

PID制御の新しいアプローチ

— 傾斜温度制御法とその効果について —

オムロン（株）南野 郁夫／安藤 功策／板野 泰次

1. はじめに

近年、FPD製造装置や半導体製造装置、包装機、成形機などの熱処理装置において、熱処理の高品質化が強く要請されており、個々の点における温度制御のみならず「面における温度の均一化」が重要課題となっている。中でも過渡状態における熱処理の不均一性は製品の品質に大きく影響する。この問題に対し弊社では、「傾斜温度制御法」^{1), 2), 3)}という新しい制御法を開発して、複数点間の温度傾斜（温度差）を直接制御することで各点の温度干渉を低減化することを可能とし、温度調節器「形E5ZN」などに搭載した。今後も更にPLC計装にも展開していく予定である。

本文では、まず2章で傾斜温度制御法を研究開発する背景となった過渡的不均一性の課題を述べ、3章で傾斜温度制御法の原理について解説する。次に、4章で面上に分布するヒータに対する面内温度均一制御実験結果を述べ、傾斜温度制御法の有効性を示す。

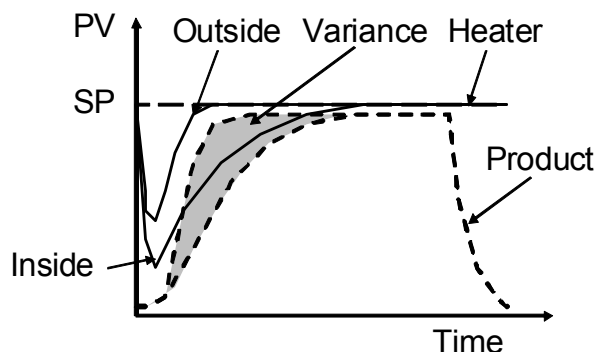
2. 過渡的不均一性の課題

FPD製造装置や半導体製造装置、包装機、成形機などでは、熱処理の高品質化要求が極めて高い。例えば大面積フィルムをシールする包装機の場合、シーラの過渡的な温度分布の不均一性が原因で製品歩留まりが悪化する傾向にある。このような面内での温度の不均一さは定常状態と過渡状態ともに見られる。前者は、一般にヒータと計測制御装置の個体差により発生するもので、計装設計によりかなりの対応が可能である。

これに対し、後者はヒータと被加熱物体間の熱伝導により熱移動が発生する場合に生ずる。例えば、平面での熱処理において、加熱板の外側がフレームに固定されると、外周側は内側よりも大きな熱容量となる。その状態で加熱板に製品が接触すると、熱容量の差から加熱板の内側と外周側で温度差が過渡的に生じる。

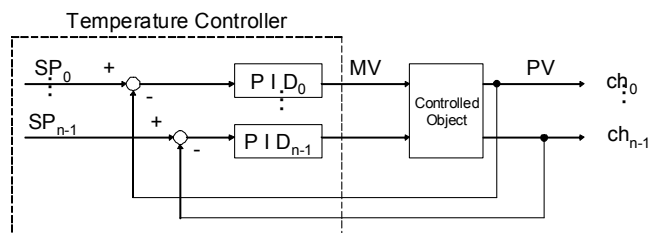
図1はある製品上の温度差の様子を示す。図にお

いて実線が加熱板の温度、破線が熱処理される製品の温度を表す。目標温度（SP）に制御されている加熱板に、室温状態の製品が接触すると、加熱板温度は瞬間的に低下し、外乱応答が発生する。このときの加熱板の外周側（Outside）の温度低下量が、熱容量の差などから内側（Inside）に比べ小さくなる。この加熱板の過渡的な温度差が製品に転写され、製品の面内温度の不均一性（Variance）が生じる。特に加熱面が広くて、熱容量差の大きい場合にこの現象が顕著になり、制御系での改善が必要になる。



（図1 製品上の温度差）

従来、熱処理装置では多点温度制御法が多く使用されており、図2に示すように、PIDコントローラを用いてチャンネルごとにフィードバックを施す制御構造となっている。しかし、この方式では、あるチャンネルの制御において他のチャンネルの操作量そのものが外乱となるので、定常状態で十分な均一特性が得られても、過渡状態での温度均一性は保証されない。したがって、相互干渉の大きい多点温度制御系のパラメータ調整は困難を極めており、試行錯誤にならざるを得ない。



（図2 従来制御のブロック線図）

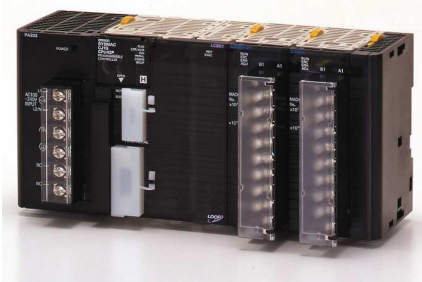
他方、各チャンネルの相互干渉をデカップラにより取り除く非干渉制御法が提案されているが⁴⁾、動特

性までの非干渉化を行う場合は予測項を内包する必要があり、パラメータ誤差によりかえって悪化するケースも報告されている³⁾。そのため、実際のアプリケーションでは、比較的低周波領域での部分非干渉化あるいは定常非干渉化の手法が用いられることが多い。なお、動的な非干渉化が実現できたとしても各チャンネルの応答波形が異なるため、過渡状態での温度均一化のためには各チャンネルでのパラメータ調整が求められる。

これらの課題を克服すべく、弊社では「傾斜温度制御法」という新しい制御法を開発して、同技術を搭載した温度調節器「形E5ZN-DRT-309」と「形E5ZN-309」を発表した。新しい温度調節器の外観を写真1に示す。また、写真2に同技術を搭載する予定のPLC計装の外観を示す。



(写真1 温度調節器形E5ZN-DRT-309と形E5ZN-309の外観)



(写真2 PLC計装ユニット(CJシリーズ)ループCPUユニット外観)

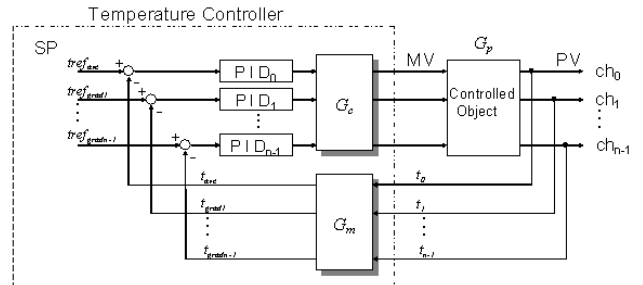
3. 傾斜温度制御法の原理

本節では、熱干渉系における「面における温度の均一化」をはかるために、弊社が開発した「傾斜温度制御法」の原理とその物理的な解釈について概説する。また次章で本手法の性能効果実験を述べる。

3.1 傾斜温度制御系の構成

傾斜温度制御系の基本的な構造を図3に示す³⁾。温度調節器はPIDコントローラをモード変換器 $G_m \in R^{n \times n}$ と前置補償器 $G_c \in R^{n \times n}$ で前後からはさみ込ん

だ構造になっている。ここで、 n は制御対象の制御点数である。モード変換器は各チャンネルの温度から平均温度と傾斜温度へ変換するもので、これら2つの温度を制御量としてPID制御を行い、前置補償器で操作量を適切に分配して各ヒータを動作させる機構となっている。

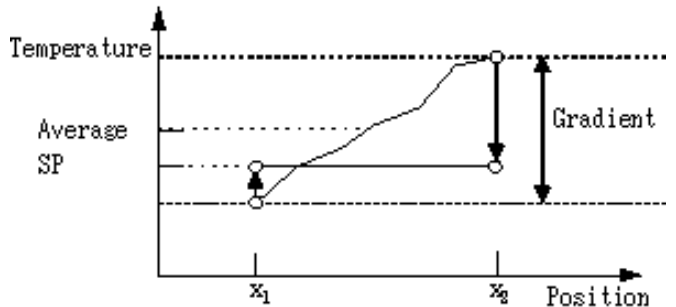


(図3 傾斜温度制御法のブロック線図)

3.2 傾斜温度制御系の設計

制御系の目標値は制御量の意味に合わせて、平均温度と傾斜温度で与えられる。このとき、モード変換器と前置補償器は以下のように設定される。

まず簡単に理解するため、温度計測点が2点の場合の図4を考えてみる。



(図4 温度の平均と傾斜)

2点における温度を設定値SPに等しくするためには、2点の平均温度と傾斜温度を求め、例えば現在の温度の平均 (Average) がSPに等しく、傾斜温度 (Gradient) がゼロとなればよい。そこで、一般に計測点 x_i における温度を t_i とすると、全体の平均温度と隣接点間の傾斜温度は

$$t_{ave} = \sum_{j=0}^{n-1} t_j / n \dots\dots\dots (1)$$

$$t_{grad} = [t_{grad1} \quad t_{grad2} \quad \dots \quad t_{grad,n-1}] \\ = [t_1 - t_0 \quad t_2 - t_1 \quad \dots \quad t_{n-1} - t_{n-2}] \dots\dots\dots (2)$$

で表される。この場合、モード変換器 G_m は次のように決定できる。

$$G_m = \begin{bmatrix} 1/n & 1/n & 1/n & \cdots & 1/n \\ -1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

次に前置補償器は、文献3)に従って次のように設計される。まず、各ヒータに順次ステップ状の操作量を印加したときの応答波形から制御対象の伝達特性 G_p を同定する。この制御対象の伝達特性 G_p と前項で決定したモード変換器 G_m を用いて、前置補償器 G_c を次式で定める。

$$G_c = (G_m \cdot G_p)^{-1} \dots\dots\dots (4)$$

上式は、制御対象にモード変換器を付加した特性を拡大制御対象と考え、これを非干渉化することを意味している。すなわち、図3において前置補償器からモード変換器までを擬似的に非干渉化したことになる。

なお(3)式において G_m は一意でなく(2)式においてどのチャンネル間の温度差を取るかに依存し、(4)式で $G_c \cdot G_p$ が正則となる場合、傾斜温度制御系が構成できる。また、特に過渡現象での均一化を目的とするならば、過渡状態を重視した G_p におけるゼロクロス周波数近辺での定係数マトリックスを用い、低周波領域はPID制御の特性に委ねる方ができる。なお、PIDコントローラの各パラメータは非干渉化した拡大制御対象のステップ応答におけるむだ時間Lと最大温度傾斜Rを計測し、Ziegler and Nichols などの調整則⁴⁾を用いて定めるとよい。

4. 温度制御実験（平面状の対象）

本手法のターゲットは面における温度の均一化であるので、次に平面状に配置された熱源に対する傾斜温度制御法の有効性の検証を試みた結果を延べる。なお、本検証においては、実際に傾斜温度制御法を搭載した商品形E5ZN-DRT-309と形E5ZN-309を用いた。

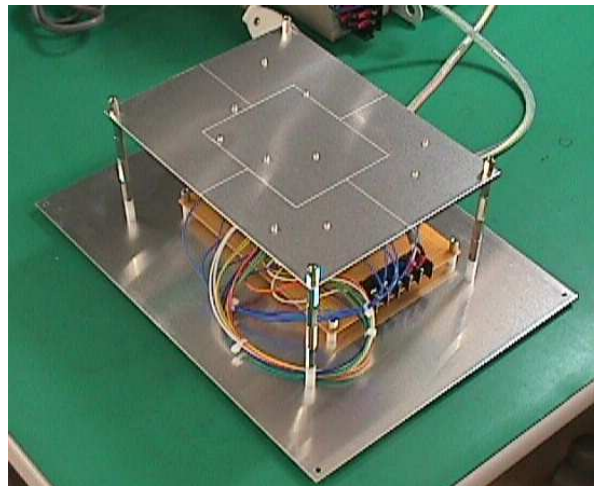
4.1 温度調節器の構成

温度調節器は、1ブロックにつき2ループの入出力を有する形E5ZN-309を接続することにより傾斜温度制御の機能を発揮する。また、形E5ZNを連結することで最大10ループ（5台連結）の温度制御が可能であり、多点ヒータの入出力に応じてフレキシブルに増減できる。ただし、1台の形E5ZN-DRT-309

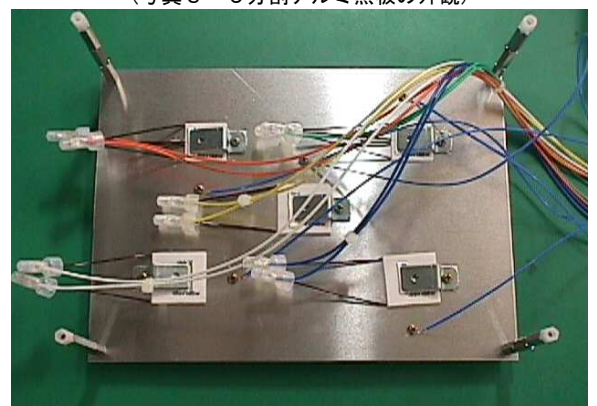
には、最大5台の形E5ZN-309を接続できる。製品仕様を付録に示す。また、傾斜温度制御法は、汎用性の高いPLC（CJシリーズ ループCPUユニット、写真2）にも展開していく予定である。

4.2 実験評価用制御対象

平面状に配置されたヒータに対する傾斜温度制御の面均一性能を評価するために、写真3に示すような5つのセラミックヒータが面内に配置された熱板を用いた。この5分割アルミ熱板は、ヒータ間で強い干渉を有するため、隣接するヒータの熱が外乱となり制御性能を悪化させる要因となっている。また、このアルミ熱板の裏側の概観は写真4のようになっているおり、5分割された熱板の裏にそれぞれセラミックヒータが配置されて、それぞれのヒータの近隣に一つずつ温度センサ（K熱伝対）が配置されている。



(写真3 5分割アルミ熱板の外観)



(写真4 5分割アルミ熱板のヒータ配線[裏側])

4.3 温度調節器のチューニング手順

本実験で使用した温度調節器は傾斜温度制御の各パラメータを自動でチューニングする機能を搭載している。すなわち、ヒータやセンサを配線後、

傾斜温度制御パラメータの自動チューニングを実行することにより、前置補償行列 G_c および各ループのPIDゲインなどが自動算出される。なお、この自動チューニングは常温において実施するものとする。

(注：以降掲載するグラフは、弊社温度調節器形E5ZN-DRT-309の開発途中の実験機を使って測定したデータで作成されている。)

写真3の5分割アルミ熱板に対して、傾斜温度制御用パラメータ自動チューニングを実行したときの温度波形と制御出力波形を図5に示す。図に示すように、自動チューニング時にはチャンネルごとに100%のパルス形状の操作量MV（制御出力）がヒータに印加される。このとき、各チャンネルの温度が上昇するが、熱干渉のためパルス状出力を印加したヒータに隣接するヒータの温度も上昇する。傾斜温度制御を搭載した温度調節器は、各パルス状出力印加時の各チャンネルの温度波形から、それぞれのヒータ間の干渉具合を測定する。そして、この測定結果から前置補償行列が自動算出される。また、各チャンネルのPIDゲインも同時に自動算出される。

上記のパラメータ自動チューニングに要する時間は、制御対象の動特性速度およびチャンネル数に依存し、動特性が遅くなるほど、またチャンネル数が多くなるほどチューニング時間が多くかかる。今回の5分割アルミ熱板の場合は約10分ほどでチューニングが完了した。

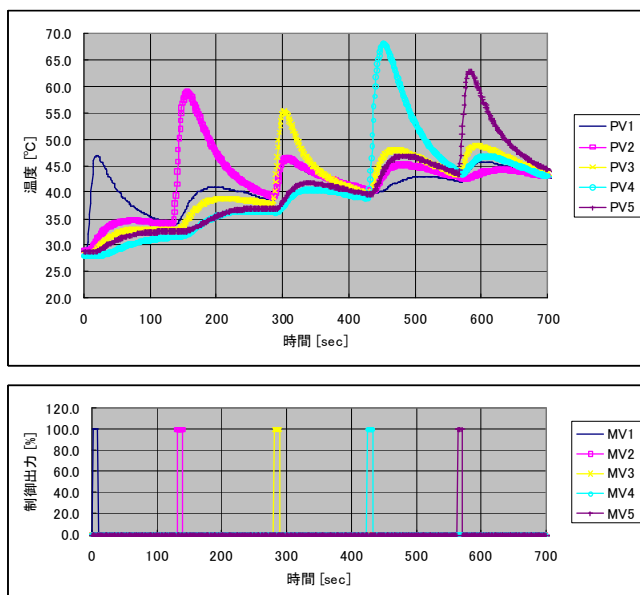


図5 自動チューニング時の温度と制御出力波形

4.4 評価実験の結果

傾斜温度制御による目標値応答の温度波形を図6に示す。設定温度は150°Cとし、傾斜温度制御の各パラメータは前述の自動チューニングにより算出されたものである。図より、傾斜温度制御は面における温度の均一化に効果があることが分かる。

次に、傾斜温度制御の性能を他の制御手法と比較評価するため、従来のPID制御による制御実験を実施した。ここで、従来のPID制御とは従来の温度調節器で使われてきた2自由度PID制御により各チャンネルに対して独立したループで制御する方法である。従来の2自由度PID制御を搭載した温度調節器を接続し、ループごとにオートチューニングを実行した結果で目標値応答を測定した。図7にその目標値応答波形を示す。

図6と図7の比較により、従来のPID制御は過渡時に5点の温度が不均一になっているのに対し、傾斜温度制御は5点の温度が均一になっていることがわかる。

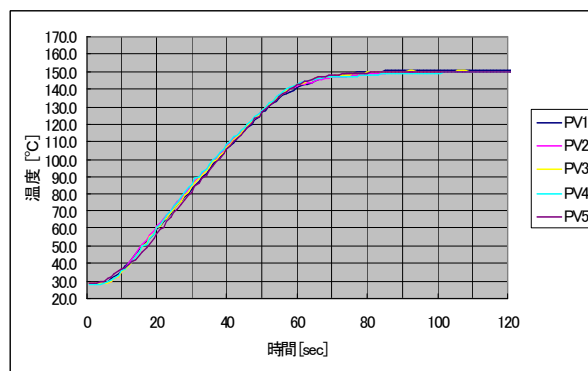


図6 傾斜温度制御の目標値応答波形[5分割アルミ熱板]

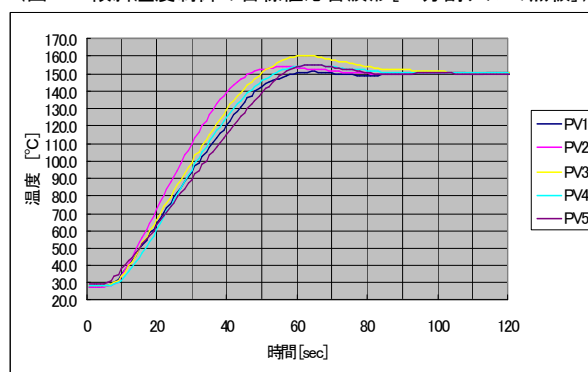
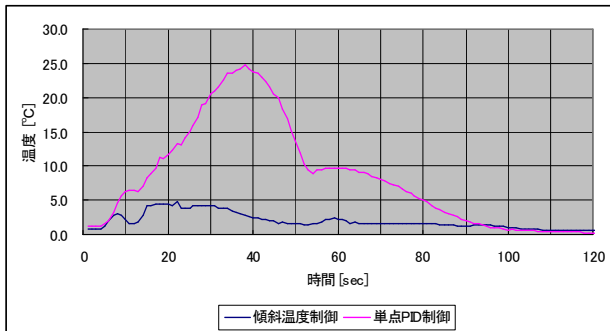


図7 従来のPID制御の目標値応答波形
[5分割アルミ熱板]

また、傾斜温度制御と従来のPID制御のそれぞれの面内均一性能を定量的に比較するために、各時刻における面内の温度差（5点の最大温度と最小温度の差）を算出した結果を図8に示す。図より、従来のPID制御は面内で最大25°Cほどの温度差が

生じているのに対し、傾斜温度制御では最大5℃以内であるので、約5分の1に抑制できていることがわかる。



(図8 傾斜温度制御と従来のPID制御の面内温度差の比較)

5. おわりに

温度調節器メーカーから見たPID制御の新しい制御手法として、傾斜温度制御の概要と搭載商品を紹介した。さらに、平面状に配置されたヒータに対して、傾斜温度制御と従来のPID制御を用いて温度制御評価を示した。その結果、傾斜温度制御の方が、従来のPID制御に比べて面均一性能の改善(温度差を5分の1に抑制)が確認できた。これにより、傾斜温度制御は複数チャネルの温度干渉が2次元的に複雑に絡み合う制御対象において、十分に効果を発揮できることを示した。

今後も、温度均一などの温度調節器メーカーに与えられた技術課題について、深く研究開発し、温度調節器を通じて社会に貢献していきたい。

なお、本文で紹介した傾斜温度制御法は、2003年度計測自動制御学会学術賞(技術賞)を受賞したことをここにご紹介する。

最後に、日頃よりご指導いただいている熊本大学工学部の川路茂保教授ならびに松永信智助教授にこの場を借り深謝の意を表す。また、本研究開発において実験や討論においてご協力いただいたオムロン(株)田中政仁氏に感謝する。

<参考文献>

- 1) 南野郁夫・塚部智之・松永信智・川路茂保：「熱干渉系に対する傾斜温度制御法」, SICE99, 盛岡, pp.723-724 (1999-7)
- 2) 南野郁夫・田中政仁・松永信智・川路茂保：「傾斜温度制御法の過渡的均一性能：実験的検証」, SICE2000, 飯塚, 104D-4 (2000-7)
- 3) 南野郁夫・田中政仁・松永信智・川路茂保：「温度均一化を目的とする傾斜温度制御法の開発」, 電気学会論文誌C, Vol. 122-C, No. 11, pp.1954~1960 (2002-11)
- 4) 須田信英：「PID制御」, 朝倉書店 (1992)
- 5) 橋本伊織ほか：「プロセス制御工学」, 朝倉書店(2002)

- 6) 田中政仁・南野郁夫・松永信智・川路茂保：「温度均一化を目的とする傾斜温度制御法の効果分析」, 平成15年電気学会電子・情報・システム部門大会, OS6-6, pp.416~419 (2003-8)
- 7) J. M. Maciejowski: "Multivariable Feedback Design", Addison Wesley (1989)
- 8) 末永祥健・松永信智・川路茂保：「傾斜温度制御法による熱干渉系の面温度均一化」, 第22回SICE九州支部学術講演会, pp.243-246 (2003-12)
- 9) 伊藤正美：「自動制御概論〔上〕」, 昭晃堂 (1992)
- 10) 南野郁夫・田中政仁・松永信智・川路茂保：「温度均一化を目的とする傾斜温度制御法の効果分析」, 電気学会論文誌C, Vol. 124, No. 8, pp.1606~1612 (2004-8)
- 11) 田中政仁・南野郁夫・田中均・岸元武史・坪井和生：「温度均一化を目的とする傾斜温度制御の効果について 温度調節器形E5ZN-DRT(傾斜温度制御搭載版)の開発」, OMRON TECHNICS Vol. 44, No. 2, pp.122~115 (2004)

ナノ イクオ
 アンドウ コウサク
 イタノ タイジ
 オムロン(株) コントロール機器統轄事業部
 アナログコントローラ事業部商品開発部