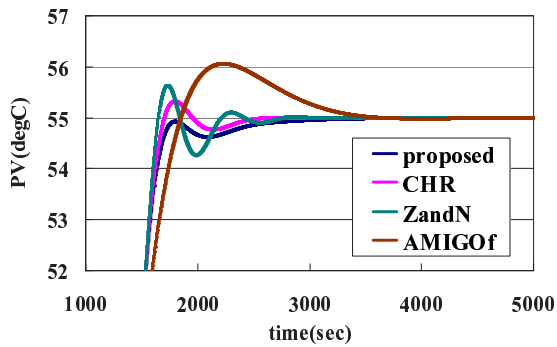
3) プラントの情報としてあらかじめ T 、 L がわかっているならば L/T をパラメータとしてより最適な調整則が構築できる。

7. 結 言

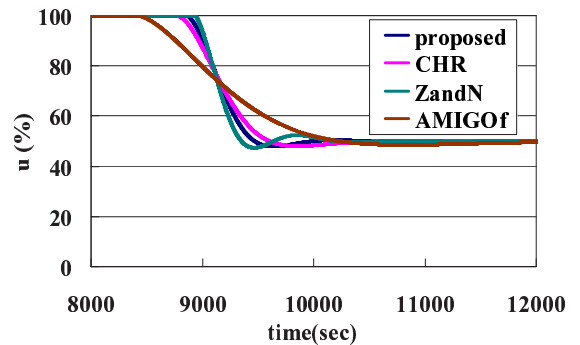
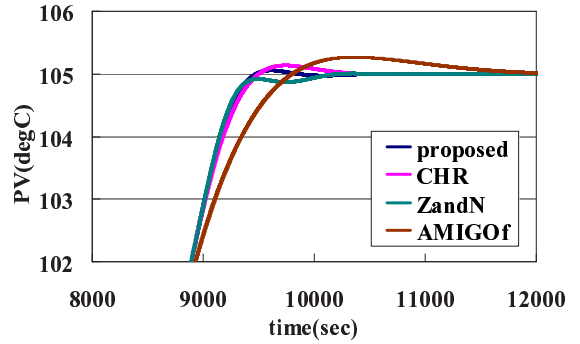
本研究では積極的な冷却手段を持たない加熱プロセスのような非対称プロセスに対するPIコントローラ調整則を実験的に構築し、提案した。提案する調整則では加熱時間比というパラメータを導入しその有効性を確認するために、循環加熱システムを用いた実機に本調整則を適用した。従来法と比較して目標値応答特性ではオーバーシュートがより小さく、外乱応答特性ではより早くリカバリーできることを確認した。提案する調整則は既存のリレーフィードバック法がそのまま使用でき、アクチュエータ飽和も考慮されたコントローラに対する調整則なので実用的である。本調整則が同種の非対称プロセスに普遍的に使えるPID調整則であるかどうか、その可能性を無駄時間+1次遅れ系について考察した。その結果、目標値応答に対して本調整則(9)を適用できるプロセスは、1) 無駄時間+1次遅れ系に近似可能で、2) $L/T < 0.1$ を満たし、3) 目標値応答時に操作量を飽和させて使用するようなプロセスである。



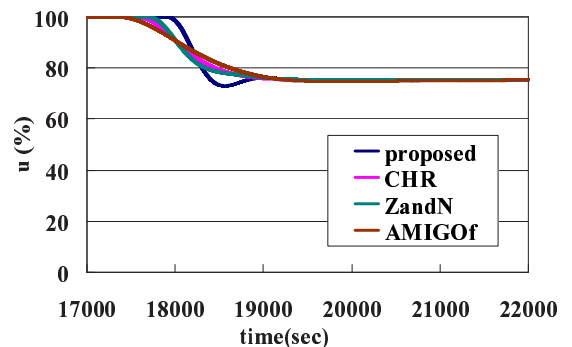
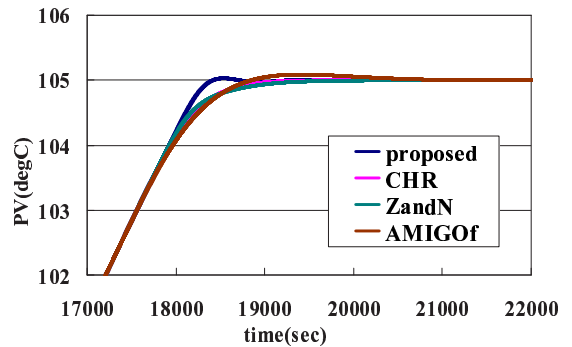
(a) $X = 0.02$



(b) $X = 0.25$



(c) $X = 0.50$



(d) $X = 0.75$

Fig. 14 Comparison of set point response between proposed tuning rule and other tuning rule with different heat time ratio. ZandN: Ziegler and Nichols rule, CHR: Chien, Hrones, and Reswik rule and AMIGOf: rule proposed by Hägglund and Åström.

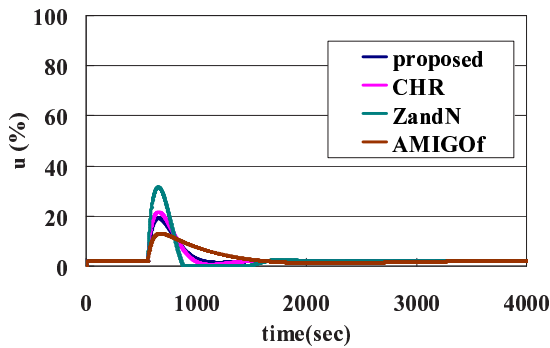
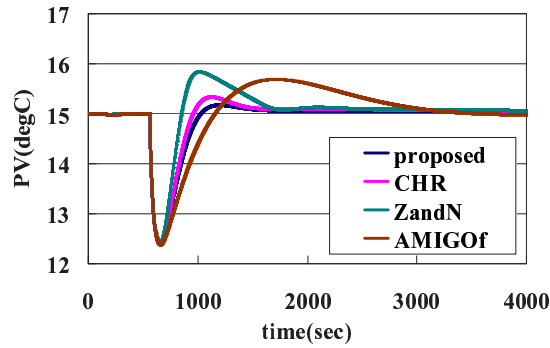
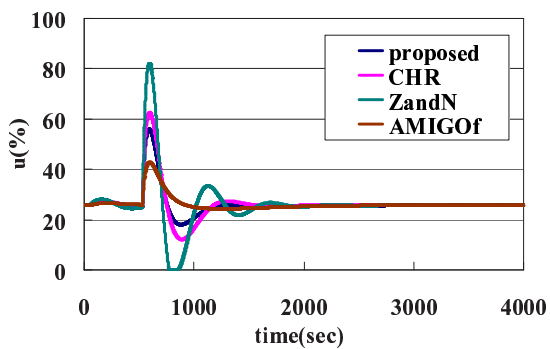
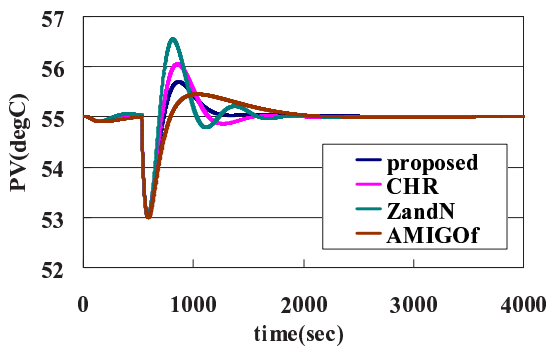
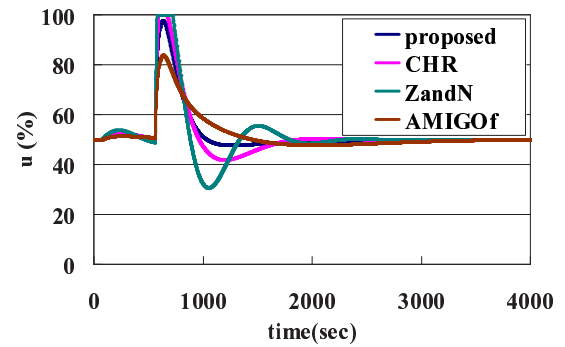
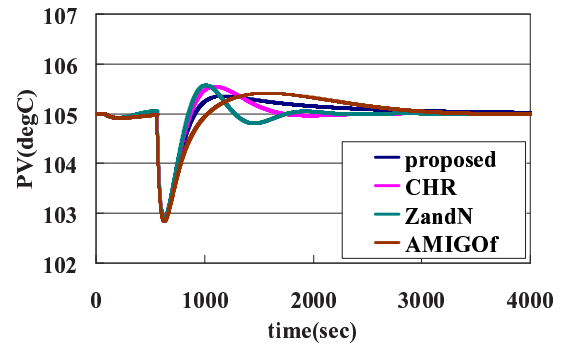
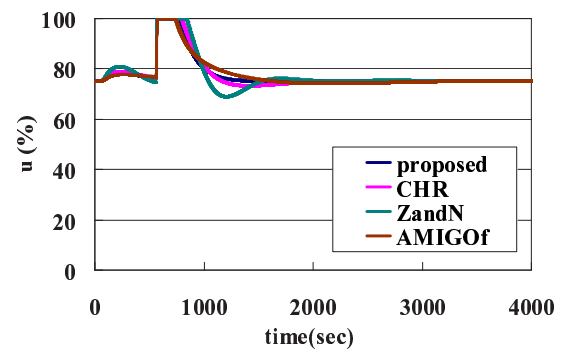
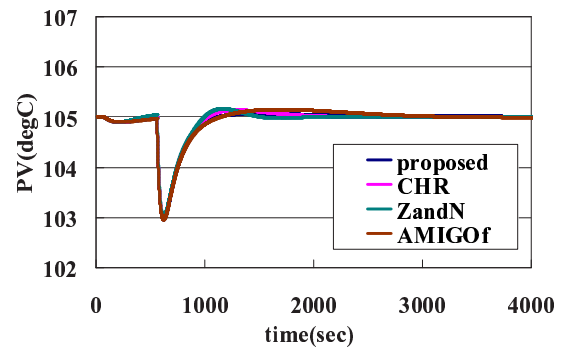
(a) $X = 0.02$ (b) $X = 0.25$ (c) $X = 0.50$ (d) $X = 0.75$

Fig. 15 Comparison of disturbance response between proposed tuning rule and other tuning rule with different heat time ratio. ZandN: Ziegler and Nichols rule, CHR: Chien, Hrones, and Reswik rule and AMIGOf: rule proposed by Hägglund and Åström.

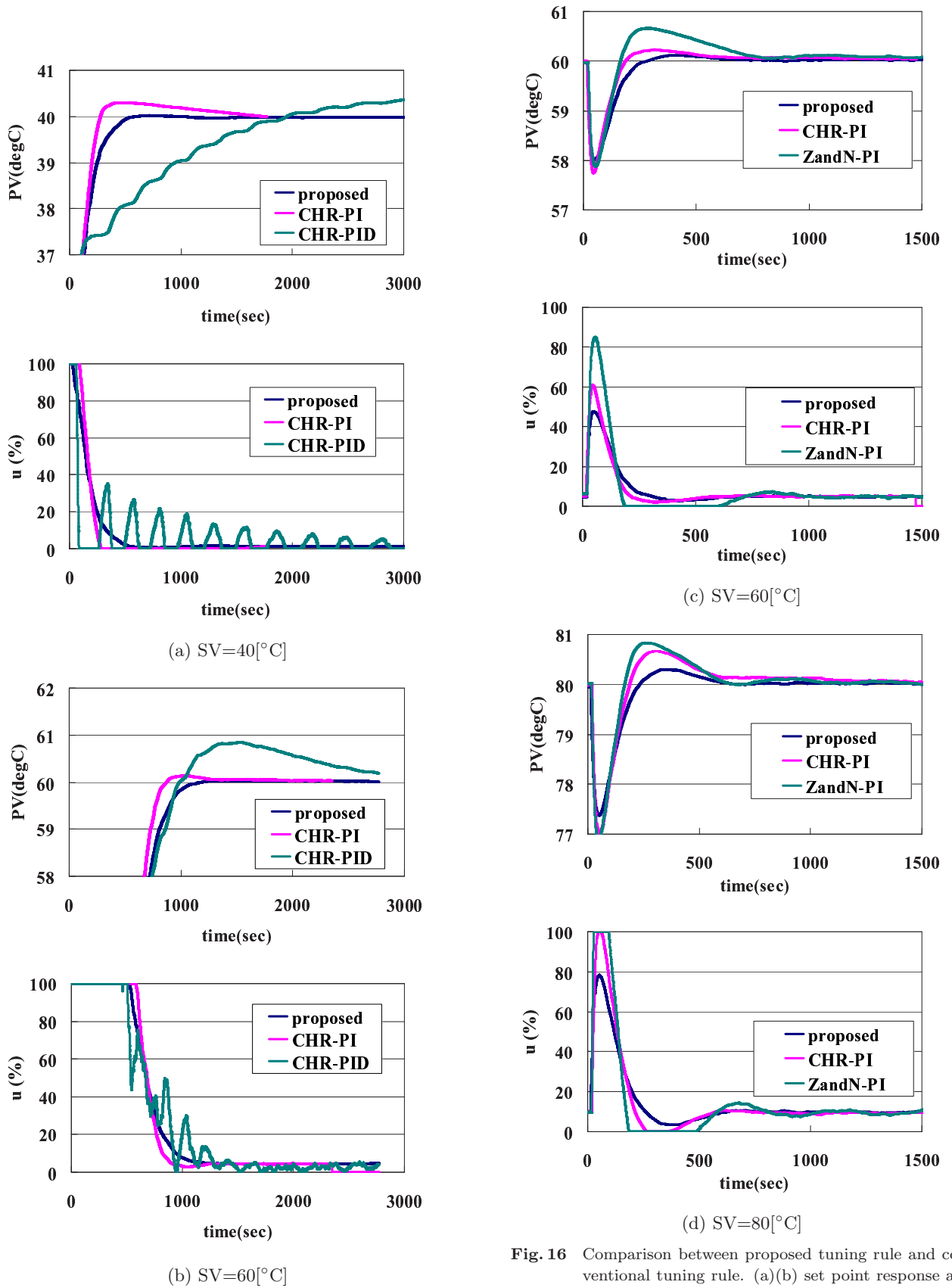


Fig. 16 Comparison between proposed tuning rule and conventional tuning rule. (a)(b) set point response and (c)(d) disturbance response. ZandN: Ziegler and Nichols rule and CHR: Chien, Hrones, and Reswik rule

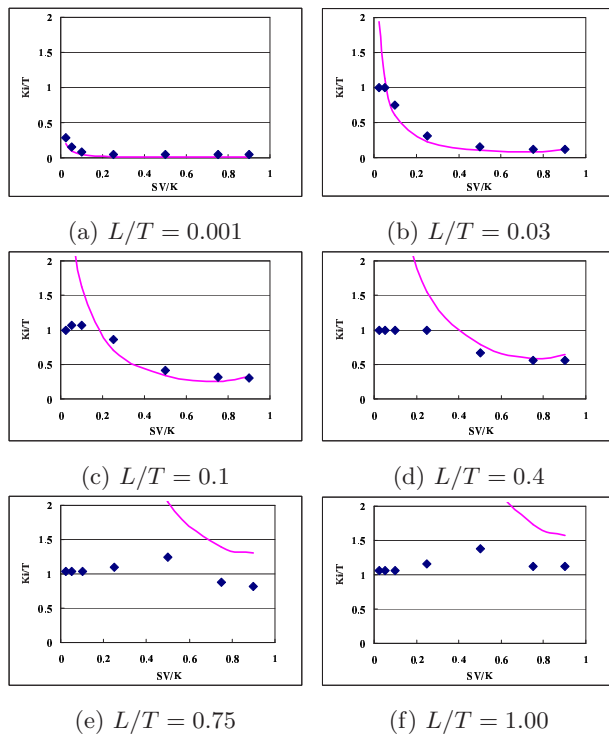


Fig. 17 Comparison of proposed method (solid line) and best PI parameter (dot)

参考文献

- 1) K. J. Åström and T. Hägglund: Automatic tuning of simple regulators with specification on phase and amplitude margins, *Automatica*, **20**, 645/651 (1984)
- 2) T. Hägglund and A. Tengvall: An automatic tuning procedure for unsymmetrical processes, *ECC 95*, 2450/2455, Rome, Italy (1995)
- 3) Q. G. Wang, C. C. Hang and W. Zou: Automatic tuning of nonlinear PID controllers for unsymmetrical processes, *Computers chem. Engng*, **22**, NO.4/5, 687/694 (1998)
- 4) K. K. Tan, Q. G. Wang, T. H. Lee and C. H. Gan: Automatic tuning of gain-scheduled control for asymmetrical processes, *Control Engineering Practice*, **6**, 1353/1363 (1998)
- 5) K. J. Åström and T. Hägglund: PID Controllers: Theory, Design, and Tuning, 2nd ed., 125/127 ISA (1995)
- 6) T. Hägglund and K. J. Åström: Revisiting the Ziegler-Nichols tuning rules for PI control-Part II The frequency response method, *Asian journal of control*, **6-4**, 469/482 (2004)
- 7) 須田: PID 制御, 朝倉書店, pp167 (1992)

[著者紹介]

三村和弘(正会員)



1983年大阪府立大学工学部機械工学科卒業。同年コマツに入社。1992年コーネル大学大学院機械工学科修士課程修了。2001年より KELK 機器開発部。現在熊本大学自然科学科博士後期課程に在籍。半導体製造装置用温調機器の開発に従事。

汐月哲夫(正会員)



1983年東京工業大学大学院理工学研究科制御工学専攻修士課程修了。同年熊本大学助手。89年助教授。2008年10月東京電機大学未来科学部教授。現在に至る。制御理論とその応用、線形システム理論、情報通信と制御工学、力覚情報通信などの研究に従事。工学博士。システム制御情報学会、日本機械学会、情報処理学会、日本ロボット学会、IEEEなどの会員。