



発熱変動のある垂直平板の温度変化を最小にするモデル予測制御法の検討

平澤, 茂樹
伊藤, 心也

(Citation)

日本機械学会論文集. B編, 75(756):1561-1567

(Issue Date)

2009-08-25

(Resource Type)

journal article

(Version)

Accepted Manuscript

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90002186>



発熱変動のある垂直平板の温度変化を最小にする モデル予測制御法の検討*

平澤 茂樹^{*1}, 伊藤 心也^{*2}

Study on Model Predictive Control to Minimize Temperature Change of Vertical Plate with Varying Heat Generation

Shigeki HIRASAWA^{*3} and Shinya ITO

^{*3} Department of Mechanical Engineering, Kobe University,
1-1 Rokkodai, Nada-ku, Kobe-shi, Hyogo 657-8501 Japan

Precise process temperature control of 0.001°C under noise-temperature change of 0.1°C is required in semiconductor manufacturing process. We studied control methods to minimize temperature change at an object position in a 2 dimensional vertical plate with a varying noise-heat-generation, natural convection cooling, and a control-heater. We numerically calculated 2 dimensional unsteady thermal conduction in the plate with feedback control, feed-forward control, and model predictive control of the control-heater. The temperature change at the object position can be decreased 1/80 times smaller than that without control-heat-generation by the feedback control with two monitoring temperatures. The temperature change at the object position can be decreased 1/1000 times (0.002°C) by the model predictive control of 5 s interval with step response pattern and two monitoring temperatures. We found that the accuracy of the predictive model is very important for precise temperature control. Experiment was performed for the model predictive control with network model pattern, and the experimental result agreed with the calculation result.

Key Words : Precise Temperature Control, Heat Transfer, Process Control, Model Predictive Control, Electronic Equipment

1. 結 言

半導体産業やバイオエンジニアリング分野などに実用されているナノ技術において非常に高精度な温度制御の要望がある。例えば、nm オーダの精度で加工する半導体製造装置の例について、寸法 100 mm の鉄製構造物が 0.001°C 温度変化すると、熱膨張によって 1 nm の寸法変化が生じるため、加工精度向上のため製造プロセス時の構造物の温度変動を 0.001°C 以下にする温度管理が要求される。一方、空調設備のあるクリーンルーム内においても、作業者の移動や、装置の非定常動作の発熱量変化によって、温度制御なしの場合には構造物に 0.1°C オーダの温度変動がある。すなわち、外乱発熱変化がある環境内において構造物の温度変動を

制御なしの場合の 1/100 以下に低減する温度制御技術が必要である。

高精度温度制御技術についてこれまでにいくつかの研究がなされている。外乱発熱変化がない密閉空間内の定常状態における温度変動低減技術として、制御ヒータの発熱制御により温度変動を 0.0001°C オーダに低減する研究が報告されている⁽¹⁾⁽³⁾。また、制御方法に関して、従来からフィードバック制御やフィードフォワード制御が実用されている。工藤ら⁽⁴⁾は逆問題を解くことで対象の境界条件を制御して対象物の温度を所定条件にする方法を報告した。Diaz ら⁽⁵⁾はニューロネットワーク適応制御により熱交換器の出口空気温度を所定条件にする方法を報告した。Lawton ら⁽⁶⁾は大流量流体の温度変動の周波数減衰による温度変動低減方法について検討し、温度変動を 1/100 に低減できることを報告した。Sweetland ら⁽⁷⁾は発熱変動ある IC パッケージについてアクティブ制御法により温度変動を低減する方法を報告した。また、プロセス制御の分野に

* 原稿受付 2009 年 2 月 12 日。

^{*1} 正員, 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)。

^{*2} 神戸大学大学院自然科学研究科。

E-mail: hirasawa@kobe-u.ac.jp

おける高精度制御技術としてモデル予測制御⁽⁸⁾⁽⁹⁾が開発されている。モデル予測制御とは、あらかじめ制御対象の動特性モデルを作成し、動特性モデルを使って制御対象の将来の応答を予測し、それを理想とする応答にできるだけ近くなるよう、制御対象への入力を算出する制御方式である。さらに、動特性モデルの不完全さや外乱のために予測値と観測値が異なることを考慮し、その補正を同時に行うものである。しかし、外乱発熱変化がある環境内にある構造物の温度変動を最小にする適切な温度制御法についての研究は少ない。著者ら⁽¹⁰⁾は、自然対流冷却されている垂直平板の内部発熱が時間変動する1次元熱伝導系を対象にして、垂直平板内の目標位置の温度変動を低減するためのフィードバック制御とフィードフォワード制御の効果を数値シミュレーションにより検討し、1次元熱伝導系ではフィードフォワード制御により目標位置の温度変動を制御なしの1/1000にできることを示した。

本研究では、自然対流冷却されている垂直平板の内部発熱が時間変化する2次元熱伝導系を対象にして、垂直平板内の目標位置の温度変動を最小にする適切な制御手法を明らかにするため、フィードバック制御、フィードフォワード制御、モデル予測制御について数値シミュレーションで検討し、実験により検証する。さらに、モデル予測制御に関して、目標位置の温度変動に及ぼす各種制御因子の影響を明らかにする。

2 計算方法

図1に計算対象を示す。本研究では高精度温度制御の要素技術開発を目的とするために、一般的な構造物の中で最も単純な平板モデルを対象とする（図1は後述の実験条件になっている）。大気中で自然対流冷却されている垂直平板（高さ100 mm、幅100 mm、厚さ5 mm）のC部にある外乱ヒータ（線状発熱体）の発熱が時間変化する場合に、B部に設ける制御ヒータの発熱を制御することにより、a目標位置の温度変動を最小化することを考える。複数の外乱発熱変化を考慮の場合には、E部に設ける外乱ヒータも使う。a～e位置の温度をモニターする。垂直平板は鉄製（密度7850 kg/m³、比熱465 J/kgK、熱伝導率43 W/mK）とする。初期条件はC部ヒータが1.3 W発熱の定常状態とする。外乱発熱条件は、単純な例としてC外乱ヒータの発熱1.3 Wが300 sごとにOFFとONを2回繰り返す場合を考える。

平板内の2次元非定常熱伝導方程式は次式となる。平板の厚さ方向に温度一定と仮定する。境界条件は、平板の周端部を断熱境界とする。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} + q \quad (1)$$

ここで、 T : 温度、 t : 時間、 x, z : 座標、 ρ : 密度、 C_p : 比熱、 λ : 熱伝導率、 q : 発熱や自然対流熱伝達とふく射伝熱により伝熱される単位体積当たりの入熱量の和である。ここで、2次元計算とするために平板の表面での熱伝達による伝熱量も q に含める。自然対流とふく射伝熱の熱伝達率の和を10 W/m²K一定と仮定する。平板内部の温度分布は複雑でないので平板内の熱伝導計算の節点数は121（メッシュ幅10 mm）とした。非定常計算の時間ステップは1.25 sとし、数値解析は陰的差分法を用いる。

C部のヒータが1.3 W発熱の定常状態の初期条件は、外気温度27°Cの時に、a位置32.8°C、c位置36.4°Cであり、以下の解析結果はその定常温度からの温度変化分のみを示す。

発熱制御計算は制御周期ごとにモニター温度を用いて、各種の制御アルゴリズムによって発熱量を算出し、B部の制御ヒータの発熱量を時間変化させるものである。制御周期は5 sを標準とし、制御周期を変えた検討も行う。

3 制御手法

本研究では、フィードバック制御、フィードフォワード制御、モデル予測制御を検討する。フィードバック発熱制御の方法は、図1のB部ヒータの発熱量制御量と5 s後のa位置、b位置、またはc位置温度変化量との比例関係式をあらかじめ計算で求めておき、その関係式を用いて制御周期5 sごとにモニター位置の温度偏差を5 s後にゼロに戻すように発熱制御量を算

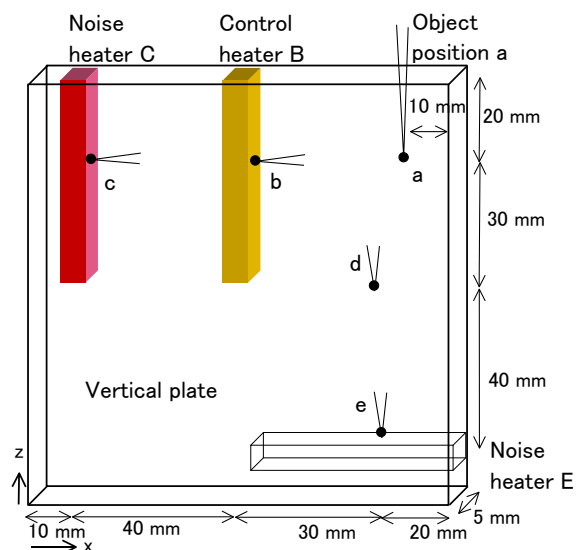


Fig. 1 Calculation model

出し発熱制御する。但し、B 制御ヒータの最大発熱量はC 部の最大外乱発熱と同じ 1.3 W とする。

フィードフォワード制御（予測制御）の方法は、制御周期ごとに、各制御時刻における温度分布のデータを与え、以降の外乱変化なしと仮定した温度変化の数値計算により、5 s 後におけるモニター位置温度の温度偏差を最小にするように発熱制御量を決める。

モデル予測制御は、制御対象の動特性モデルを利用して、制御対象の将来の応答を予測し、これが理想とする応答特性に近くなるようにする制御方法である。制御対象の動特性モデルとして、本論文では次の 3 方式を検討する。(1) あらかじめ C 部の外乱発熱ヒータあるいは B 部の制御ヒータに -1 W あるいは $+1\text{ W}$ のステップ状発熱変動を与えた計算を行い、各モニター位置 a, c の温度変化のステップ応答パターン（図 2）を得ておき、それを動特性モデルとして制御する方法、(2) 同様に、各ヒータの 5 s 間 -1.3 W あるいは $+1.3\text{ W}$ 変化のパルス応答（図 3）を得ておき、それを動特性モデルとして制御する方法、(3) 制御対象の伝熱特性を表すネットワークモデルを考え（図 4）、そのネットワークモデル伝熱特性を動特性モデルとして制御する方法。(3) は複雑な実機において精度の良い応答パターンを得ることができない場合に使える方法である。ネットワークモデルの伝熱計算については文献⁽¹⁾を参照。3 方式とも、温度モニターは a 位置と c 位置で行う。c 位置のモニター温度変化から C 部にある外乱ヒータの発熱変動量を推定し理想とする応答特性になるように発熱制御する。また a 位置の温度モニター値から予測値とモニター値の差を求め制御量を補正する。制御周期は 5 s、理想とする応答特性として a 目標位置の温度変動量を 15 s 後にゼロに戻すような発熱制御とした。a 位置の温度モニター値と予測値の温度差についても、15 s 後にその温度差がゼロになるように発熱量を補正する。動特性モデルは 2100 s までの応答パターンの値を用い 2100 s 以降は 2100 s と同じ温度変化と仮定する。

4. 制御なし、フィードバック制御 フィードフォワード制御の計算結果

図 5 に、制御なしの場合の、a～e 位置の温度変化分を示す（定常温度 a 位置 32.8°C などからの温度変化分）。C 部の外乱発熱変化（300 s ごとに OFF と ON を 2 回繰り返す）によって、c 位置温度は 5.5°C 低下し、それによって a 目標位置温度は 2.3°C 変動することがわかる（表 1 の No. 7）。

表 1 の No. 1～3 に、a 位置～c 位置の温度変化をモニ

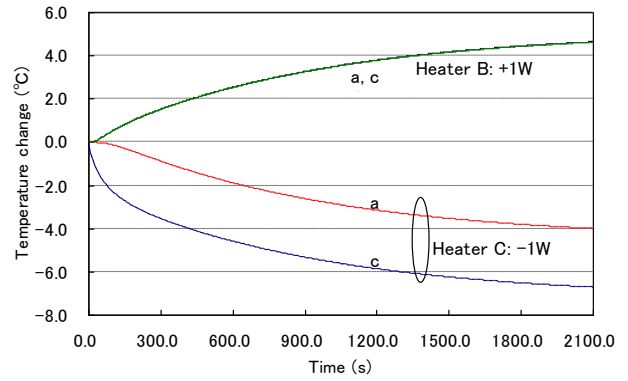


Fig. 2 Temperature response for step heat generation

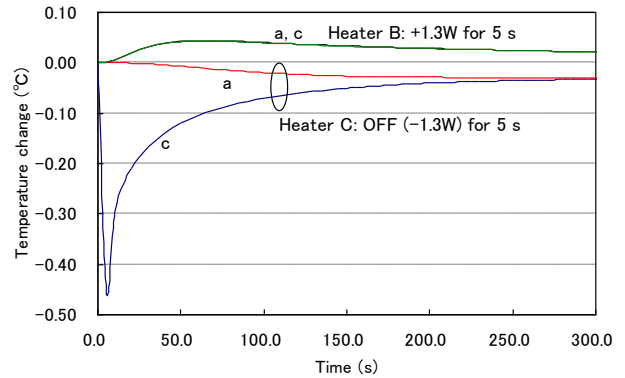


Fig. 3 Temperature response for pulse heat generation

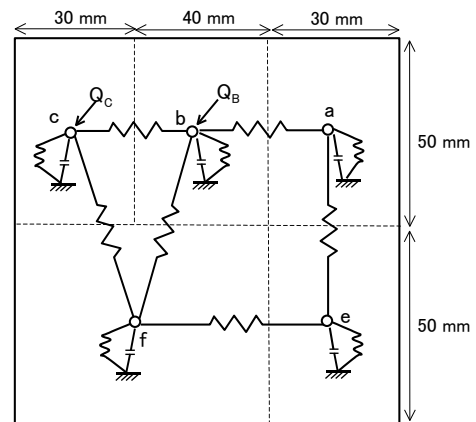


Fig. 4 Network model

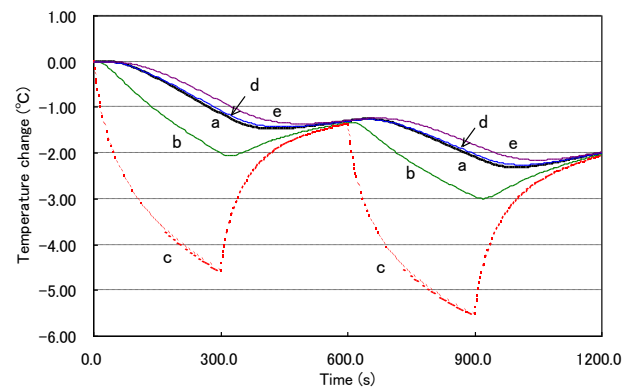


Fig. 5 Temperature change without heat control (No.7 in Table 1)

ターしてB部ヒータをフィードバック発熱制御した場合のa位置の最大温度変動を示す。制御周期は5 s とする。a またはb位置の1点温度モニターのフィードバック発熱制御(No. 1, 2)でa目標位置の温度変動を制御なしの1/10 (0.2℃)にできることがわかる。

表1のNo. 4に、bとd位置の2ヶ所の平均温度変化をモニターしてB部ヒータをフィードバック発熱制御した場合を示す。a 目標位置を中心にして同心円的な周囲位置の平均温度を一定にすればその中心温度も一定になると考えた制御方法である。この場合にa 目標位置の温度変動を制御なしの1/80 (0.03℃)にできることがわかる。No. 4の各位置の温度変化を図6に示す。b位置とd位置の温度変化がほぼ正反対になっていることがわかる。以上より、2次元熱伝導系のフィードバック制御の場合は複数位置の温度モニターを用いて制御することが望ましいことがわかる。

表1のNo. 5, 6に、a位置またはb位置の温度変化をモニターしてB部ヒータ発熱をフィードフォワード制御した場合のa位置温度の最大変動を示す。a 目標位置の温度変動はフィードバック発熱制御 No. 2 と同じ 0.2℃であった。外乱変化なしと仮定して求めた予測計算と実際の外乱変化との差が変動原因である。No. 6は1次元熱伝導系にて温度変動を最小(制御なしの1/1000)にできた方法であるが⁽¹⁰⁾、2次元系の場合は2次元的な熱伝導による温度変動の影響があり、1次元熱伝導系とは異なることがわかる。

5. モデル予測制御の計算結果

表2にモデル予測制御の3方式の計算結果を示す。図7, 8に、(1)ステップ応答パターンを使ったモデル予測制御による各部の温度変化とヒータ発熱量の変化を示す。a 目標位置の温度変動を制御なしの1/1000 (0.002℃)にできることがわかる(表2のNo. 8)。

(2)パルス応答パターンを使ったモデル予測制御による場合、a 目標位置の温度変動は0.025℃と大きくなった(表2のNo. 9)。これは、図3のパルス応答の温

Table 1 Results of feedback control and feed-forward control

No	Control method	Control heater	Monitor position	Object temp. change
1	Feedback	B	a	0.2℃
2	Feedback	B	b	0.2℃
3	Feedback	B	c	1.2℃
4	Feedback	B	b, d	0.03℃
5	Feed-forward	B	a	0.2℃
6	Feed-forward	B	b	0.2℃
7	Without control	--	--	2.3℃

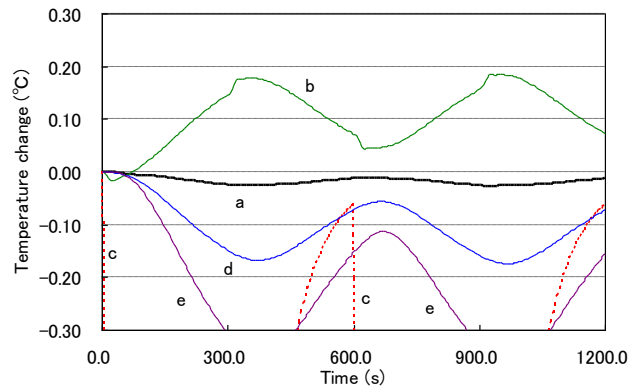


Fig. 6 Temperature change for feedback control with two monitor temperatures (No.4 in Table 1)

Table 2 Results of model predictive control

No	Predictive method	Control heater	Monitor position	Object temp. change
8	Step response	B	a, c	0.002℃
9	Pulse response	B	a, c	0.025℃
10	Network model	B	a, c	0.14℃

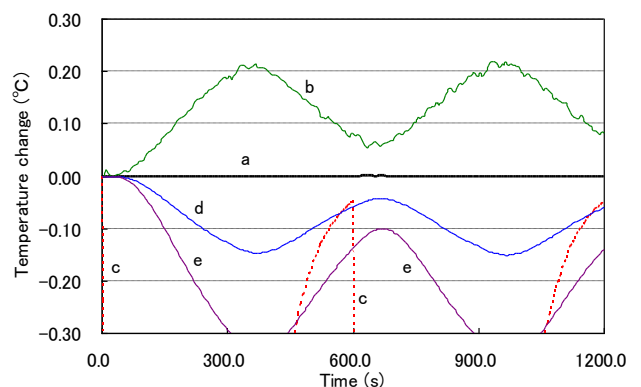


Fig. 7 Temperature change for model predictive control with step response pattern (No.8 in Table 2)

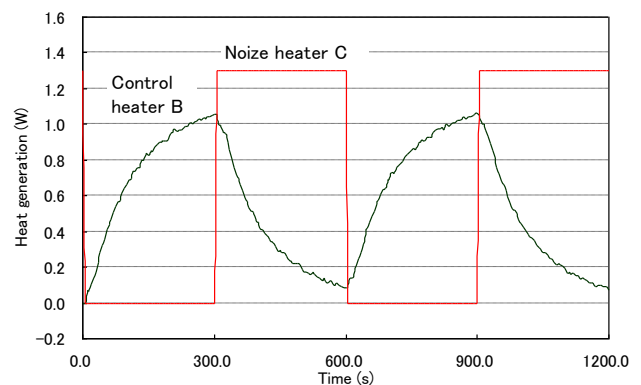


Fig. 8 Change of heat generation for model predictive control with step response pattern (No.8 in Table 2)

度変化値が図2のステップ応答の温度変化値より小さいため動特性モデルの精度が相対的に悪く、5 s ごとの制御による誤差が積算したためと思われる。

(3) ネットワークモデルを使ったモデル予測制御による場合、a 目標位置の温度変動は0.14℃と大きくなった(表2のNo.10)。これは、単純化したネットワークモデルに誤差があるためである。例えば、図2に示したB部の制御ヒータのステップ状発熱変動によるモニター位置aの応答パターンについて、ネットワークモデルでは0.1℃程度の誤差があり、これはa目標位置の温度変動と同程度である。

以上より、動特性モデルの精度が最も良い(1)ステップ応答パターンを使った場合が目標位置の温度変動を小さく制御できることがわかり、一般的に制御の精度を良くするには制御対象の動特性モデルの精度が特に重要であると言える。

参考までに、(1)ステップ応答パターンを使ったモデル予測制御について、a位置の予測値とモニター値との差の補正を行わない場合には(これはフィードフォワード制御の一つ)、a目標位置の温度変動は0.005℃であった。また、C部にある外乱ヒータの発熱変動の予測を行わず、a位置の予測値とモニター値との差の補正のみとした場合には(これもフィードフォワード制御の一つ)、a目標位置の温度変動は0.1℃であった。これは表1のNo.5と同程度である。また、動特性モデルとして900 sまでの応答パターンを用いた場合には、a目標位置の温度変動は0.04℃であった。このことより、動特性モデルは現象が定常になるまでの十分なデータが必要であることがわかる。

6. ステップ応答パターンを使ったモデル予測制御における各種制御因子の影響

次に、(1)ステップ応答パターンを使ったモデル予測制御において、目標位置の温度変動に及ぼす各種制御因子(制御周期、理想とする応答特性、動特性モデルやモニター温度精度の有効桁数、外乱変動条件)の影響を検討する。

制御周期の影響として、図9に制御周期とa目標位置の温度変動との関係を示す。制御周期が10 s以上になると外乱の影響が大きくなりa目標位置の温度変動が大きくなる。B部制御ヒータとa目標位置の熱伝導による伝熱の時定数のオーダー((密度)×(比熱)×(距離)²/(熱伝導率))が80 sであり、制御周期は時定数の1/10以下が良いことがわかる。一方、制御周期が2 s以下になるとモニター温度変化量が小

さく、相対的な精度が悪くなり、a目標位置の温度変動が大きくなる。

理想とする応答特性の影響として、a目標位置の温度変動をゼロに戻すまでの時間の条件を変化させた計算結果を図10に示す。温度変動をゼロに戻すまでの時間が短いと制御発熱量が大きくなり発散するが、一方30 s以上に長くなるとa目標位置の温度変動が大きくなる。これも制御対象の時定数との関係で適正な条件が決まる。

動特性モデルやモニター温度精度の有効桁数の影響として、動特性モデルの有効桁数を変えて検討したところ、0.001℃より有効桁数が悪くなるとa目標位置の温度変動が大きくなった。例えば、動特性モデルの有効桁数が0.01℃ではa目標位置の温度変動が0.01℃になった。また温度モニターの有効桁数を変えたところ、同様に0.001℃より有効桁数が悪くなるとa目標位置の温度変動が大きくなる。例えば、温度モニターの有効桁数が0.1℃ではa目標位置の温度変動が0.08℃になった。すなわち、要求される温度制御精度より良い精度の動特性モデルと温度モニター値の有効桁数が必要であると言える。従って、実用する際には対象に応じて得られる最も良い精度の動特性モデルを用いることが必要である。

外乱変動条件の影響として、図11にC部にある外乱

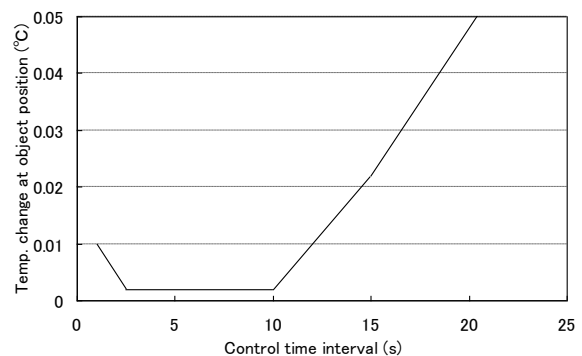


Fig. 9 Effect of control time interval

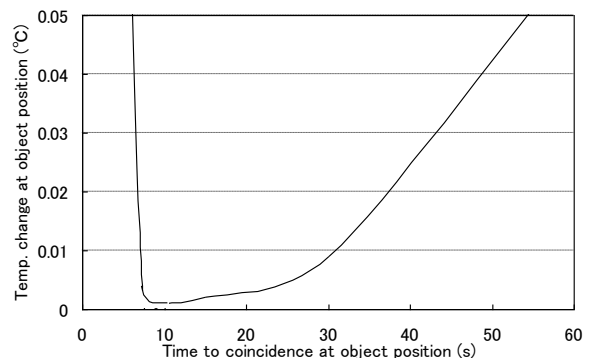


Fig. 10 Effect of time to coincidence at object position

ヒータの発熱が正弦波状の場合の各部温度変化を示す。a 目標位置の温度変動は 0.002°C 以下にできることがわかる。図示しないが、外乱がランダムの場合や外乱周期が 5 s の場合も a 目標位置の温度変動は 0.002°C 以下にできる。また、外乱ヒータが C 部と E 部の 2 ヶ所にある場合のステップ応答パターンを使ったモデル予測制御の検討を行った。図 12, 13 に各部の温度変化とヒータ発熱量の変化を示す。図 13 でわかるように C 部と E 部の外乱発熱は時間差を与え、両者の発熱量合計がこれまで検討した 1 外乱の発熱量と同じになるような条件にした。温度モニターは a 位置、c 位置、e 位置で行い、e 位置のモニター温度変化から E 部にある外乱ヒータの発熱変動を推定し発熱制御する。発熱制御は B 部ヒータのみで行う。初期条件は 1 外乱と同じである。計算の結果、a 目標位置の温度変動は 0.014°C であった。a 目標位置の温度変動が 1 外乱 (表 2 の No. 8) の場合より大きくなった原因は、E 部にある外乱ヒータの発熱 ON の時に予測モデルからは E 部近くを冷却するように求められるが、B 部の制御ヒータのみではそれに対応できないためである。計算上で E 部近くに冷却する機構を設けた複数の熱制御では、a 目標位置の温度変動は 1 外乱の場合と同じに 0.002°C にできる。

7. 実 験

以上の結果を検証するために実験を行った。装置の構造は図 1 に示すものである。垂直平板は大気中に置かれた鉄製で、ヒータはコンスタン細線をコイル状 (外径 1.3 mm) に巻いて作り、直流電流を流し発熱させた。温度は直径 0.2 mm の T 型熱電対で測定した。温度測定器の公称測定精度は 1.0°C 、分解能 0.01°C であるが、 1.3 W 一定発熱の場合に指示温度の変動幅は 0.05°C であり、これが本実験による温度変動量の測定限界と思われる。発熱制御は、パソコンでの温度測定と制御計算により、直流電源の出力電圧制御を行った。

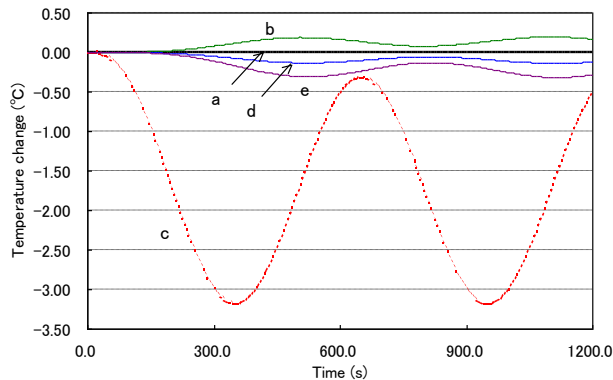


Fig. 11 Sinusoidal noise heat generation

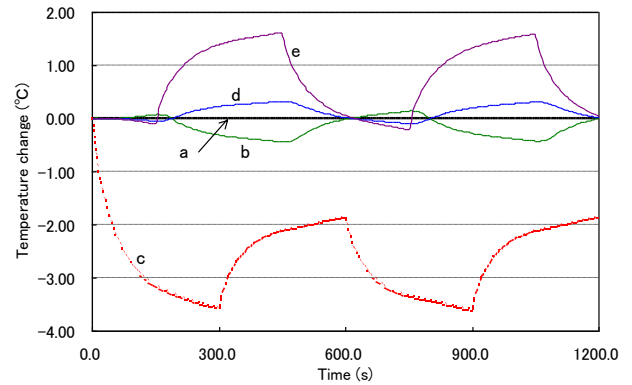


Fig. 12 Temperature change for two noise heat generations

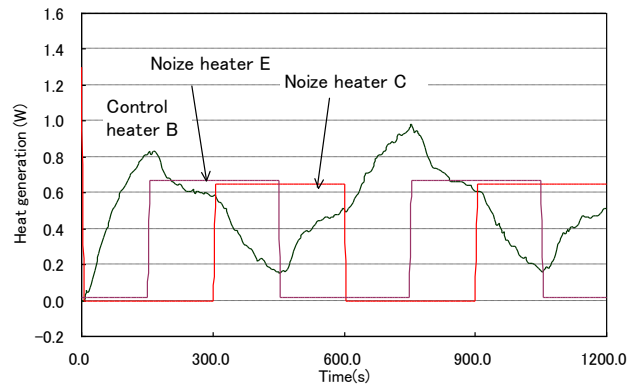


Fig. 13 Change of heat generation for two noise heat generations

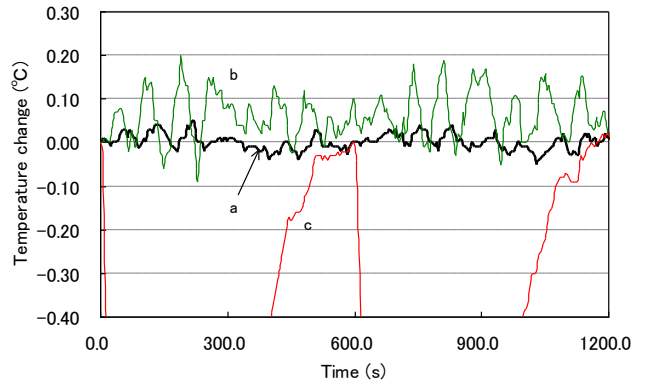


Fig. 14 Experimental temperature change

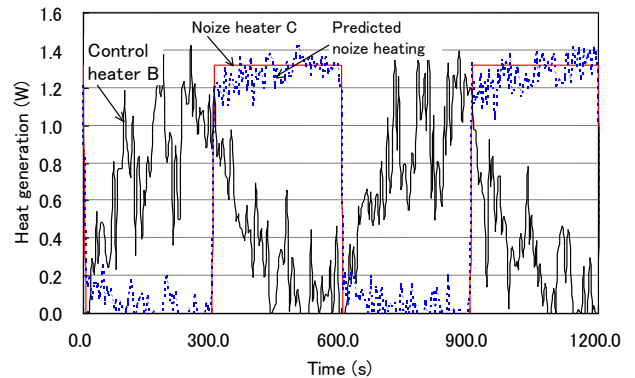


Fig. 15 Experimental change of heat generation

C部のヒータが1.3W発熱の定常状態の初期条件は、外気温度27.0℃の時に、a位置32.0℃、c位置34.4℃であり、実験結果にはその定常温度からの温度変化分のみを示す。C部の外乱発熱変化は300sごとにOFFとONを2回繰り返した。C部の外乱発熱変化があり制御なしの場合、c位置温度は3.9℃低下し、それによってa目標位置温度は1.8℃変動した。

本実験では実験的に精度の良いステップ応答パターンを得るのは難しいため、モデル予測制御の動特性モデルとしてネットワークモデルを使うことにした。図14、15にネットワークモデルを使ったモデル予測制御による各部の温度変化とヒータ発熱量の変化を示す。測定温度のランダム変動誤差の影響で、B部の制御ヒータの発熱量やb位置の温度が大きく変動する。a目標位置の温度変動は0.1℃(制御なしの1/20)であり、表2のNo.10の計算結果と同程度になった。図15の破線に制御計算で求めたC部の外乱発熱変化の推定値を示す。実際に与えたON/OFF外乱発熱変化を10%以内の誤差で推定していることがわかる。モデル予測制御では予測値と観測値が異なることを考慮し、その補正を同時に行うため、外乱発熱変化の推定誤差があってもa目標位置の温度変動はさらに低減する。

8. 結 言

自然対流冷却されている垂直平板の内部発熱が時間変動する2次元熱伝導系を対象にして、垂直平板のある目標位置温度の時間変動を最小化するための制御方法を検討し、次の結論を得た。

(1) 1点温度モニターのフィードバック発熱制御で目標位置の温度変動を制御なしの1/10(0.2℃)にできる。2点温度モニターのフィードバック発熱制御で目標位置の温度変動を制御なしの1/80(0.03℃)にできる。このことより、2次元熱伝導系のフィードバック制御の場合は複数位置の温度モニターを用いて制御することが望ましい。

(2) ステップ応答パターンを使ったモデル予測制御により、制御周期5s、理想とする応答特性として目標位置の温度変動を15s後にゼロに戻すような発熱制御をさせた場合で、温度モニターの有効桁数が0.001℃の時に、目標位置の温度変動を制御なしの1/1000(0.002℃)にできる。モデル予測制御は外乱発熱変化がある環境内にある構造物の温度変動を最小にする制御方法として適切な温度制御方法である。

(3) モデル予測制御を実用する際には対象に応じて得られる最も良い精度の動特性モデルを用いることが重要である。また、要求される温度制御精度より良

い精度の動特性モデルと温度モニター値の有効桁数が必要である。モデル予測制御において、制御周期が制御位置と目標位置との伝熱の時定数の1/10以下にすることが良い。

(4) 実験により計算結果の効果を検証した。ネットワークモデルを使ったモデル予測制御を行い、目標位置の温度変動は0.1℃であり、計算結果と同程度になった。

本研究の一部は科学研究費補助金 基盤研究(C) No.18560199の援助を受けて行われた。

文 献

- (1) Dratler, J., A Proportional Thermostat with 10 Microdegree Stability, *Review of Scientific Instruments*, Vol.45, (1974) pp. 1435-1444.
- (2) Priel, Z., Thermostat with a Stability of 3.5 μ K, *Journal of Physics. E, Scientific Instruments*, Vol.11, (1978) pp. 27-30.
- (3) Ogasawara, H., Method of Precision Temperature Control Using Flowing Water, *Review of Scientific Instruments*, Vol.57, (1986) pp. 3048-3052.
- (4) Kudo, K., Kuroda, A., Ishibashi, S., Fujikane, T. and Obara, S., Development of Fast Algorithm of Radiative Heat Exchange and its Application to Non Gray Analyses and Inverse Radiative Property Value Problems, *Heat Transfer 1998 (Proceedings of 11th IHTC)*, No.4 (1998), pp. 259-264.
- (5) Diaz, G., Sen, M., Yang, K. T., McClain, R. L., Adaptive Neurocontrol of Heat Exchangers, *Transaction of the ASME, Journal of Heat Transfer*, Vol.123 (2001), pp.556-562.
- (6) Lawton, K. M., Patterson, S. R. and Keanini, R. G., Precision Temperature Control of High-Throughput Fluid Flows: Theoretical and Experimental Analysis, *Transaction of the ASME, Journal of Heat Transfer*, Vol.123 (2001), pp.796-802.
- (7) Sweetland, M. and Lienhard, J. H., Active Thermal Control of Distributed Parameter Systems with Application to Testing of Packaged IC Devices, *Transaction of the ASME, Journal of Heat Transfer*, Vol.125 (2003), pp. 164-174.
- (8) Ohshima, M. and Ogawa, M., Model Predictive Control-I, *Institute of Systems, Control and Information Engineers*, Vol.46, No.5 (2002), pp. 286-293.
- (9) Richalet, J. and Eguchi, H., *Principle and Application of PFC (Predictive Functional Control)* (in Japanese), Japan Industrial Publishing Co. Ltd. (2007).
- (10) Hirasawa, S. and Ito, S., Analytical Study of Thermal Control Method to Minimize temperature Change of a Plate with Changing Heat Generation, *Proceedings of 2007 ASME-JSME Thermal Engineering Summer Heat Transfer Conference*, HT2007-32609 (2007).
- (11) Holman, J. P., *Heat Transfer (Ninth Edition)*, McGraw-Hill Book Co. (2002).