

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18560199

研究課題名（和文） 高精度温度制御技術の研究

研究課題名（英文） STUDY ON PRECISE TEMPERATURE CONTROL TECHNOLOGY

研究代表者 平澤 茂樹（HIRASAWA SHIGEKI）

神戸大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70403300

研究成果の概要：電子線描画装置の高精度温度制御をモデルにして、外乱温度変動の1%以下（外乱温度変動0.1℃の環境にて対象物の温度変動を0.001℃以下）にするための制御方法を数値解析と実験で検討した。解析的な検討により、ステップ応答モデルを使ったモデル予測制御法により外乱温度変動の0.1%にできることを示した。また、ふく射加熱による温度上昇速度の制御も検討した。検討結果をまとめて、制御対象に応じた最適制御条件や、制御の限界を明らかにした。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1500,000	0	1,500,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3100,000	480,000	3,580,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：温熱制御

1. 研究開始当初の背景

(1) 背景

MEMS技術、半導体産業、バイオエンジニアリング分野に実用されているマイクロ・ナノ技術において、高精度な温度制御の要望が大きくなっている。具体的に、寸法100mmの鉄製材料が0.001℃温度変化すると、熱膨張によって1nmの寸法変化が生じるため、プロセス時の材料の温度変動を0.001℃以下にする温度管理が必要である。同様に、バイオエンジニアリング分野においても、分析試料や反応の制御のため高精度な温度管理が必要である。一方、空調設備のあるクリーンルーム内において、空調しているにもかかわらず、作業者の移動や、装置の非正常動作の

発熱量変化によって、環境温度に0.1℃オーダーの外乱温度変動がある。そのような外乱温度変動がある環境下に置かれた対象物の高精度な温度制御技術の開発が必要である。

(2) 従来技術

これまでの温度制御技術は、例えば高発熱電子機器のヒートパイプによる低温度差熱輸送技術、高温熱処理プロセスの材料温度均一化技術など、実用分野ごとにその制約条件を考慮した研究がなされてきた。しかし、ヒートパイプによる低温度差の高性能熱輸送デバイス技術は、相変化のヒステリシス現象があり1℃程度の温度差を許容している。また従来制御技術として、PID制御、ファジー制御などがあるが、従来からわかっている

範囲内では、制御精度を最大に良くするためには、対象物の温度を直接測定して、対象物を直接加熱冷却することが必要であるということになる。しかし、マイクロ・ナノ技術のように対象物の温度を直接測定することができず、また対象物を直接加熱冷却することもできない場合には、新たな間接熱制御技術を開発することが必要であった。一方、直接に測定できない現象を応答や出力結果などの間接的な情報から推定する技術として、逆問題解析技術が学術的に研究されている。しかし、現実には複雑に現象が関連し制約条件もあるため、対象物の周囲の環境条件を制御し間接的制御によって対象物を目的条件に導く温度制御方法の精度がまだ十分ではなかった。

2. 研究の目的

(1) 外乱温度変動がある環境下に置かれた対象物や環境の温度変化を高精度に計測し、最適な熱制御技術を用いた動的な加熱冷却制御により、対象物の温度変動を外乱温度変動の1%以下（外乱温度変動 0.1°C の環境にて対象物の温度変動を 0.001°C 以下）にする高精度温度制御技術を開発する。

(2) 外乱要因と対象物の温度変化との関係を定量的にまとめ、制約条件に応じて温度変動低減の限界を明らかにし、高精度温度制御技術を学術的に体系化する。

3. 研究の方法

(1) 要素技術開発

① 温度変動の要因分析

周囲環境条件の変化、装置の非定常動作の摩擦発熱量変化、作業者の移動など、対象物の温度を 0.001°C オーダで時間変化させる要因と温度変動との関係を実験と数値解析により定量的に評価する。特に、一見、ランダムな温度変動のように測定される複合した外乱要因の現象を分析する。

② 温度制御の高精度化

温度制御の精度を 0.001°C 以下にするために必要とされる要素技術を数値解析と実験により検討する。

③ 温度制御の限界評価

熱伝導、対流、ふく射のランダム変動、熱容量による温度変動の遅れについて、熱制御と温度変動との関係を定量的にまとめて温度制御の限界を評価すると共に、高精度温度制御技術を理論的に体系化する。

(2) 熱制御技術開発

① 熱制御方法の評価

フィードバック制御、フィードフォワード制御、ファジー制御などいくつかの熱制御技

術や逆解析技術が考えられ、それらを用いた制御方法を数値解析により定量的に評価する。

② 直接熱制御技術

対象物にヒータやペルチェ冷却素子を直接取り付ける場合、レーザー光にて対象物を直接加熱できる場合など、直接加熱冷却制御できる場合について、対象物の温度変化低減方法を数値解析により定量的に評価する。

③ 間接熱制御技術

装置の内壁温度分布を制御することにより対象物を間接的にふく射加熱制御する場合や、装置外部の周囲環境条件を制御する場合など、間接加熱冷却制御について、対象物の温度変化低減方法を数値解析により定量的に評価する。

④ 熱制御システムの開発

複数の加熱冷却制御器のマルチゾーン・アクティブ熱制御を用いた時の限界精度について数値解析により定量的に評価する。

⑤ 制約条件に対応した複合熱制御技術

各種制約条件下にて、複合した外乱要因に対応するマルチゾーン・アクティブ熱制御技術を開発し、限界条件を数値解析により定量的に評価し、マルチゾーン・アクティブ熱制御技術の効果を実験により実証する。

4. 研究成果

(1) 概要

電子線描画装置の高精度温度制御をモデルにして、外乱温度変動の1%以下（外乱温度変動 0.1°C の環境にて対象物の温度変動を 0.001°C 以下）にするための制御方法をモデル実験と数値解析で検討した。1次元熱伝導系と2次元熱伝導系を対象にして、制御ヒータ加熱制御およびふく射加熱制御についての理論的な検討により、ステップ応答モデルを使ったモデル予測制御法により外乱温度変動の0.1%にできることを示した。検証実験では、ネットワークモデルを使ったモデル予測制御法により外乱温度変動の5%にできることを示した。また、ふく射加熱による $100^{\circ}\text{C}/\text{s}$ の温度上昇速度の制御も検討した。まとめて制御対象に応じた最適制御条件や、制御の限界を明らかにした。

(2) 1次元熱伝導系を対象にした制御ヒータ加熱の高精度温度制御の理論的検討

① 計算対象 (図1)

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。大気中で自然対流冷却されている垂直平板のC部にある外乱ヒータの発熱がON/OFF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。

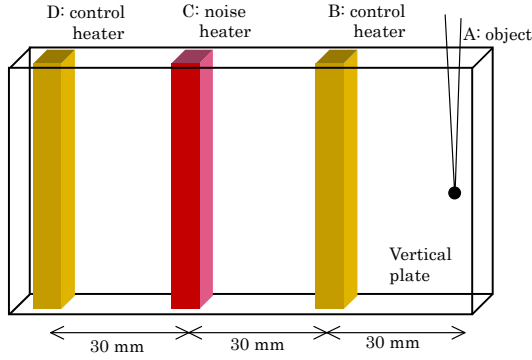


図1 計算対象

② 各種制御法についての計算結果 (表1)

制御なしの場合、フィードバック制御、フィードフォワード制御のA目標位置の温度変動を示す。これより、フィードフォワード制御 (No.4) により制御なし外乱温度変動 (No.1) の0.1% (外乱温度変動6°Cの環境にて対象物の温度変動を0.001°C) にできることがわかった。

表1 計算結果

No	制御方法	モニター位置	温度変動
1	制御なし	---	6°C
2	フィードバック制御	A	10°C
3	フィードバック制御	B	0.7°C
4	フィードフォワード制御	B	0.001°C

(3) 1次元熱伝導系を対象にしたふく射加熱の高精度温度制御の実験的検討

1次元モデル実験にてふく射加熱の学習制御により外乱温度変動の2%に低減できることがわかった。

(4) 2次元熱伝導系を対象にした制御ヒータ加熱の高精度温度制御の理論的検討

① 計算対象 (図2)

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。大気中で自然対流冷却されている垂直平板のC部にある外乱ヒータの発熱がON/OFF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。制御周期5sとする。

② 各種制御法についての計算結果 (表2)

制御なしの場合、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 (制御モデルにステップ応答パターン、パルス応

答パターン、ネットワークモデルを使った場合) のa目標位置の温度変動を示す。これより、原因がわかる外乱について2点モニターフィードバック制御 (No.3) により制御なし外乱温度変動 (No.1, 図3) の1%にできることがわかった。また、ステップ応答モデルを使ったモデル予測制御法 (No.5, 図4) により外乱温度変動の0.1% (外乱温度変動2°Cの環境にて対象物の温度変動を0.002°C) にできることがわかった。さらに、アクティブ制御の検討を行ったが、制御パターン作成時のわずかな誤差が時間的に積算されて大きく影響することがわかった。アクティブ制御とフィードバック制御との複合制御も検討したが、両者の制御が干渉し変動が大きくなる場合があることがわかった。

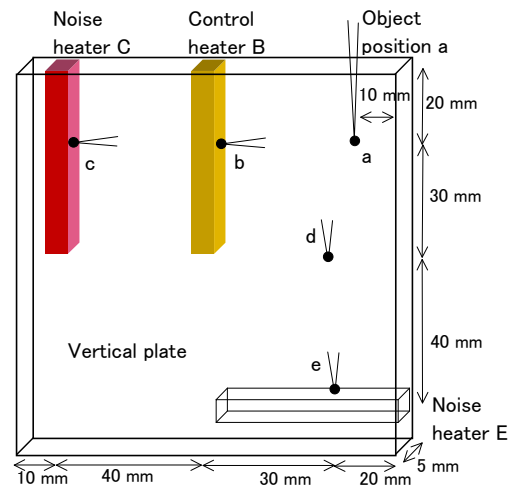


図2 計算対象

表2 計算結果

No	制御方法	モニター位置	温度変動
1	制御なし	---	2.3°C
2	フィードバック制御	b	0.2°C
3	フィードバック制御	b, d	0.03°C
4	フィードフォワード制御	b	0.2°C
5	モデル予測制御 (ステップ応答パターン)	a, c	0.002°C
6	モデル予測制御 (パルス応答パターン)	a, c	0.025°C
7	モデル予測制御 (ネットワークモデル)	a, c	0.14°C

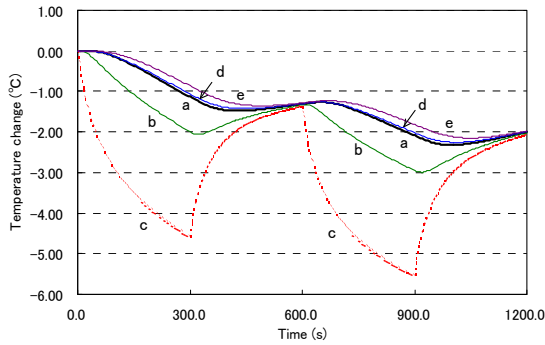


図3 制御なしの場合の温度変化

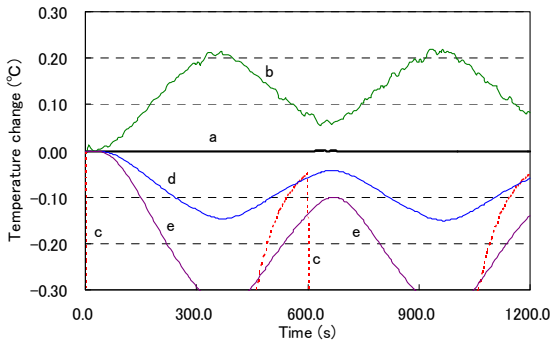


図4 ステップ応答モデルを使ったモデル予測制御の場合の温度変化

③ モデル予測制御における各種制御因子の影響

モデル予測制御において、制御周期は制御ヒータ位置と目標位置との間の伝熱の時定数（図2の条件では80 s）の1/10以下が良い。理想とする応答特性の影響も、同様に制御対象の時定数で決まる。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。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。予測モデルの精度誤差や温度モニターの計測誤差は、要求される温度制御精度より良い精度が必要である。

(5) 2次元熱伝導系を対象にした制御ヒータ加熱の高精度温度制御の検証実験（図5）

2次元熱伝導系を対象にした図2と同じ装置構造のヒータ加熱制御実験にて検証実験した。実験により精度に良いステップ応答を得るは難しいために、ネットワークモデルを使ったモデル予測制御法を用いた。それにより外乱温度変動の5%（外乱温度変動2°Cの環境にて対象物の温度変動を0.1°C）にでき、理論結果と同程度であることを示した。しかし、ネットワーク予測モデルの精度誤差や温度モニターの計測誤差のため、今の実験装置ではこれが制御の限界であることがわかった。

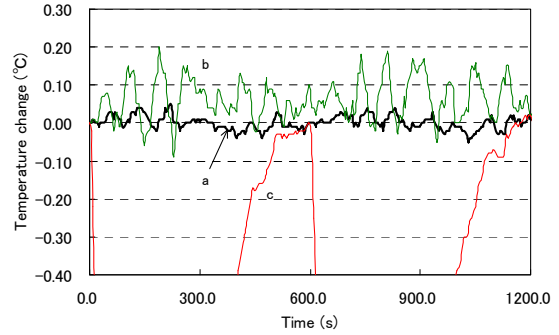


図5 実験結果

(6) ふく射加熱による温度上昇速度の制御の理論的検討

① 計算対象（図6）

ふく射加熱による100°C/sの急速昇温について、各種の制御方法と昇温速度誤差との関係を検討する。円筒形装置の上下に各1個のハロゲンランプヒータを設け、その間にステンレス円板を入れて加熱し、円板の中心温度の時間変化を検討するものである。

② 各種制御法についての計算結果（表3）

目標昇温速度100°C/sについて、50°C付近と700°C付近の昇温速度誤差について7ケースの制御方法を用いて検討した。方法⑥：伝熱モデルに昇温速度で補正する制御方法、方法⑦：関係式に昇温速度で補正する制御方法が、700°C付近における昇温速度の誤差を0.1°C/s以下、50°C付近で昇温速度の誤差を3°C/sに小さくでき優れていることがわかる。計算結果の温度と温度上昇速度を図7、8に示す。制御間隔が最も重要な因子であり、複合制御法を用いることが高精度化に重要であることを明らかにした。

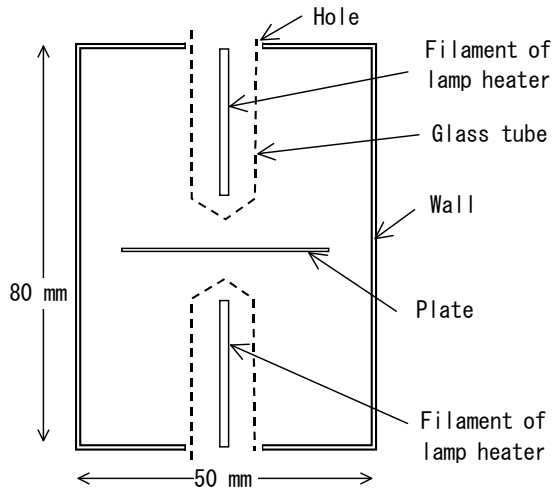


図6 計算対象

表3 計算結果

制御方法	誤差 (50°C)	誤差 (700°C)
① PID 温度制御	20°C/s	0.1°C/s
② PID 温度上昇制御	4°C/s	0.1°C/s
③発熱量を補正させる制御方法	2°C/s	0.6°C/s
④ 伝熱モデル制御	5°C/s	35°C/s
⑤ 学習制御	5°C/s	6°C/s
⑥ 伝熱モデルと補正の複合制御	3°C/s	< 0.1°C/s
⑦ 学習制御と補正の複合制御	2°C/s	< 0.1°C/s

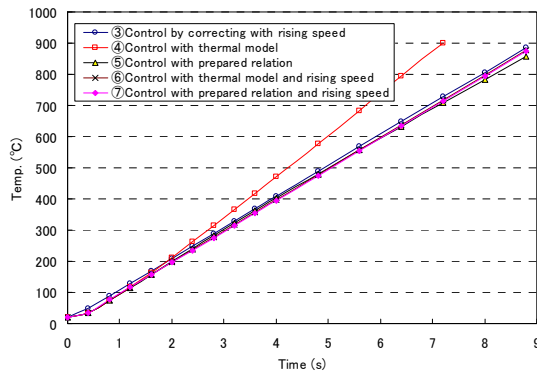


図7 温度変化

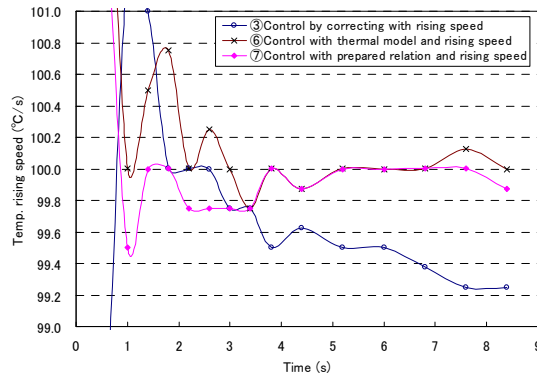


図8 温度上昇速度

③ 温度上昇速度の誤差に及ぼす各種制御因子の影響

誤差因子として温度をモニターしてから制御するまでに0.02s時間遅れがあることと、モニター温度に周期的に±0.5°Cの計測誤差がある場合を検討し、方法⑥：伝熱モデルに昇温速度で補正する制御方法は、制御の時間遅れによる誤差への影響は小さいが0.5°Cの計測誤差によって昇温速度に7°C/sの誤差が生じることを示した。

(7) ふく射加熱による温度上昇速度の制御

の検証実験 (図9)

図6と同じ装置のふく射加熱による100°C/sの急速昇温について、学習制御により目標温度上昇速度の3%精度で制御できることを示した。さらに0.1sの制御遅れや0.5°Cの温度モニターの計測誤差が10%もの誤差を生じる原因になることを示した。

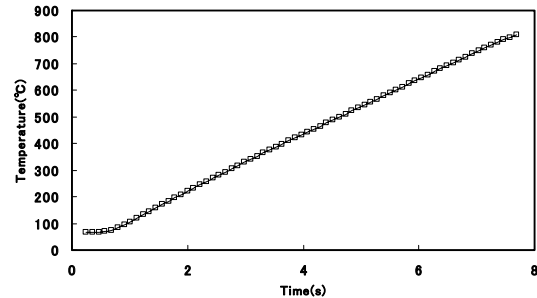


図9 実験結果

(8) 温度変動要因

実際の温度変動要因の1つである大気温度変動と空気対流変動データを分析評価し、空気対流変動が特に大きく影響することがわかり、高精度温度制御を行うための要素技術データとしてまとめた。

(9) まとめ

以上のように、本研究では、外乱温度変動がある環境下に置かれた対象物の温度変動を最小限にするための制御技術を明らかにし、制御の高精度化のための方法を示し、高精度温度制御技術を広い分野に適用できるように、温度制御因子と温度変動との定量的関係をまとめ、制御の限界を明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

① 平澤茂樹, 戸田禎孝, ランプ急速熱処理装置における昇温速度の高精度制御方法の検討, 日本機械学会論文集, B編, 74巻, 740号, pp.767-773, (2008), 査読有

〔学会発表〕(計6件)

① 平澤茂樹, 伊藤心也, 発熱変動ある平板の温度変化を最小にする熱制御技術の検討(モデル予測制御法), 第46回日本伝熱シンポジウム, 2009.6.2, 京都市

② Hirasawa, S., Toda, S., Optimum Heating Control Method to Keep a Given Temperature

Rising Speed of a Plate during Rapid Thermal Processing, 2008 ASME International Mechanical Engineering Congress, 2008.11.3, アメリカ, ボストン市

③ 平澤茂樹, 戸田禎孝, ランプ熱処理装置における昇温速度の高精度制御方法の検討, 第45回日本伝熱シンポジウム, 2008.5.21, つくば市

④ Hirasawa, S., Ito, S., Analytical Study of Thermal Control Method to Minimize Temperature Change of a Plate with Changing Heat Generation, 2007 ASME-JSME Thermal Engineering Summer Heat Transfer Conference, 2007.7.11, カナダ, バンクーバー市

⑤ 平澤茂樹, 伊藤心也, 発熱変動ある平板の温度変化を最小にする熱制御技術の検討, 第44回日本伝熱シンポジウム, 2007.5.24, 長崎市

⑥ 平澤茂樹, 伊藤心也, 福嶋芳雅, 発熱変動ある平板の温度変化を最小にする熱制御技術の解析的検討, 第43回日本伝熱シンポジウム, 2006.5.31, 名古屋市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平澤 茂樹 (HIRASAWA SHIGEKI)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：70403300

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者