

# 室内空調制御に関するPID制御とファジィ制御の比較検討

2000MM036 加藤木 元浩 2000MM066 新浪 俊博

指導教員 高見 勲

## 1 研究の目的と意義

制御対象を身近なものにすることにより、制御の有効性を知る。また、同じ制御対象をPID制御とファジィ制御に分かれて研究し、その結果を比較検討することにより、それぞれの持つ特徴、優位性を探る。

## 2 制御対象

室内空調システムのモデル[1]を一時遅れ+むだ時間に近似でき、伝達関数は以下ようになる。

$$G_p(s) = \frac{-K}{1+Ts} e^{-Ls}$$

定常ゲイン  $K = 0.1$  [%] , 時定数  $T = 1.5$  [min] , むだ時間  $L = 3$  [min]

## 3 PID制御

PID制御[2]とは比例、積分、微分動作を持つ制御器を使う制御のことで、PID制御器は、

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

と表すことのできる。この制御器における  $K_p$  ,  $K_i$  ,  $K_d$  と

は、それぞれ比例ゲイン、積分ゲイン、微分ゲインである。PID制御のブロック線図を図3.1に示す。

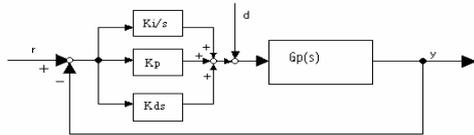


図3.1 PIDブロック線図

### 3.1 PID調整則

PID制御器に用いるパラメーターはZiegler-Nicholsのステップ応答法[3]と部分的モデルマッチング法[3,4]により算出する。

Ziegler-Nicholsのステップ応答法[3]により求められるコントローラーは

$$C(s) = -\frac{10 + 60s + 90s^2}{s}$$

となる。また、部分的モデルマッチング法により求められるコントローラーは、

$$C(s) = -\frac{3.36 + 55.55s + 83.49s^2}{s}$$

である。それぞれのシミュレーションを図3.2, 3.3に示す。

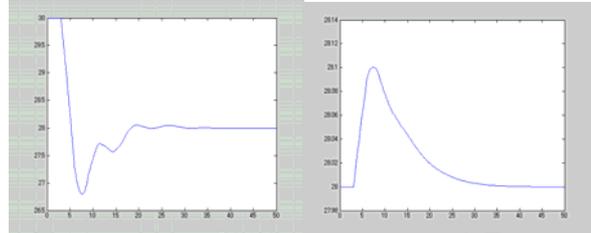


図3.2 ステップ応答法シミュレーション結果

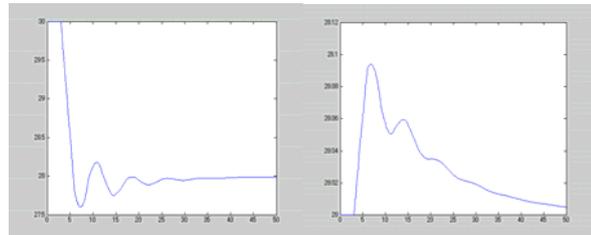


図3.3 部分的モデルマッチング法シミュレーション結果

## 4 PID制御の改良

### 4.1 I-PD制御

I-PD制御[2]とは、PID制御の比例、微分動作を観測量のみに働くようにしたものである。I-PD制御のブロック線図を図4.1に示す。

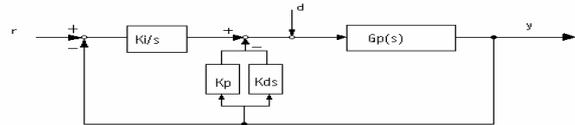


図4.1 I-PD制御ブロック線図

これにより、ステップ状の変化により過大な変化のために生じていたオーバーシュートを改善できると考えられる。I-PD制御を用いたシミュレーション結果を図4.2に示す。

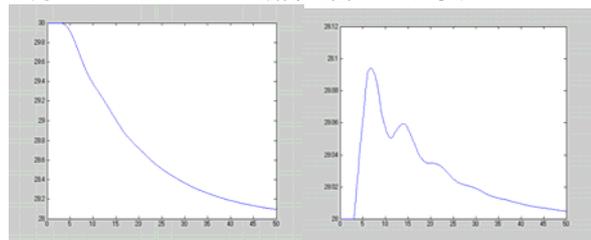


図4.2 I-PD制御シミュレーション結果

### 4.2 2自由度制御

2自由度制御[2]とは、従来のPID制御に簡単な補償装置を組み込むことにより得ることのできる制御方式のことである。今回は代表的な形のひとつである、フィードバック型を使用する。この2自由度制御のフィードバック型と呼ばれる形を図4.3に示す。

また、そのシミュレーション結果を図4.4に示す。

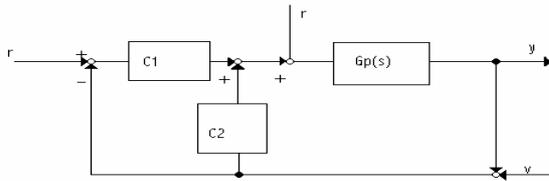


図 4.3 2自由度制御フィードバック型ブロック線

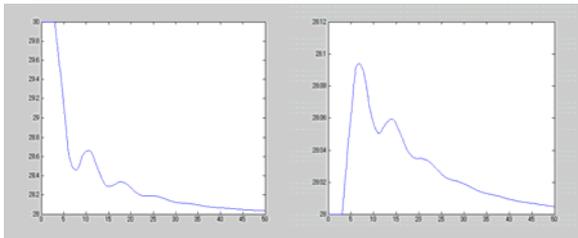


図 4.4 2自由度制御シミュレーション結果

### 4.3 パラメーター調整

4.2の2自由度制御で得られた波形から揺らぎをなくすためにパラメーターを調整する。その結果を図4.5に示す。

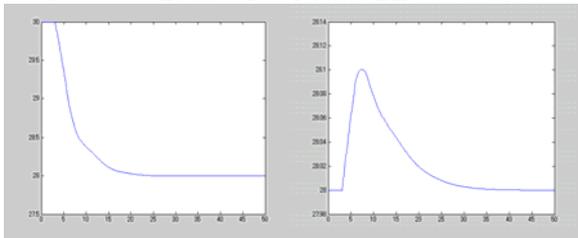


図 4.5 パラメーター調整後のシミュレーション結果

### 5 ロバスト安定性

ロバスト安定性とは伝達関数の不確かさや特性変動のもとでの閉ループの安定性を示す。今回の空調モデルは、 $0.05 \leq K \leq 0.5$  [%] (動作点では  $K = 0.1$  [%])  
 $10 \leq T \leq 70$  [min] (動作点では  $T = 15$  [min])  
と特性が変動する。特性変動における最大時、最小時、動作点における安定性は、フルビッツの安定判別法[5]により証明できる。また、最大時、最小時において外乱応答のシミュレーションを行う。その結果を図5.1に示す。

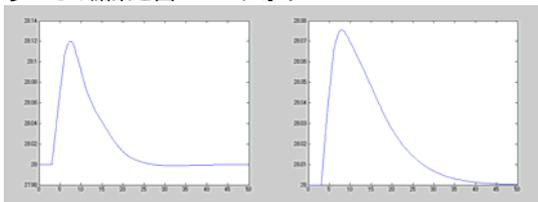


図 5.1 最大時、最小時の外乱応答

動作点においては図4.5より、また、最大時、最小時においても図5.1から外乱が入った後、もとの値に収束しており安定だといえる。

### 6 ファジィ制御による空調機への適用

今回の制御対象である空調機は人の主観により操作されるものであり、人間の持つあいまいさを評価に入れるファジィ制御に適したモデルとあると考えた。

### 7 本研究のファジィ推論

本論文での研究対象あるエアコンの制御に伴い、主観によりメンバシップ関数、ファジィルールを定義し、推論を進める。制御対象である空調機器、部屋のモデルは前述したとおりである。

今回の研究では最初に2入力、1出力型のコントローラを開発

する。入力1にはセンサから得た室温状況  $T$  を、入力2からは室温変化  $\Delta T$  が入力されるとし、出力には冷水バルブの開度  $\{ -100\% \sim 100\% \text{ (全開)} \}$  とする。

次に今回の研究の制御ルールについて説明する。観測情報としてセンサから二つの情報{室温 ( $T$ )と温度変化 ( $\Delta T$ )}が送られてくる。それがルール前件部である IF “ $T$  and “ $\Delta T$ ” である。この二つの情報をファジィコントローラで推論、近似照合する。推論によって得られた操作量 “ $u$ ” [%]が出力としてアクチュエータに情報を与える。この操作量によって得られた結果(室温)、またこの結果によって得られたもうひとつの情報(温度変化)がセンサによって観測され、フィードバックされるという制御である。次に室温  $T$ 、室温変化  $\Delta T$ 、出力  $u$  のメンバシップ関数、およびファジィルール表を図7.1, 7.2, 7.3, 表7.1に示す。

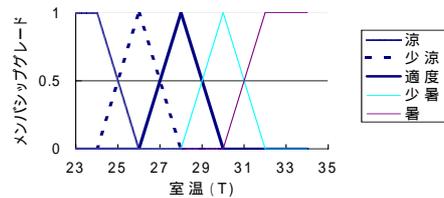


図 7.1 室温のメンバシップ関数

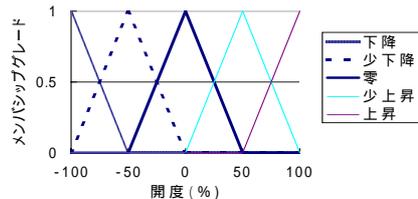


図 7.2 室温変化 ΔT のメンバシップ関数

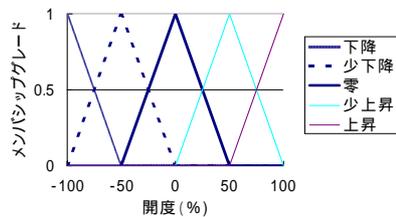


図 7.3 出力のメンバシップ関数

表 7.1 ファジィルール表

ファジィルール表

		ファジィルール表				
		下降	少下降	零	少上昇	上昇
T	ΔT					
涼	涼	弱弱	弱弱	弱弱	弱	中冷
涼	少涼	弱弱	弱弱	弱	中冷	強
適度	適度	弱	弱	中冷	強	強強
適度	少暑	弱	中冷	強	強強	強強
暑	暑	中冷	強	強強	強強	強強

各入力の適合度を各入力変数のメンバシップ関数値の最小値とする。各入力のファジィ化の際に以下のような演算方式を使用する。また  $\wedge$  は値の最小値をとり、 $\vee$  は最大値をとる。

$$\mu_B(y) = \vee_{x \in X} \{ \mu_R(y, x) \wedge \mu_A(x) \} \quad [6]$$

この演算方式による具体的な計算例を以下に示す。

例えば室温 28.8 [ ], 室温変化 0.35 [ /min] が与えられたとする。各メンバシップ関数より適合度をだす。まず室温 28.8 [ ] なので室温のメンバシップ関数により、適合度 “少し暑い” 0.2 “適度” 0.8 がだせる。同じように室温変化の適合度は “少し上昇” が 0.7、“零” が 0.3 である。関係するルールは表により、操作量 “中冷” “強冷” “強冷” “強強冷” の 4 つである。

$$\text{中冷} = \mu_{\text{適度}}(28.8[ ]) \wedge \mu_{\text{零}}(0.35[ /min]) \\ = 0.2 \wedge 0.3 = 0.2$$

同様にして “強” = 0.2, “強” = 0.3, “強強冷” = 0.7 と算出できる。よってバルブの開度は

$$\text{開度} = (\mu_{\text{中冷}}(\text{開度}) \wedge 0.3) \vee (\mu_{\text{強冷}}(\text{開度}) \wedge 0.7) \\ \vee (\mu_{\text{強強冷}}(\text{開度}) \wedge 0.2) \\ \vee (\mu_{\text{強強冷}}(\text{開度}) \wedge 0.2)$$

で求められる。この重心位置が最終的な操作量である。これらのメンバシップ関数の値を Fuzzy logic に入力する。前述した推論はこの Fuzzy logic によって計算され、操作量を制御対象に伝達する。

## 8 シミュレーション

Simulink により得られた波形を図 8.1 に示す。

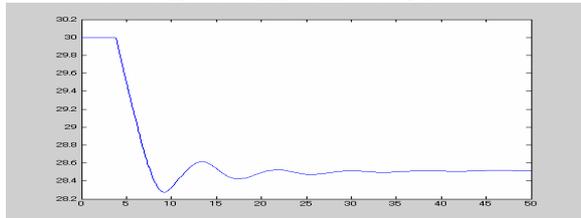


図 8.1 シミュレーション結果

この波形では収束はしているものの、振動的であり、よい波形とはいえない。よって振動を和らげるために出力の開度を弱くした。メンバシップ関数の出力範囲 -100% ~ 100% を -50% ~ 50% に変更した。それによって得られた波形を図 8.2 に示す。

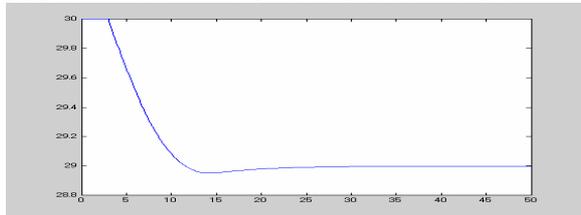


図 8.2 出力範囲変更後のシミュレーション結果

振動はおさまったが制定するまでの時間が長くなってしまった。冷却力を弱めてしまったからである。よって出力範囲を変えずに振動をなくすため、メンバシップ関数を変更する。

“少し暑い” “少し涼しい” のメンバシップ関数を中心に近づけることで、室温が “とても暑い” 時、開度を大きく開き、より強く冷やす (開度 75% ぐらい) ことで制定を早くさせ、“適度” に近づいてきたときには開度をできるだけ小さく絞る (開度 25% ぐらい) メンバシップ関数にした。

メンバシップ関数を変更することによって振動が起らずかつ早い制定を実現した。しかしもうひとつ問題がある。オフセットである。ファジィ制御の特性上オフセットは免れないのだが 1 [ ] のオフセットは大きすぎる。これは室温のメンバシップ関数 “適度” が 27 [ ] から 29 [ ] まで網羅するファジィ集合であることが問題であると考えた。それは 27 [ ] から 29 [ ] までの室温なら “適度” の適合度が関係してしまうからである。よって室温のメンバシップ関数 “適度” の範囲を縮小した。更に室温の範囲全体を縮小し、より厳密な室温変化にも対応できるようにした。このようにして得られた波形を図 8.3 に示す。

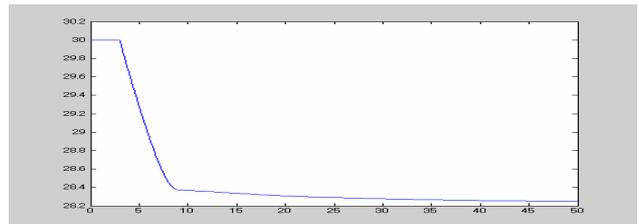


図 8.3 メンバシップ関数 “適度” を狭めたシミュレーション結果

オフセットは小さくなった。しかし 0 ではない。更にメンバシップ関数 “適度” の範囲を狭いとこだがあまり狭めると適合しない室温ができてしまう。

“少し暑い” “少し涼しい” を台形にすることで “適度” の設定値 28 [ ] に近いときにも “少し暑い” “少し涼しい” のメンバシップ関数に適合することが可能になる。この方法で得た波形を図 8.4 に示す。

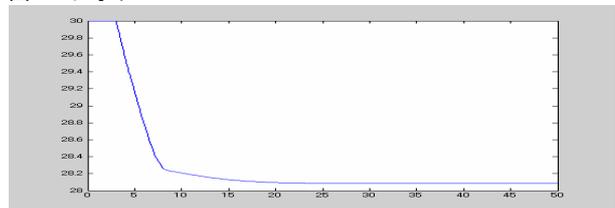


図 8.4 メンバシップ関数を台形にしたシミュレーション結果

かなりよい成果が出た、しかし微量だがオフセットが残った。これを更に解消するために新たにルールを加える。積分ルールを加えることにする。過去の室温変化を設定値からの偏差としてルールを組み込むことによりオフセットの解消を目指した。積分の変数は “高かった” “変わらなかった” “低かった” の 3 つである。最終的に得られた室温と設定値である 28 [ ] との偏差を取り積分される。その値が入力 3 に入り積分情報として扱われる。このようにして得られた波形を図 8.5 に示す。

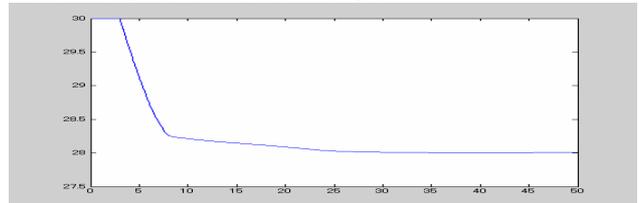


図 8.5 3 入力型ファジィコントローラーのシミュレーション結果

オフセットはほぼなくなったといえる。更によい成果を求めるために fuzzy logic を二つ連結した新しいモデルを考案した。

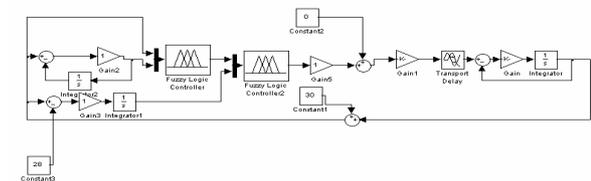


図 8.6 2 段階型ファジィロジックのモデル

最初に室温と室温変化の情報を得る 2 入力 1 出力の fuzzy logic によって推論され出力から値が出る、しかしこれは操作量ではなく次の fuzzy logic に送るための情報でしかない。この情報と積分情報を入力とするもう一つの fuzzy logic もまた 2 入力 1 出力型のコントローラでありこの出力から操作量が出るのである。こ

のモデルのメリットはルールの組み方が容易で、扱いやすいことにある。

前述した 3 入力型のコントローラは  $5 * 5 * 3$  の 75 ものルールを創り出さなければならない。ルールの複雑化によってチューニングする際、修正するものが定まらず、困惑してしまうことが多かった。今回のモデルでは最初の fuzzy logic に  $5 * 5$  の 25 ルール、次の fuzzy logic に  $5 * 3$  の 15 ルール、計 40 ルールで済む。このモデルで得た波形を図 8.7 示す。

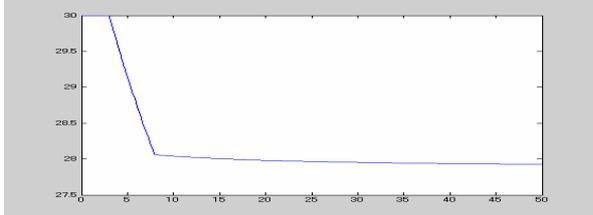


図 8.7 2 段階ファジロジックでのシミュレーション結果

### 9 PID, ファジィ制御の比較検討

本研究における PID 制御とファジィ制御の具体的な比較, 検討の前に, 二つの制御方式の一般的な特徴を表 9.1 にあらす。

表 9.1 ファジィ, PID 制御の特徴

	ファジィ制御	PID 制御
モデル	不要	数式表現
制御則	ルール 並列分散型 言語型	数式 比例, 積分, 微分演算
理論体系	ファジィ理論	古典制御理論
非線形対象への対応	容易	工夫が必要
総合	人間の経験により運転されている制御対象に有効	対象の正確な数式モデルが可能なケースではよい結果が得られる

今回の室内空調システムにおいては人間の主観により運転されていたものであり, また数式モデルでも表すことが可能であり, ファジィ, PID 制御でのアプローチが可能である。

室温  $30[ ]$ , 設定温度  $28[ ]$ ,  $30[\text{min}]$ 後に  $+0.5[ ]$  の外乱が入るといった条件で得られるシミュレーション結果を図 9.1 図 9.2 に示す。

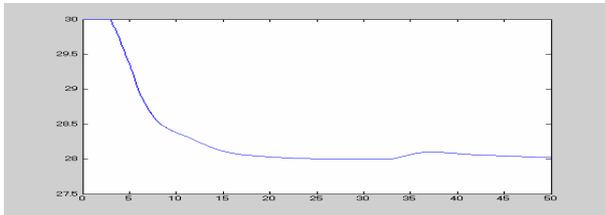


図 9.1 PID 制御シミュレーション結果

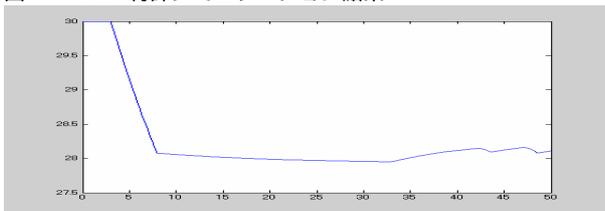


図 9.2 ファジィ制御シミュレーション結果

互いの結果を元に二つの制御方式の特徴を表 9.2 に示す。

表 9.2 PID, ファジィの比較結果

	PID 制御	ファジィ制御
整定時間	約 15 分	約 9 分
オフセット	なし	なし
オーバーシュート	なし	なし
外乱応答	変動値 $0.1[ ]$ 未満 収束が早い	変動値 $0.2[ ]$ リミットサイクル を起こす

ファジィ制御のほうが整定時間が速い。理由として初期状態から大きな操作量をモデルに与えることができるためである。外乱応答に弱くリミットサイクルが発生している。出力ゲインが高いため, 微小な変化で過敏に反応しているからと思われる。リミットサイクルは空調制御として望ましいものではなく, 安定性に欠ける。しかし, 制定時間に 6 分もの差が出るのはファジィの魅力だといえる。

PID 制御はオーバーシュートを発生させないようにするために, 整定時間の短縮に関してはある程度の限界が生じてしまう。一方, 外乱に対しても数式による厳密な制御が可能であり安定性は高いといえる。

### 10 結論

本研究からいえることは PID 制御とファジィ制御共に一長一短がある。

PID 制御は理論が確立されているので制御対象の数式モデルさえ得られれば早い段階での組み込みが可能であり, ほとんどの場合満足のいく結果を得られる。そのため現在の制御方式の主流になっているのも納得がいく。

一方ファジィ制御ではモデルへの組み込み, チューニングが困難であり, 最適な結果を得るまで時間がかかってしまった。しかし非線形モデルへの汎用性が強く, 制御対象のモデルを選ばない事から従来の方式で大変なもの, なかなかうまくいかないものへの成功が期待できる。

今回は室内空調システムという PID, ファジィ制御両方からのアプローチが可能なモデルを使用したのだが, 非線形モデルや, 人の主観, ノウハウで判断しがたいものを制御対象とすれば 2 つの制御手法の特徴がさらに顕著に出るものと思われる。

### 参考文献

- [1] 笠原雅人, 松葉国彦, 葛生克明, 山崎敬則, 橋本幸博, 神村一幸, 黒須茂: 特性変動に伴う空調システムへの PID 制御の適用, 計測自動制御学会論文集 Vol 36, No 5, 431/437 (2000)
- [2] 須田信英: PID 制御, 朝倉書店, 1992
- [3] 赤松貴文, 瀬戸昇, 北森俊行: むだ時間を含む 1 次遅れ系に対する PID 制御の部分的モデルマッチング法に基づいた設計法, システム情報学会論文誌, Vol 13, No 1, pp. 46-52, 2000
- [4] 北森俊行: 制御対象の部分的知識に基づく制御系の設計法, 計測自動制御学会論文集 Vol 15, No 4, pp. 549-555 (1979)
- [5] 岩井善太, 他: 制御工学, 朝倉書店, 1999
- [6] 岩田彰: ソフトコンピューティング, オーム社 p 64, 65

MATLAB/Simulink/Fuzzy logic は米国 the Math Works 社の登録商標