

電気炉温度のファジィ制御に関する二、三の考察

Some Consideration on Fuzzy Temperature Control of an Electric furnace

○井上哲也, 竹田 宏

○Tetsuya Inoue, Hiroshi Takeda

東北学院大学工学部

Tohoku Gakuin University

キーワード: 電気炉 (Electric Furnace), ファジィ制御 (Fuzzy Control), アンチワインドアップ (Anti-Windup), バンプレス切替 (Bumpless Transfer), デュアルモード制御 (Dual Mode Control)

連絡先: 宮城県多賀城市中央1丁目13番1号 東北学院大学 工学部 電気工学科 竹田研究室
竹田宏 Tel.: (022)368-1115, Fax.: (022)368-7070, E-mail: htakeda@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

1. はじめに

半導体、磁性材料、その他電子材料の製造プロセスにおいて電気炉は必要不可欠である。生産性の向上と製品の均質性、特性の安定化のために高速かつ高精度の温度制御が要求され、現在も多くの研究がなされている。電気炉の温度制御は現在もPID制御が主流であり、例えば、半導体ウェハの成膜に用いられる縦型拡散炉では二つの熱電対情報を用いたカスケードPID制御方式が用いられている。しかしPIDパラメータの最適調整を行う際に、制御対象や外乱の数学的モデル、あるいは閉ループ応答特性が必要になる。本論文では制御対象や外乱の数学的モデルを必要とせず、人間の経験に基づく直感的なアルゴリズムを実行することができるファジィ制御^{1), 2)}を導入するための基礎的な考察を行う。

2. 電気炉のモデルと制御方式

本研究の目的は、現在カスケードPID制御方式を採用している縦型拡散炉の温度制御にファジィ制御を導入³⁾し、その高速化、高精度化を図ることである。しかし、本論文ではファジィ制御の基礎的な考察を行うため Fig.1 に示すように制御対象を1次遅れ系+むだ時間要素で近似し一つのコントローラのみを用いた制御系を対象とする。

コントローラとしてPIDコントローラ、ファジィコントローラ、そしてこれらを併用したデュアルモードコントローラについて考察を進めていく。

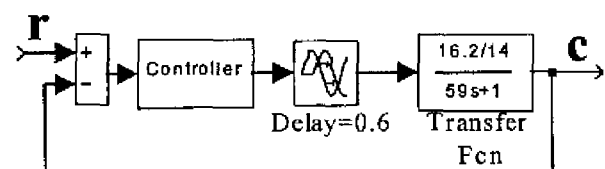


Fig.1 電気炉の近似モデル

3. PID 制御⁴⁾

3.1 PID コントローラ

PID コントローラの各パラメータは Chien らの最適調整法によるもので $K_c=51.0$, $T_i=59.0$, $T_d=0.3$ (追値: オーバーシュートなし) とし、そのステップ応答を Fig.2-(a) に示す。

3.2 操作量の非線形性

実際の電気炉にはマイナスの電流を流して冷却することができない、また電気炉の最大電流には制限がある。しかし、Fig. 2-(a) の応答を生ずる操作量は Fig. 3-(a) であり、明らかにマイナス電流は見られない。また、操作量の最大値は約 50 となっているが、本研究ではこの操作量の制限を 25 と仮定し

て考察を進める。Fig.1 の制御系の操作量 i に $0 \leq i \leq 25$ の非線形要素を加えた制御系が Fig.4 であり、そのときのステップ応答および操作量はそれぞれ Fig.2-(b), Fig.3-(b) である。

3.3 非線形補償

ここで非線形 (飽和) を補償するためにアンチワインドアップ法⁵⁾ を用いる (Fig.5)。アンチワインドアップ法は操作量が飽和している間に飽和前後の操作量の差を K_a 倍して積分項にフィードバックして積分項が増大するのを抑制するもので、制御系に積分要素と飽和要素があるときの補償法としてよく用いられる。このときの K_a は試行錯誤によって決定したものである。

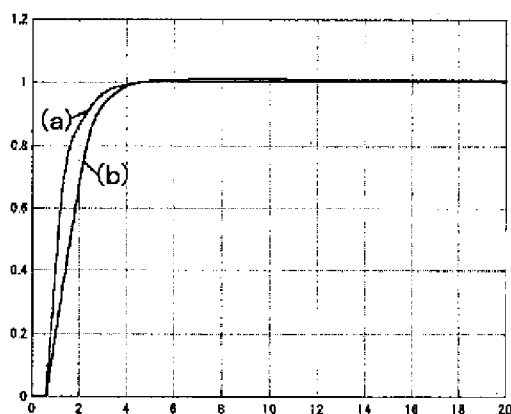


Fig.2 PID 制御系のステップ応答
(a)線形, (b)非線形

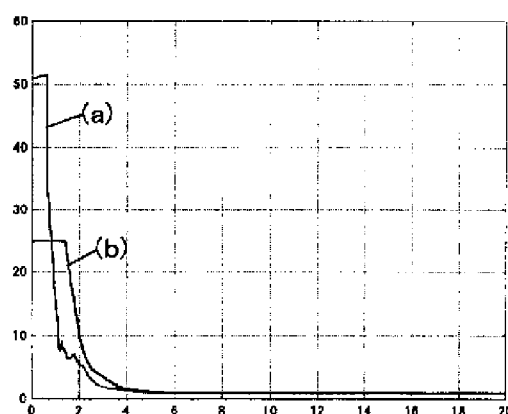


Fig.3 操作量 (a)線形, (b)非線形

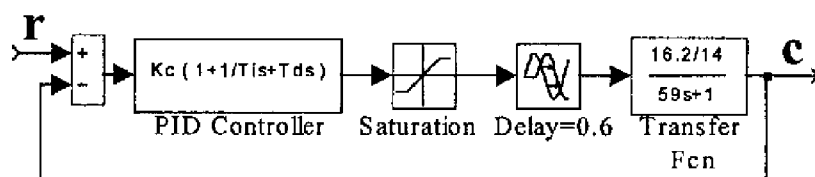


Fig.4 PID 制御系 (非線形)

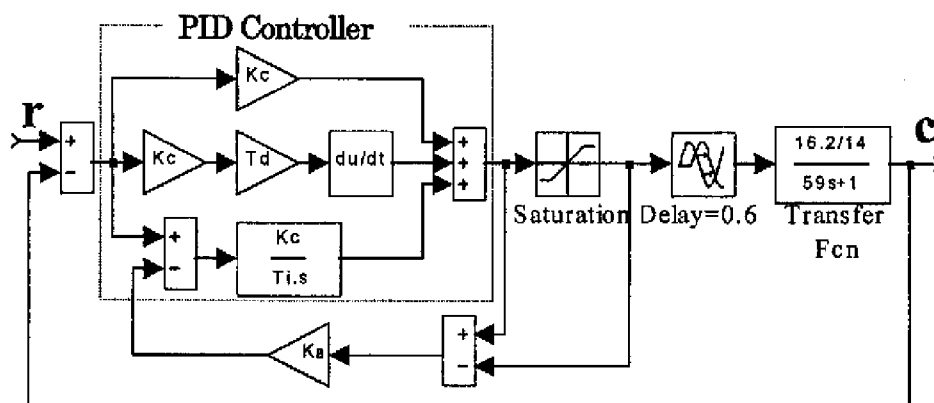


Fig.5 PID 制御系 (アンチワインドアップ)

3.4 シミュレーション結果

制御系が線形の場合、非線形を考慮した場合、非線形を考慮しアンチwindアップ補償を施した場合のステップ応答を Fig.6, その拡大図を Fig.7 に示す。偏差が±1%を許容するとすれば、非線形では整定がかなり遅れるがアンチwindアップの効果により若干立ち上がりが遅いものの速く整定している。

4. ファジィ制御

4.1 Δi 制御

電気炉においてその操作量は電流 (i) である (Fig.8)。しかし、種々の環境の下で所望の温度を保持する、あるいは温度をある程度変化させる場合に、それぞれの電流を特定するには制御対象や外乱の数学的モデルが必要になる。これではファジィ制御の持つ良さを十分に引き出すことができない。そこで電流 (i) に変わるファジィ出力として電流の変化分 (Δi) が考えられる (Fig.9)。電流の変化分を操作量と見なすことで、所望の温度を保持する場合には電流変化分 (Δi) = 0、温度を変化

させる場合には電流変化分 (Δi) を増減させることによって、人間の言語的表現をそのまま制御に反映させることができる。また、制御対象や外乱の数学的モデルも不要となる。ただし、あくまでも制御対象に加える操作量は電流 (i) であるので電流変化分 (Δi) を積分し、電流 (i) に変換してから制御対象に加える必要がある。すなわち、電流変化分 (Δi) 制御は制御系に積分 (I) 動作を導入したことに相当する。この事により制御系が 0 形から 1 形の系に変わり、オフセットがなくなるといったような効果も見込める。

4.2 ファジィ制御系

ファジィ制御系を Fig.10 に示す。PID 制御と比較するために、この制御系に対しても操作量 i に $0 \leq i \leq 25$ の非線形要素を加えてある。ファジィ推論によって得られた出力電流変化分 (Δi) を K_f 倍して積分したものを飽和によって制限して最終的なファジィコントローラの出力とする。 K_f は速応性と安定性の面から最良の値を次に示すファジィコントローラと並行して試行錯誤的に決定した。

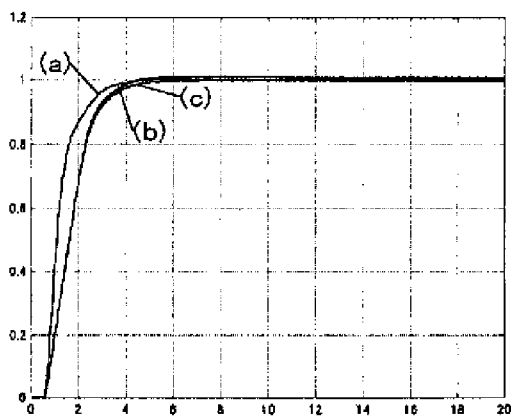


Fig.6 PID 制御系のステップ応答
(a)線形, (b)非線形, (c)非線形(アンチwindアップ)

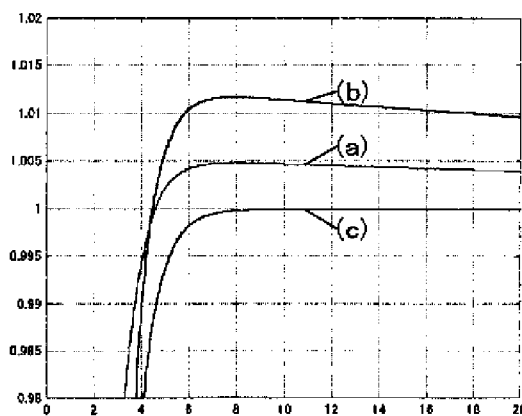


Fig.7 PID 制御系のステップ応答 (拡大図)
(a)線形, (b)非線形, (c)非線形(アンチwindアップ)

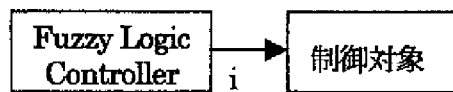


Fig.8 i 制御

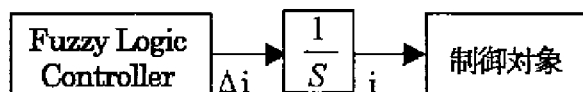


Fig.9 Δi 制御

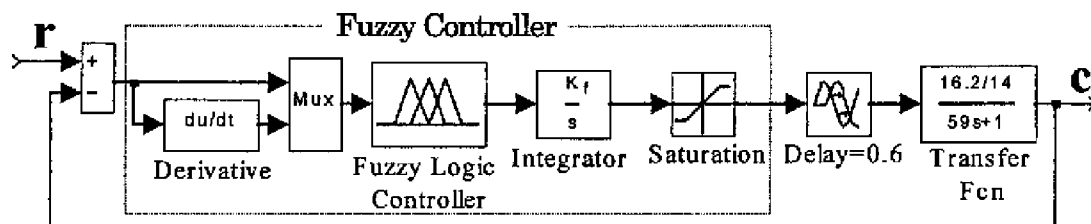


Fig.10 ファジィ制御系

4.3 ファジィコントローラ

< 入出力 >

- 入力1 : 目標値に対する偏差 e
- 入力2 : 目標値に対する偏差の変化 Δe
- 出力 : 電流の変化分 Δi

< ファジィ集合 >

- 入力1 : PB(正で大きい値)
- PS(正で小さい値)
- ZO(ゼロ)
- NS(負で小さい値)
- NB(負で大きい値)

入力2 : P(正)

- ZO(ゼロ)
- N(負)

- 出力 : PB(正で大きい値)
- PS(正で小さい値)
- ZO(ゼロ)
- NS(負で小さい値)
- NB(負で大きい値)

Fig.11~Fig.13, Table.1に示すファジィコントローラのメンバーシップ関数やファジィルールは試行錯誤による調整を行った。定常時の精度を上げるため入力1のメンバーシップ関数 e をやや小さめに設定した。マイナスの電流を流せないのできるだけオーバーシュートを出さないように、出力メンバーシップ関数 Δi において若干マイナスのメンバーシップ関数 (NB, NS) を大きくしている。また、ファジィルールについてもオーバーシュートする前に操作量を急激に減少させるように設定した。このファジィコントローラによるファジィ出力の電流変化分 (Δi) をFig.14に示す。

Table.1 ファジィルール

$e \backslash \Delta e$	P	ZO	N
PB	PB	PB	PB
PS	PS	PS	NB
ZO	PS	ZO	NS
NS	NS	NS	NB
NB	NB	NB	NB

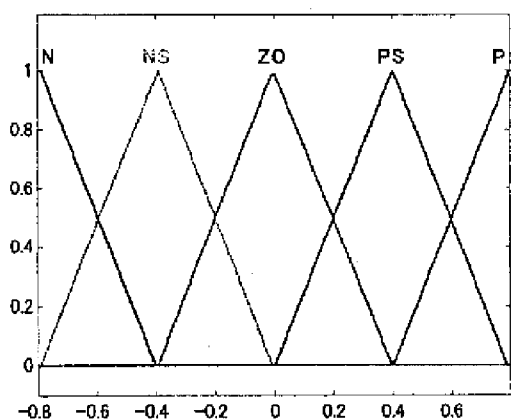


Fig.11 メンバーシップ関数 (入力1 : e)

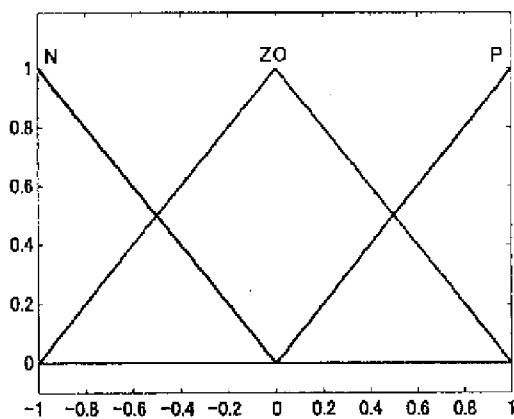


Fig.12 メンバーシップ関数 (入力2 : Δe)

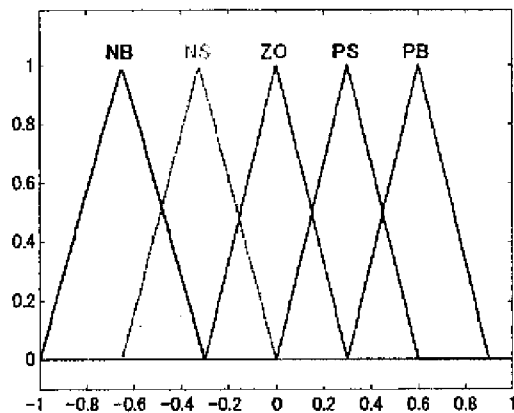


Fig.13 メンバーシップ関数 (出力 : Δi)

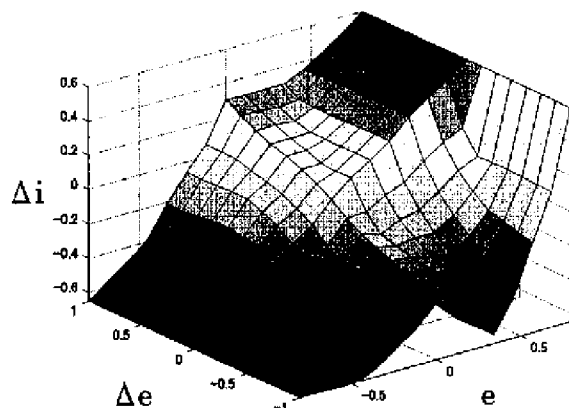


Fig.14 ファジィ出力の電流変化分 (Δi)

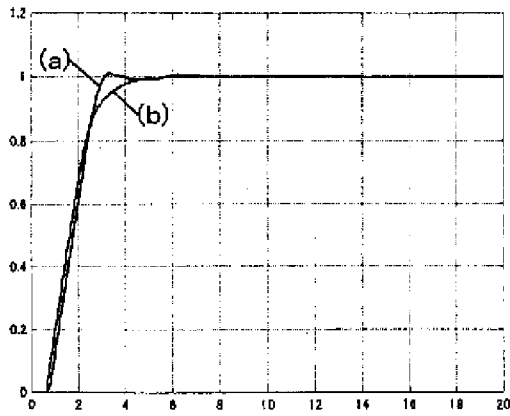


Fig.15 (a)ファジィ制御系と(b)PID 制御系の応答

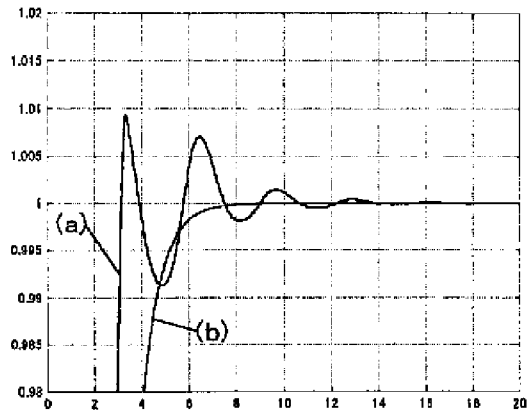


Fig.16 (a)ファジィ制御系と(b)ファジィ制御系の応答 (拡大図)

4.4 シミュレーション結果

ファジィ制御系とPID制御系を比較したステップ応答を Fig.15, Fig.16 に示す。±1%に整定する時間はファジィ制御系の方が速い。

5. デュアルモード制御

5.1 デュアルモード制御

Fig.15, Fig.16 から、ファジィ制御はPID制御に比べ偏差が±1%以内に収まる整定時間が短くなる。しかし、許容範囲内ではあるがPID制御に比べ振動的である。そこで過渡状態では速応性に優れたファジィ制御を用い偏差が±1%以内に収まった時にPID制御に切り替えるデュアルモード制御を採用する。一般にモードスイッチングの際にPIDコント

ローラの操作量とファジィコントローラの操作量の違いからジャンプ(Bump Transfer)が起こる。これを避けるためにデュアルモード制御系にはバンプレス切換⁵⁾を用いる。このバンプレス切換はファジィコントローラからの操作量と、飽和前のPIDコントローラからの操作量に差がある場合に、その差を K_b 倍して積分項にフィードバックすることで積分項からの出力を増減し、PIDコントローラの操作量をファジィコントローラからの操作量の差を減少させスイッチング時の操作量のジャンプを軽減する。また、この制御系ではPIDコントローラに切り換えられた後にアンチワインドアップとしての効果も期待できる。このデュアルモード制御系のブロック線図を Fig.17 に示す。

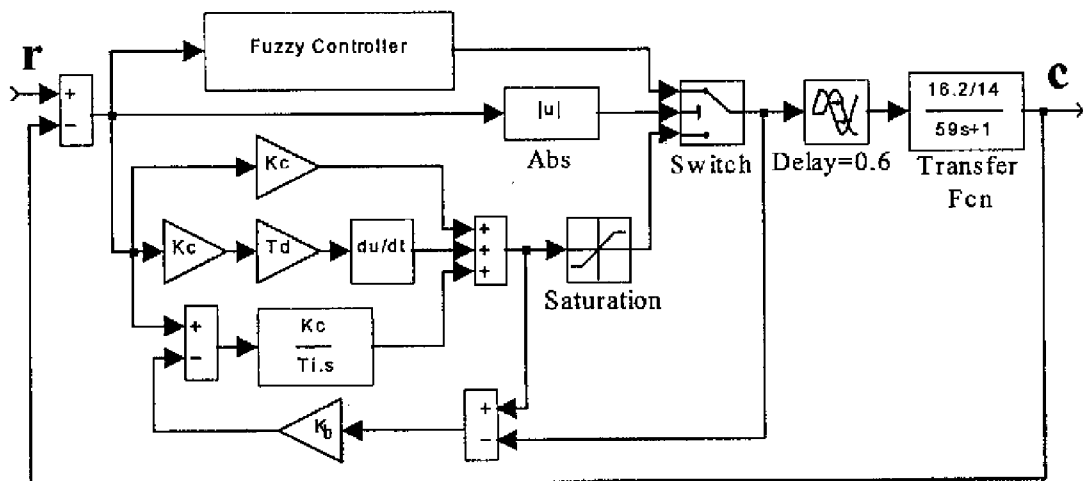


Fig.17 デュアルモード制御系

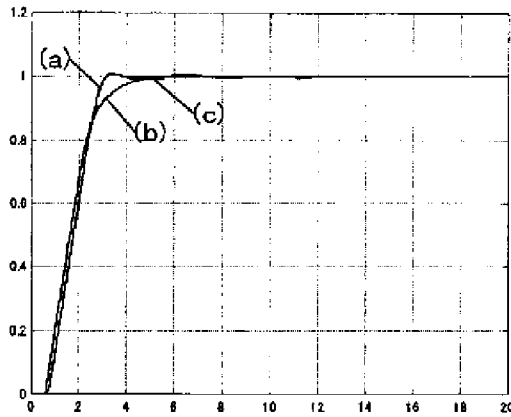


Fig.18 (a)デュアルモード制御系,(b)ファジィ制御系
(c)PID制御系のステップ応答

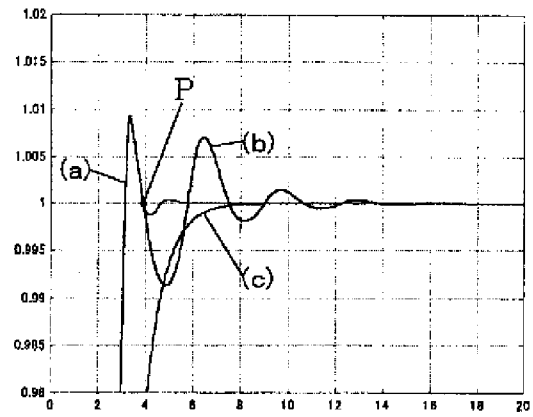


Fig.19 (a)デュアルモード制御系,(b)ファジィ制御系
(c)PID制御系のステップ応答 (拡大図)

5.2 シミュレーション結果

デュアルモード制御系のステップ応答を Fig.18, その拡大図を Fig.19 に示す。P点近傍までファジィ制御、その後PID制御に切り換り整定時間、定常特性がともに優れていることがわかる。

6. 終わりに

今回の考察より、電気炉にファジィ制御を導入する場合、単独で用いるよりもPID制御と併用し、かつバンプレス切換えを行うデュアルモード制御が有効であると考えられる。

現在、カスケード制御を採用している縦型拡散炉にファジィ制御を導入する際、以下の点について考慮しなければならない。

- 1) ファジィ(デュアルモード)コントローラ個数
- 2) メンバシップ関数、ファジィルールの吟味
- 3) むだ時間変動に対する対策

参考文献

- 1) 田中一男 :アドバンストファジィ制御 共立出版 (1994)
- 2) 廣田薫 寺野寿郎 :コンピュータロール 28 (特集/ファジィ制御)コロナ社(1989)
- 3) 竹田 井上 :電気炉のファジィ温度制御について 電気関係学会東北支部連合大会講演論文集 1B7 (1999)
- 4) システム制御情報学会編 須田信英 :システム制御情報ライブラリー6 PID制御 朝倉書店(1992)
- 5) Youbin Peng, Damir Vrancic, Raymond Hanus : Anti-Windup,Bumpless,and Conditioned Transfer Techniques for PID Controllers IEEE Control Systems Vol.16 No.4 48/57 (1996)