A New Model with Feedback Structure for Thermal Process and its Application to Decoupling Control

Nobutomo Matsunaga Member (Kumamoto University, matunaga@cs.kumamoto-u.ac.jp)

Ikuo Nanno Member (Omron Corporation, ikuo_nanno@omron.co.jp)

Shigeyasu Kawaji Senior Member (Kumamoto University, kawaji@cs.kumamoto-u.ac.jp)

Keywords: feedback structure, blackbox model, thermal interaction, decoupling control, cell model

Recently, advanced manufacturing processes including those for flat panel displays (FPDs), semiconductor devices, and precision moldings, require highly accurate temperature control due to the increased demands of further miniaturization of circuit pattern and of larger thermal operation areas. In these manufacturing processes, uneven temperature distribution will not only deteriorate the electrical quality of the products, but also may lead to mechanical deformation or breakdown including warping or cracks in the product. For example, in thermochemical reactions involved in insulator layers in semiconductor devices, the layer thickness is determined by duration in which the silicon plate stays in the temperature target range where the reaction is stimulated. Thus, the maintaining an uniform temperature is required not only in the steady-state, but also in the transient state. Therefore, to control the multiple heated plate, modeling and design technique of the controlled object will be important.

This paper proposes a new model that explicitly represents thermal interference with temperature distribution in order to serve the purpose of controlling transient responses. It also proposes a decoupling scheme using the proposed model and applies to the experimental system.

Fig.1 shows a new thermal model which is derived from physical property of the thermal process, and which the temperature difference is fed back to the input via β . This means that the model explicitly includes thermal interference involved in the thermal process. We call this model “the temperature difference model (TDM)”.

Fig.1. Block diagram of temperature difference feedback model

Fig.2 shows the effectiveness of the new decoupler based on the proposed model. For comparison, the traditional decoupling controller based on the black-box model is used. The figure demonstrates that the proposed TDM exhibits decoupling performance superior to that of the traditional method. And, Fig.3 shows the FEM simulation of the temperature distribution at 2740[s] using the proposed scheme on the heating plate.

It will be expected that a new model with feedback structure for thermal process in this paper is extremely useful for actual applications.

Fig.2. Comparison of response using decoupling control

Fig.3. Temperature distribution using the proposed scheme

熱系のフィードバック型モデルと非干渉制御への応用

正 員 松永 信智* 正 員 南野 郁夫**
上級会員 川路 茂保*

A New Model with Feedback Structure for Thermal Process and its Application to Decoupling Control

Nobutomo Matsunaga*, Member, Ikuo Nanno**, Member, Shigeyasu kawaji*, Senior Member

In thermal processes, thermal distribution on the conduction surface is observed in both steady state and transient state. Uniform temperature control is required in many industrial application fields for quality improvement. For thermal plant with strong interference, decoupling controller using black-box model based on input-output relations has been applied. In this paper, a novel cell model with feedback structure which describes the thermal interaction explicitly is derived, and its application to a new decoupling control is proposed. First, uniform cell model is considered based on physical energy, and is applied to experimental plant. The thermal distribution is simulated by the FEM method. Secondly, design of decoupling controller using the proposed cell model is shown, and the effectiveness is evaluated.

キーワード：フィードバック構造，ブラックボックスモデル，熱干渉，非干渉制御，セルモデル

Keywords: feedback structure, blackbox model, thermal interaction, decoupling control, cell model

1. はじめに

近年，フラットパネルディスプレイ (FPD) や半導体，精密成形などの最先端の製造プロセスでは，精細化・微細化と大面積化が進むにつれ，高精度な温度制御が求められている。このような製造プロセスにおいては被加熱対象の温度むら，製品の電氣的品質を低下させるだけでなく，製品の反りやクラックなど機械的な変形や破壊を発生させる原因となる。特に，半導体の絶縁膜生成における熱化学反応では，反応が促進する温度帯の滞在時間で膜厚が決まるため，定常状態での温度均一性だけでなく，反応領域にある過渡状態での温度均一性も求められ，熱干渉の解消が高性能化の鍵になる⁽¹⁾。

このような問題に対する解法として，ヒータを複数配置して多点で加熱制御を行うことで相互干渉を除去する手法が用いられている。この際，制御系設計において入出力関係に基づいた伝達関数モデルがしばしば用いられるが^{(2)~(6)}，

対象物の大面積化に伴い熱分布が複雑となり，過渡応答の特性調整は困難を極める。従って，多点の制御入力を有する制御対象のモデリングと制御手法が極めて重要になる。温度分布を有する制御対象は本質的に分布定数系で表現されるべきであるが，偏微分方程式によるモデリングは煩雑な作業を余儀なくされる。また，導かれた動特性のモデル⁽⁷⁾⁽⁸⁾はきわめて複雑なため，実際の制御系設計に適用することは困難な場合が多い。このような背景から，産業応用を中心とした現場では，制御対象を簡素な線形モデルで表現した制御系設計が用いられている。

分布定数系である熱系の線形近似手法としては，入出力応答に近い挙動を持つ集中系にマッチングする方法，偏微分方程式を直接近似する方法，定式化の段階で分布量を集中系に近似する手法などがある⁽⁹⁾。入出力応答に近い挙動を持つ集中系にマッチングする方法としては，最小二乗法でパラメータを同定したり，過渡応答から低次の伝達関数で近似する手法があり，これらの方法で得られるモデルはブラックボックスモデルと呼ばれる⁽²⁾。ブラックボックスモデルは，制御対象の物理的な構造を無視し，モデルとして想定する伝達関数にパラメータをマッチングさせる点に特徴がある⁽¹⁰⁾。このような入出力応答モデルを用いる制御系設計においては，モデルの記述能力の不足をコントローラの調整で補うことになり，特に多変数干渉系の過渡応答の調整においては熟達が要求される。また，その調整ノウ

* 熊本大学大学院自然科学研究科
〒 860-8555 熊本市黒髪 2-39-1
Graduate School of Science and Technology, Kumamoto Univ.
2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860-8555

** オムロン (株) アナログコントローラ事業部
〒 525-0035 滋賀県草津市西草津 2-2-1
Analog Controller Div., OMRON Corp.
2-2-1 Nishi-Kusatsu 525-0035

ハウは、制御対象のヒータ、センサの配置を含めて物理的な構成を前提にしたものであり、一般的な制御対象への拡張が困難である。また、偏微分方程式を直接近似表現してモデル化する方法は、偏微分方程式表現の同定の難しさの他に、モデル化誤差がスビルオーバー⁽¹¹⁾として現れる場合が多く、制御対象ごとのモデル化のノウハウとなりがちで一般化が困難である。定式化の段階で分布系を集中系に近似する手法としては、系の特性を複数の集中定数系で表現するセルモデルが知られている⁽²⁾。セルモデルは物理的な構造を保存したまま線形形で記述できるという特徴があるが、温度制御系への応用事例が少ない。

従って、温度分布を有する制御対象の性質を適切に表現したモデルを構築し、そのモデルを用いて過渡状態での温度均一性を簡便に実現できるコントローラを得ることができれば産業応用上の意義が大きい。さらに、産業界では、非干渉化により1入出力系のコントローラを構成し、そのパラメータ調整によりコントローラが設計されることが多いことから、得られたモデルを用いて非干渉制御系を構成しその効果を検証することが重要である。

本論文では、温度分布を有する熱系を対象に、過渡応答の制御を目的として、熱干渉を陽に表現する線形モデルを提案する。また、提案モデルはフィードバック型構造を持ち、この特徴を利用すると従来のブラックボックスモデルに基づく逆システム型の非干渉化と異なり制御対象の構造を反映した新たな非干渉制御を導出できる。まず、制御対象を物性値が同一で温度が均一と見なせるセル（以後、均質セル）でモデル化し、物理的なエネルギー保存則に基づき相互の熱干渉を陽に表現するモデルを導出する。次に、実際の温度分布を有する熱板に対して、そのダイナミクスを精査し、提案モデルの特性を明らかにする。最後に、提案モデルの構造を反映した新たな非干渉手法を提案し、シミュレーションにより有効性を明らかにする。

2. 熱系のフィードバック構造型モデル

熱系は一般に分布定数系であることが知られているが、制御対象を有限の次数で線形近似することで、様々な制御系設計法を利用することができる。本節では、均質セルを用いて熱系の線形近似モデルを求める。まず議論を簡単にするため、2つの均質セルで構成される熱板を考える。この場合、各セルにおいて温度分布が一樣とみなすことができ、制御対象を2つの集中熱容量モデルとして扱うことができる。そこで、制御対象は図1に示すように、2つの同体積のセルに分割されており、それぞれのセルにヒータが接続されているものとする。

〈2・1〉 制御対象の物理モデリング 対象の熱的な動特性は各セルの内部エネルギーの変化、セル間の熱伝導、セルと外界との熱伝達で決定される⁽¹²⁾。まず、セルが体積 V_i の均質な物体であると仮定すると、セルの内部エネルギーの変化はエネルギー保存の法則から次式で記述される。

図1 熱系のセルモデリング

Fig. 1. Cell modeling in thermal process

$$c\rho V_i \frac{d\theta_i}{dt} = -Q_{i\infty} - Q_{ij} + H_i u_i \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $Q_{i\infty}$ はセルiの表面から空気への熱伝達による熱流、 Q_{ij} はセルiからセルjへの熱流であり、 θ_i はセルiの温度[K]、 c と ρ はそれぞれセルの比熱[J/(kg・K)]と密度[kg/m³]、 u_i [%]はヒータへの入力、 H_i [W/%]は u_i からヒータ発熱量への変換係数である。

次に、セルjからセルiへの熱流 Q_{ji} は、フーリエの法則より

$$Q_{ji} = -A_s \lambda \frac{\theta_j - \theta_i}{d} \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで、 λ [W/(m・K)]は熱伝導率、 A_s [m²]は断面積、 d [m]はヒータ間の距離である。

また、セルiの表面から空気への熱伝達 $Q_{i\infty}$ は、ニュートンの冷却法則より

$$Q_{i\infty} = -A_i h_i (\theta_i - \theta_\infty) \dots\dots\dots (3)$$

となる。ここで、 θ_∞ は周辺温度、 A_i および h_i [W/(m²・K)]はそれぞれセルiの表面積、熱伝達率である。

式(1)~(3)より、制御対象のブロック線図は図2で表される。図において

$$E_i = c\rho V_i, \beta = A_s \lambda / d, \alpha_i = A_i h_i \dots\dots\dots (4)$$

であり、 E_i は熱容量を表し、 β はセル間の熱抵抗の逆数を、 α_i はセルから周囲温度への熱抵抗の逆数を表す。

さらに、周囲温度 θ_∞ はセルの周辺温度であり0℃としても一般性を失わない。したがって、図2は図3に簡略化され、図中の伝達関数は以下となる。

$$H_{si} = \frac{K_i}{1 + sT_i} \dots\dots\dots (5)$$

$$K_i = \frac{1}{\alpha_i} = \frac{1}{h_i A_i} \dots\dots\dots (6)$$

$$T_i = \frac{E_i}{\alpha_i} = \frac{\rho c V_i}{h_i A_i} \dots\dots\dots (7)$$

$$\beta = \frac{\lambda A_s}{d} \dots\dots\dots (8)$$

図3は、出力温度の差(温度差)を β を介したフィードバック構造を有しており、熱系における熱的干渉を陽に含むモデルとなる。このモデルはセルモデルにおいて温度差を陽にフィードバックするモデルであることから、以降「温度差モデル」と呼ぶことにする。

図2 2セルモデルのブロック図
Fig. 2. Block diagram of 2-cell model

図3 温度差モデルのブロック線図
Fig. 3. Block diagram of temperature difference feedback model

〈2・2〉 温度差モデルの伝達関数 図3を入出力間の伝達関数行列で表すと、

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。ただし、

$$H_{ii} = \frac{(1 + H_{sj}\beta)H_{si}H_i}{1 + H_{si}\beta + H_{sj}\beta} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$H_{ij} = \frac{H_{si}H_{sj}\beta H_j}{1 + H_{si}\beta + H_{sj}\beta} \quad \dots\dots\dots (11)$$

上式に、式(5)を代入すると、伝達関数は

$$H_{ii} = \frac{(T_j s + K_j \beta + 1)K_i H_i}{den(s)} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$H_{ij} = \frac{K_i K_j \beta H_i}{den(s)} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$: den(s) = T_i T_j s^2 + [(1 + K_j \beta)T_i + (1 + K_i \beta)T_j]s + (K_i + K_j)\beta + 1 \quad \dots\dots\dots (14)$$

となる。

3. 温度差モデルの実験的検証

前節で得られた均質セルに基づく温度差モデルを実際の模擬熱板に適用し温度差モデルのパラメータを同定する。

図4 制御対象の構成
Fig. 4. Construction of heat plate

表1 制御対象の物理パラメータ
Table 1. Physical parameters of plant

parameter	symbol	value
Heat transfer	h_1, h_2	$14.5[W/(m^2 K)]$
Heat conductivity	λ	$237[W/(m K)]$
Density	ρ	$2688[kg/m^3]$
Heat ratio	c	$905[J/Kg K]$
Volume	V_1, V_2	$1.08 \times 10^{-5}[m^3]$
Section area	A_s	$1.8 \times 10^{-4}[m^2]$
Surface area	A_1, A_2	$7.74 \times 10^{-3}[m^2]$
Distance	d	$6.0 \times 10^{-2}[m]$

〈3・1〉 熱板の構成 FPDや半導体の製造プロセスにおいて、製品を一定時間載置し加熱処理する熱板を模擬した実験装置を用い、加熱実験を行った。図4に示すように制御対象の熱板寸法は幅120mm、奥行き60mm、厚み3mmとし、材質はアルミニウムである。また、10×20mmの平板セラミックヒータが、制御対象の表面に60mm離れて配置され、その最大出力は各々100Wとする。また温度の計測は、K型熱電対を用いてヒータ上で計測される。それぞれのヒータは周期500msecでPWM制御されており、周辺温度は20℃である。制御対象の物理パラメータを表1に示す。

なお、表1の物理パラメータは、熱伝導特性 λ 、密度 ρ 、比熱 c はアルミの物性値より、熱伝達係数 h_i は周辺温度を20℃とし実験的に求めた。また、体積 V_i 、表面積 A_i 、断面面積 A_s 、距離 d はヒータを対称に配置していることから熱板を2つに均等分割するものと仮定し、幾何学的な計算で求めた。

〈3・2〉 制御対象の応答特性 各ヒータに5Wの電力を印加し、約86℃の平衡状態に到達した後に、CH1およびCH2のヒータに交互に8Wを印加する実験を行った。

各部位の温度分布を明らかにするために、有限要素法ソフトウェアANSYSによる分析を行う⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。全領域を917個のセルにオートメッシュにより分割し、セラミックヒータが均一発熱するとの仮定の下に非定常熱解析を行った。図5に実験データと有限要素法シミュレーションによるCH1, CH2の応答特性を併記する。図において、時刻400～2800[s]においてCH1を8Wに、時刻5200～7600[s]においてCH2を8Wに増加させている。平衡後に各チャンネルの入力を増加させると、他チャンネルの温度が変動し、熱

図 5 実機のステップ応答と FEM シミュレーションの比較

Fig. 5. Comparison of experimental response and FEM simulation

図 6 制御対象の温度分布

Fig. 6. Temperature distribution of the plate

干渉が生じていることがわかる。なお、時刻が進むにつれ実応答の定常温度が若干上昇しているが、ヒータ発熱のために周辺温度が上昇していると考えられる。

次に、温度干渉の最も大きい時刻 2740[s] における温度分布のシミュレーション結果を図 6 に示す。同図から、CH1 を 8W に増加させることで、CH2 の温度も上昇し温度干渉が発生していることがわかる。

図 5, 6 より、実験データと有限要素法 (FEM) によるシミュレーションデータが極めてよく一致しており、またサーモレーサ (TH5104 NEC 三栄) による温度分布画像でも温度の分布が FEM 解析と一致していることから、以後、温度の分布に関する評価は FEM シミュレーション結果を利用することとする。

〈3・3〉 制御対象のパラメータ同定 図 5 の実験データを用い、図 4 に示す制御対象の温度差モデルのパラメータを求める。同定は、あらかじめ式 (12)~(14) の定常特性から得られた定常ゲインを求め、入出力応答に対して最小二乗法を用いて伝達関数の係数を同定した後、式 (12)~(14) の多項式から時定数を求める。まず、モデルの定常ゲインの同定を行う。同一ヒータを用いているので、 $H_1 = H_2$ とおく。式 (12)~(14) の定常特性から K_i , β を求めると、

$$K_1 = 8.19[K/W], K_2 = 10.23[K/W], \\ \beta = 0.656[W/K]$$

を得る。

次に u_i から θ_j の干渉動特性 (13)(14) に対し、最小二乗法を用いた時定数を得る。

$$T_1 = 415.2[s], T_2 = 416.1[s] \dots\dots\dots (15)$$

他方、温度差モデルとの比較のため、図 5 の実験データを用い、最小二乗法で一次遅れ系で近似したブラックボックスモデルを求めると次式を得る。

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (16)$$

$$G_{11} = \frac{K_{11}}{1 + sT_{11}}, G_{12} = \frac{K_{12}}{1 + sT_{12}} \\ G_{21} = \frac{K_{21}}{1 + sT_{21}}, G_{22} = \frac{K_{22}}{1 + sT_{22}} \dots\dots\dots (17)$$

$$K_{11} = 4.83[K/W], K_{12} = 4.07[K/W],$$

$$K_{21} = 4.20[K/W], K_{22} = 4.83[K/W],$$

$$T_{11} = 359[s], T_{12} = 419[s],$$

$$T_{21} = 392[s], T_{22} = 378[s]$$

なお、図 4 に示すようにヒータの配置は対称であるが、ヒータやセンサの取り付けの際の熱伝導特性のばらつきや周辺気体温度の影響により、伝達関数は厳密には対象とならない。

図 7 に、同定したブラックボックスモデルおよび温度差モデルを用いた場合の CH1 温度のシミュレーション結果を示す。実験では、 $u_1 = u_2 = 5[W]$ を印加し 87.5℃の定常状態になった後に、 u_1 に Duty 比 50%, 周期 100~300[s], 振幅±2.6W の矩形波を印加している。図より、ブラックボックスモデルに比べ、提案手法は実機に一致しており良好なモデル化が行われていることがわかる。

4. 温度差モデルにおけるパラメータ近似と動特性

均質セルで表現された温度差モデルの理想的なパラメータは式 (5)~(8) となるが、セルが均質ではなく温度分布を有する場合、同定結果と理想値の間に誤差を生じることが予想される。本節では、均質セルに基づく計算値と入出力特性から求めた同定値の比較を行うことで、温度差モデルの適用範囲を明らかにするとともにその動特性について考察する。

〈4・1〉 温度差モデルの適用範囲 式 (5)~(8) から計算により求めたパラメータと〈3・3〉の入出力特性から求めたパラメータを表 2 に示す。

表より、定常ゲイン K_i と β の両者の誤差は小さいが、時定数 T_i の誤差が大きいことがわかる。この誤差の原因としては、温度差モデルではセル内が均一温度で内部の熱伝導を考慮しておらず、周辺気体への熱伝達も一定と仮定していることから、実際の熱流の広がり、不均一な温度分布、熱伝達の位置依存性といった影響が大きいと考えられる。

図 7 ブラックボックスモデルと温度差モデルの比較 (CH1)

Fig. 7. Comparison of blackbox and proposed model (CH1)

表 2 温度差モデルのパラメータ比較

Table 2. Comparison of model parameters

parameter	uniform cell	experiment
T_1 [s]	234	415.2
T_2 [s]	234	416.1
K_1 [K/W]	8.91	8.19
K_2 [K/W]	8.91	10.23
β [W/K]	0.711	0.656

次に、式 (6), (7) より均質セルにおいては、 K_i と T_i の間には、

$$T_i^{sc} = \rho c V_i^{sc} K_i^{sc} \dots\dots\dots (18)$$

が成り立つ。従って、2 セルでの温度差モデルで良好に近似できるかは、入出力特性から求めた T_i^{io}, K_i^{io} が

$$R_i = |T_i^{io} - \rho c V_i^{sc} K_i^{io}| / T_i^{io} \ll 1 \dots\dots\dots (19)$$

を満足するか否かにより判定できる。ここで、添え字 sc は均質セルに基づく計算値、 io は入出力データからの同定値を意味する。図 4 の熱板の場合、 $\max R_i \simeq 0.5$ であり十分に小さいとはいえず、厳密には温度差モデルで表現することが困難であることを示唆する。実際の応用においては、モデルに要求される近似精度は制御目的や用いる制御手法、アプリケーションに依存しており一概に判定できない。詳細なモデル化誤差に関する考察は稿を改めることとし、本論文では温度差モデルの周波数特性について言及することとする。

〈4・2〉 温度差モデルの周波数特性 式 (12)~(14) より、温度差モデルでは入力 u_i から出力 y_i への伝達関数 H_{ii} は 2 個の実極と 1 個の零点を有する二次遅れ系となり、入力 u_i から出力 y_j への伝達関数 $H_{ij} (i \neq j)$ には零点を有しないことがわかる。実際 $u_1, u_2 \rightarrow \theta_1$ の伝達関数において、 H_{11} の極は

$$(s_1, s_2) = \left(\frac{-(1 + K_2\beta) - \gamma}{T_2}, \frac{-(1 + K_1\beta) + \gamma}{T_1} \right) \dots\dots\dots (20)$$

(a) Bode diagram of H_{11}

(b) Bode diagram of H_{12}

図 8 温度差モデルの周波数特性

Fig. 8. Bode diagram of proposed model

であり、零点は

$$z_1 = -(K_2\beta + 1)/T_2 \dots\dots\dots (21)$$

である。また、 $u_1, u_2 \rightarrow \theta_2$ の伝達関数においても、 H_{22} の極は同一であり、零点は次式となる。

$$z_1 = -(K_1\beta + 1)/T_1 \dots\dots\dots (22)$$

なお、2 つのセルで、同特性のヒータとセンサがコロケートされており、セルも同サイズ・同形態である場合、各パラメータは $K_1 = K_2 = K, T_1 = T_2 = T$ とみなせる。この場合、極は $(s_1, s_2) = (-1/T, -(1 + 2K\beta)/T)$ 、零点は $z_1 = -(K\beta + 1)/T$ となる。図 8 に、実験に用いた制御対象の H_{11}, H_{12} の周波数特性を示す。

図において、 10^{-2} [rad/s] 付近では一次遅れと異なる応答を示しており、ゲインに注目すると温度差モデルは単純な一次遅れのブラックボックスモデルに比べゲインが低下することがわかる。なお、〈3・3〉の図 7 に示した実機応答は、零点付近の周波数の入力を加えたものであり、2 つのモデルの差異は実機応答の振幅から明らかである。また、相互干渉を有する系は単純な一次遅れ系とならないことは文献 (2) でも指摘されている。提案する温度差モデルは、その真値を周波数領域で近似した特性となり、セル数を細か

図 9 温度差フィードバックによる非干渉化
Fig.9. Decoupling control using difference temperature feedback

く取り無限に分割していくことで実際の周波数特性に漸近していく。本論文では熱板を2セルで表現したが、温度差モデルは相互干渉を極および零点の配置として表現しており、ブラックボックスモデルに比べ、干渉に関する特性を記述する能力を有していると言える。

5. 温度差モデルに基づく非干渉化

温度差モデルを用いた制御系設計の一例として、非干渉制御系の設計を示す。温度差モデルは、図2に示すように相互干渉が β で陽に表わされていることから、出力の温度差を利用して図9に示すように温度差を変数とするフィードバックを構成するならば、相互干渉項 β が補償されて、入力から出力までの特性は

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & 0 \\ 0 & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (23)$$

と非干渉化される。

そこで、提案する温度差モデルに基づく非干渉化の有効性を示す。前節で得られたパラメータを用い、フィードバックゲイン $H_i^{-1}\beta$ を設計する。次に、操作入力 u の時系列データを求め、その時系列データをFEMモデルに入力することで分布系の非定常熱伝導シミュレーションを行った。温度差モデルに基づく非干渉化のシミュレーション結果を図10に示す。なお、比較対象としてはブラックボックスモデルに基づく完全非干渉化手法⁽¹⁵⁾を使用した。さらに、温度差モデルに基づく非干渉化を行った場合の、2740secでの温度分布を図11に示す。

図10において、従来のブラックボックスモデルに基づく完全非干渉コントローラには微分要素が内在するために、入力をステップ状に変化させたときに非干渉化の際に誤差が生じ、他チャンネルへの干渉が見られる。提案する温度差モデルの場合は、他チャンネルへの影響も小さい。また、FEMの結果である、図11と図6を比較すると、提案する非干渉化手法により他チャンネルへの干渉が抑えられ非干渉化が達成されていることがわかる。以上より、提案する

図 10 非干渉制御を用いた場合の応答特性の比較
Fig.10. Comparison of response using decoupling control

図 11 非干渉制御を用いた場合の温度分布
Fig.11. Temperature distribution using the proposed scheme

温度差モデルに基づく非干渉制御は、ブラックボックスモデルをベースとした完全非干渉制御相当の非干渉性能を有していることがわかり、温度差モデルに基づく非干渉コントローラは、制御対象の逆システムを内在しておらず応用上扱いやすいシステムとなることが期待される。

6. おわりに

本論文では、温度分布を有する熱干渉系を対象に、過渡応答の制御を目的として熱干渉を陽に表現する温度差モデルを提案した。また、提案したモデルを利用した新たな非干渉制御系の設計手法を示した。

まず、均質の有限体積で構成される熱板を考えエネルギー則に基づき温度差モデルを導出した。次に、実際の熱板のデータをもとに、有限要素シミュレーションを用いて温度分布を明らかにした。さらに、温度差のフィードバックにより簡便な非干渉補償器を構成できることを明らかにし、提案する温度差モデルが従来の完全非干渉化手法と同等の性能が得られることを明らかにした。温度差モデルは温度分布に比較的依存しない干渉項と、温度分布に依存する動特性の部分に分離し表現することで、制御対象の動的な干渉

特性を表現したモデルであり、周波数特性の特徴を比較的良好に再現できる。この周波数特徴は、閉ループ特性に最も重要なクロスオーバー周波数領域に近いので、温度差モデルはコントローラ設計に有用であると考えられる。

本論文では、最も簡単なセンサーがコロケートした2セルを対象とした。モデリングにおいて、より精度の高いモデルを得るには、セルが均質であり温度分布や物性値の均一性が求められることから、さらに細かなセル分割やヒータやセンサーがコロケートしていない複数のセルを考慮する必要がある。複数のセルで表現する場合は、セルの増加とともに制御対象の次数が高くなり、扱う干渉項も多くなることから制御系の設計も煩雑となる。その際、セル間の干渉の大きさにより扱う干渉項を限定したり干渉項の動特性を考慮することが必要となろう。また、実際にモデリングに求められる仕様は、制御目的や制御手法、アプリケーションごとに求められるものである。提案モデルの多セルへの拡張や制御性能の評価は非常に重要な問題ではあるが、これらの問題に関しては稿を改めて考察したい。

また、本論文では、制御対象を一次元モデルとして扱い、入出力あるいは干渉に存在するむだ時間が非常に小さいと仮定した。むだ時間に関しては、例えば半導体用の熱板の薄型化の傾向が顕著でありヒータ間隔も狭いので本論文の提案するスキームで実用上問題は無いと考える。さらに広いアプリケーションへの展開を考えると、熱干渉系でのむだ時間の扱い、実システムに内在する非線形特性の評価、二次元モデルへの拡張、コロケーション条件を満足しない場合のモデリング手法などを明らかにする必要があると考える。

(平成 18 年 6 月 30 日受付, 平成 18 年 10 月 16 日再受付)

文 献

- (1) T. Kailath et.al.: *Control for Advanced Semiconductor Device Manufacturing: A Case History*, Control System Applications ed. W.S.Levine, CRC Press (1999)
- (2) K.J. Astrom and Tore Hagglund: *Advanced PID Control*, ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society, (2005-8)
- (3) K.J. Astrom and T. Hagglund, *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*, The International Society for Measurement and Control (1995)
- (4) D.E. Seborg, et.al.: "Process Dynamics and Control", Second edition, Hohn Willy and Sons (2004)
- (5) 須田信英:「PID 制御」, 朝倉書店 (1992)
- (6) 大嶋正裕:「プロセス制御システム」, コロナ社, (2003)
- (7) 足立修一:「MATLAB による制御のためのシステム同定」, 東京電機大学出版局 (1997-11)
- (8) 足立修一:「MATLAB による制御のための上級システム同定」, 東京電機大学出版局 (2004-3)

- (9) 嘉納秀明:「分布定数系の集中定数系モデル」, 計測と制御, Vol.19, No.11, pp.1044-1045 (1980-11)
- (10) 須田信英, 桑田龍一:「PID 制御の最近の話題」, 計測と制御, Vol.36, No.4, pp.245-253 (1997)
- (11) 今井純, 和田清:「分布定数系の設計モデルとロバスト制御」, システム/制御/情報学会誌, Vol.44, No.4, pp.198-204 (2000)
- (12) 日本機械学会:「伝熱工学」, 丸善 (2005)
- (13) CAS,CAE 研究会:「ANSYS 工学解析入門」, 理工学社 (2005)
- (14) 日本機械学会編:「熱と流れのコンピュータアナリシス」, コロナ社 (1993)
- (15) 橋本伊織, 長谷部伸治, 加納学:「プロセス制御工学」, 朝倉書店, (2002)

松 永 信 智

(正員) 1962 年 10 月 2 日生。87 年熊本大学大学院工学研究科電子工学専攻修了。同年オムロン株式会社入社, 94 年熊本大学大学院自然科学研究科博士課程修了。博士(学術)。オムロン株式会社にてロボット制御, 温度制御装置などの開発に従事。2003 年熊本大学工学部数理情報システム工学科助教授, 2006 年改組により大学院自然科学研究科助教授, 現在に至る。ロボティクス, インテリジェント制御系の構築などの研究に従事。計測自動制御学会, 機械学会, ASME などの会員。

南 野 郁 夫

(正員) 1959 年 10 月 18 日生。1982 年 3 月広島大学工学部 II 類(電気系)卒業。同年(株)第二精工舎(現在のセイコー電子工業(株))入社。九州松下電器(株)を経て 1991 年 5 月オムロン(株)入社。熊本研究所を経て現在, 同社アナログコントローラ事業部商品開発部 第 1 開発 G 専門職技師。太陽光発電システム, 温度調節器のアドバンスト制御技術, 熱処理系のシステム統合化技術などの開発に従事。日本太陽エネルギー学会奨励賞(94), 日本太陽エネルギー学会優秀技術賞(97), 計測自動制御学会 2003 年度技術賞の受賞。計測自動制御学会会員。

川 路 茂 保

(上級会員) 1944 年 1 月 18 日生まれ。69 年熊本大学大学院工学研究科電気工学専攻修了。同年 4 月同工学部助手, 同助教授を経て, 99 年 4 月熊本大学大学院自然科学研究科教授。その間, 94 年 3 月~95 年 1 月カリフォルニア大学バークレイ校, ハーバード大学, トロント大学, ルール大学の各大学に客員研究員として滞在。ロバスト制御理論とメカニカルシステムへの応用, 知識型制御系の構築, 情報化制御などの研究に従事。計測自動制御学会 2003 年度技術賞の受賞。工学博士(東京工業大学)。日本機械学会フェロー, 計測自動制御学会, IEEE などの会員。