

## 解説



## プロセス制御用ファジィコントローラとその応用†

伊 藤 修 竹

### 1. ファジィ制御とは

#### 1.1 ファジィ制御の概要

知的情報処理への関心が高まるにしたがい、ファジィ制御の実用化が進んでいる。ファジィ制御は熟練オペレータの経験に基づく知識をベースに制御を行うもので、今までの制御方法が使えない分野でも適用が可能である。

従来の制御では、大規模・複雑化したシステムや人間と緊密にかかわるシステムには対応しきれない状況がある。しかし、オペレータはプロセスモデルを知らなくても、何回か試行するうちに適切な制御を行うようになるし、複雑なシステムで制御目的が複数あるような場合でも、目的間の調和をとってうまく制御できる。ファジィ制御はこうした人間の能力を活用しようとするものである。

#### 1.2 制御規則によるモデル化

従来の制御理論を適用するには、プロセスのモデルが必要となる。したがって、プロセスモデルの作成が難しく、できない場合は、従来の制御理論を適用できない。しかし、熟練オペレータはプロセスモデルがなくても、うまく操作を行っている。ファジィ制御では、その操作方法を制御規則でモデル化する。

#### 1.3 ファジィ推論方法

ファジィ推論は多くの方法が提案されているが、ファジィ制御では次の方法がよく用いられる。その理由は次の点にある。

- ① 演算が簡単で演算速度が早い。
- ② 各制御規則と演算結果とが1対1に対応し、演算内容が視覚的に理解しやすい。
- ③ オペレータの操作判断に近く、なじみやすい。

いま、 $N$  個の制御規則の  $i$  番目を

$$\text{IF } x_1 = A_i, x_2 = B_i \text{ THEN } u = C_i \quad (1)$$

とする。ここで、 $x_1, x_2$  に対する入力値を  $x_{10}, x_{20}$  としたとき、前件部命題の適合度を

$$\omega_i = hA_i(x_{10}) \wedge hB_i(x_{20}) \quad (2)$$

により計算する。 $hA_i, hB_i$  はファジィ変数  $A_i, B_i$  に対するメンバシップ関数で、 $\wedge$  は最小値をとる演算である。 $i$  番目の制御規則の適合度  $\omega_i$  が求まると、その後件部命題のファジィ変数  $C_i$  の内容を表すメンバシップ関数  $hC_i$  を  $\omega_i$  倍して次の関数を得る。

$$hC_i^*(z) = \omega_i \cdot hC_i(z) \quad (3)$$

出力に関するメンバシップ関数  $h(z)$  は(3)式の最大値をとる次の演算により得られ、その操作用出力値  $u_0$  は関数  $h(z)$  の面積の重心として求める。

$$h(z) = \max_i hC_i^*(z) \quad (4)$$

$$u_0 = \frac{\int h(z)z dz}{\int h(z) dz} \quad (5)$$

図-1 に2個の制御規則（前件部命題が1個と2個）に対するファジィ推論を示す。このファジィ推論の特徴は各制御規則がそれぞれのメンバシップ関数の山に1対1に対応し、その高さが制御規則の適合度 ( $\omega$ ) になっていることである。そのため推論内容が理解しやすく、制御規則の拡充のための修正も容易である。

## 2. ファジィコントローラの開発動向

### 2.1 ファジィ制御の開発

ファジィ制御の可能性を最初に示したのが1974年、ロンドン大学の Mamdani, E. H. 博士によるスチームエンジン実験装置のファジィ制御<sup>1)</sup>である。産業レベルでは、1980年代に入ってデンマーク Smidth, F. L. 社によるセメントキルンの制御<sup>2)</sup>が実用化の最初である。

日本では1980年前後からファジィ制御の開発が開

† Fuzzy Controller for Process Control and its Applications by Osamu ITOH (Manager, The second systems development section, The first systems development department, FUJIFACOM CORPORATION).

竹 富士ファコム制御(株)第一システム開発部

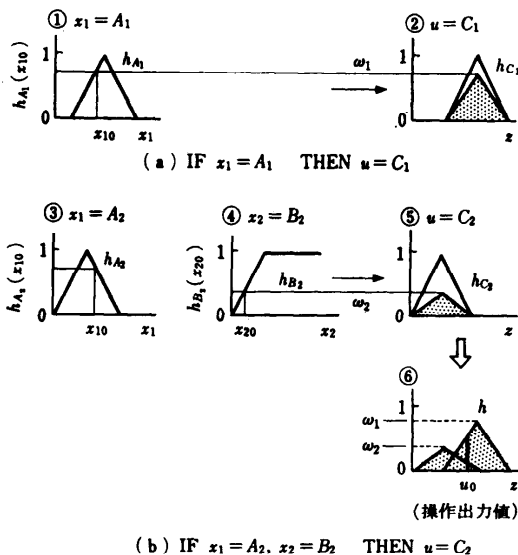


図-1 ファジィ推論法

始され、富士電機の浄水場薬品注入制御<sup>3)</sup>や日立製作所の地下鉄の自動運転<sup>4)</sup>が発表された。その後、窯業、鉄鋼、化学、自動車、土木など、多くの分野でファジィ制御の事例発表が相次ぎ、世界的にも一番活発に実用化が進められている。

たとえば、浄水場前塩素注入制御、下水処理場溶存酸素濃度制御、セメントキルンの燃焼制御、焼結プロ

セスの返鉱配合比制御、高炉の制御、ポンプ浚渫船の浚渫制御、ゴミの燃焼制御、給湯機の出湯温度制御、自動車の速度制御、コンテナクレーンの自動運転、エレベータの群管理、トンネル掘削装置の自動運転、ガラス熔融炉の温度制御、雨水ポンプ運転制御、鉄鋼の冷延プロセス制御、原子炉出力制御など、多くの実用化、研究開発事例があり、ファジィ制御は開発段階から実用化段階に入った。

## 2.2 汎用型ファジィコントローラの開発

ファジィ制御の適用研究と並んで、プロセス制御用の汎用ツールの開発が進んでいる。その例を表-1に示す。制御規則の入力は CRT から対話的にテーブル形式で入力するものから、コンパイル言語として入力するものまで種々ある。また、コントローラの形態もプロセス制御用計算で動作するシステム組込型からパソコンで動作するスタンドアロン型、あるいはボード型、調節計型など多くの種類が発表されている。さらに、コンパクトで高速推論を実現するファジィ演算専用の LSI の開発も進められている。

## 2.3 適応型ファジィコントローラの開発

従来のファジィ制御を発展させ、プラントのパラメータ変動に適応させて、制御アルゴリズムを変化させる適応型ファジィコントローラが開発されている。

このファジィ適応制御<sup>5)</sup>では図-2 に示すように、プラントの変動を表すパラメータに着目し、そのパラ

表-1 ファジィ制御システム構築ツール例

| ツール名またはシステム名                                                | 特 徴                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 汎用ファジィコントロールシステム (FRUITAX)                                  | ファジィコントローラと制御規則設計パッケージで構成。プロコン型およびパソコン型。規則はテーブル入力。オンライン中の規則調整、推論内容の表示可能。入力 128, 出力 8, 規則 256, 制御周期 10 秒以上 |
| Expert System for Process Control (LINKman)                 | スタンドアロン型のセメントキルン制御用ファジィコントローラ (イギリス)                                                                      |
| The FLS Supervision, Dialogue and Reporting Computer System | 監視制御機能を有するセメントキルン用ファジィコントローラ。プロコン型 (デンマーク)                                                                |
| ファジィ制御構築システム (IFCS)                                         | EWS 上で動作するファジィ制御システムの構築・制御性能構築ツール。ルールコンパイル方式を採用。複数の推論方法を選択可能                                              |
| パーソナルコンピュータ用アドバンスドコントロールシステム (ORPX)                         | ファジィ制御と AR モデルによる最適制御の併用が可能。パソコン型。規則はコンパイル入力。入力 60, 出力 10, 規則 500                                         |
| ファジィコントローラ (FZ-1000)                                        | アナログ回路で構成。1 規則 1 ボード。ルールの並列処理により高速推論が可能。入力 3, 出力 1, 規則 19, 推論速度 1 $\mu$ 秒                                 |
| ファジィコントローラ (FOC-2001)                                       | シングルループのファジィコントローラ。規則はフロントより入力。入力 2, 出力 1, 規則 25, 推論速度 0.2 秒以上/規則                                         |
| ファジィ制御システム                                                  | 入出力はホスト CPU 経由のボード型コントローラ。規則は専用エディタ (パソコン) からダウンロード。入力 15, 出力 2, 規則 100, 推論速度 2 ms/規則                     |
| ファジィコントロールシステム                                              | 制御、シミュレーション、支援 (MMI) で構成。複数の推論エンジンを搭載。パソコン型。入力 160, 出力 96, 規則 250, 推論速度 2~4 ms/規則                         |

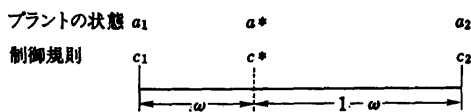


図-2 制御規則の適応

メータに対応させて複数のプラント状態 ( $a_1, a_2$  の 2 状態とする) を考える。そして、それらの状態における制御規則 ( $c_1, c_2$  とする) をそれぞれ用意する。現在のプラントの状態 ( $a^*$ ) から各プラント状態にどれだけ近いかを評価 (0 から 1 までの値をとる  $\omega$  で表す) し、(6) 式により、制御規則を適応させる。

$$c^* = c_1(1-\omega) + c_2 \cdot \omega \quad (6)$$

このような機能をもつファジィコントローラの開発により、プロセスゲインや無駄時間などプラント特性の操業状態による変動への対応や、複数の制御目標の状況による協調が容易にできる。

### 3. ファジィコントローラの構成

ファジィ制御を実現する構築ツールはすでに数多く発表されているが、ここでは筆者が開発したファジィコントローラ<sup>6)</sup>を例にその構成を紹介する。

#### 3.1 システムの考え方

ファジィ制御は熟練オペレータの操作方法を制御規則でモデル化し、計算機で同等の制御を実現するのが大きな役割である。そのためには、制御規則の作成をメーカとユーザの技術者が協力して行うことになる。しかし、ファジィ制御はその会社の操業ノウハウに触れるため、メーカが参加することは機密保持の面から問題が生じる。そこで、本ファジィコントローラではプラントの操業ノウハウをよく知っているユーザ自身が制御規則を作成でき、使いながらそのレベルアップを図れることを重視した設計を行っている。たとえば、コントローラとオペレータが対話的に情報のやりとりができ、制御規則の拡充と変更時のシミュレーションができるなどの特徴がある。

#### 3.2 システムの構成

図-3 にシステムの構成を示す。また、表-2 にシステムの仕様を示す。ファジィコントローラと支援システムよりなるシステムである。前者は制御用計算機(システム組込型)またはパーソナルコンピュータ(スタンドアロン型)で動作し、計測値またはオペレータの入力値を用いたファジィ推論 (1.3 の方法) で操作量を推論し、出力する。このとき、推論内容を CRT

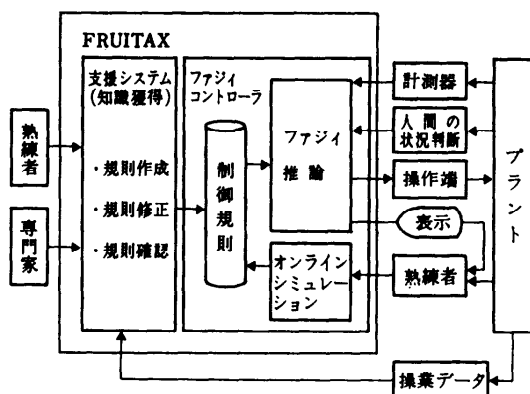


図-3 ファジィ制御システムの構成

表-2 ファジィコントローラの仕様

| 項 目          |         | スタン<br>ダロン型 | システム<br>組込型 |
|--------------|---------|-------------|-------------|
| コントローラ数      |         | 個 1         | 8           |
| 入 力          | プロセス入力  | 点 10        | 96          |
|              | キーボード入力 | 点 4         | 32          |
| 操 作 出 力      |         | 点 2         | 8           |
| 制御規則         | 規 則 数   | 個 96        | 256         |
|              | 前件部命題数  | 個 5         | 5           |
|              | 後件部命題数  | 個 2         | 2           |
| 制 御 周 期 (最小) |         | 秒 30秒       | 10秒         |

画面に表示するとともに、制御規則変更時のオンラインシミュレーション機能をもっている。また、制御規則設計の不備にともなう推論異常の自動検知機能もある。後者は操業データから制御規則を設計するための支援プログラムである。

#### 3.3 制御規則の設定

本システムでは入出力量に変数名、ファジィ変数に SA, MM, LA などの名前(ラベル)を付け、その名前を用いて制御規則を記述する。たとえば、各入力量に対する前件部ファジィ変数は図-4 に示す 10 種類のファジィ変数を、後件部ファジィ変数も図-5 に示す 7 種類のファジィ変数を用いる。このとき、各ファジィ変数の内容を表すメンバシップ関数は三角形を基本として設定し、頂点および左右の 2 点 (図-4 の  $P_1, P_2, P_3$ ) の値を設定することにより行う。制御規則は入力変数名とその入力量に対するファジィ変数名を対にした前件部命題と、出力変数名とそれを対にした後件部命題を設定することにより行う。その例を以下に

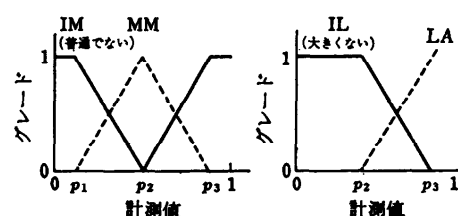
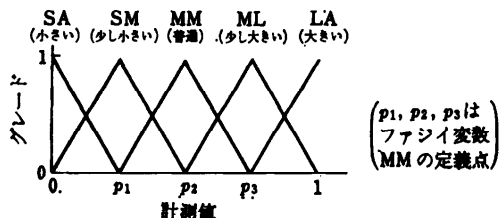


図-4 前件部ファジィ変数

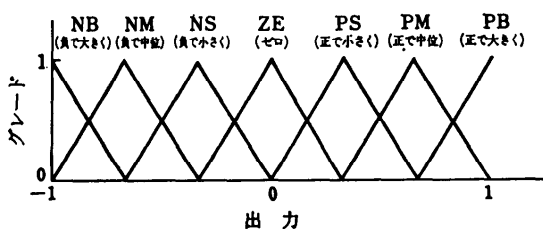


図-5 後件部ファジィ変数

示す。TEMP が入力変数、FUEL が出力変数であり、ML, NS はそれらのファジィ変数である。

IF TEMP=ML THEN FUEL=NS (7)

### 3.4 ファジィ制御の導入効果

計算機的发展にもかかわらず、まだ熟練オペレータの技術に頼っている制御プロセスは少なくない。そのようなプロセスの課題は、

- ① 外乱要因が多く、その影響によりプロセス特性が異なる。
- ② 熟練者が不足し、個人差が大きい。
- ③ プロセス特性が複雑で、一つの数式では全体を表しきれない。非線形性が非常に強い。
- ④ 操業の変動要因が多く、自動化できない。
- ⑤ 人間の状況判断が重要な役割を果たしている。
- ⑥ 従来制御による自動化の効果があがらない。

などであり、これらの解決をファジィ制御に求められている。ファジィ制御では、

- ① 熟練者の最良操作を継続的に実行でき、安定操業が実現できる。
  - ② 操業ノウハウを積み上げることで制御規則が構築できる。
  - ③ 操業ノウハウの規則化により、技術の顕在化・共有化が図れる。
  - ④ 複数の要因を総合判断し、状況に応じた操作量の決定ができる。
  - ⑤ プロセス状態の変動を多数の情報の傾向的変動として捉えた予測制御ができる。
- により、制御の自動化が可能となり、
- ① 操業の安定による製品品質、歩留りの向上
  - ② 自動化による省力化、負荷の軽減
  - ③ 熟練者でなくてもよい操業が可能
- などの効果が得られる。

## 4. 制御規則の設計

ファジィ制御を実現する場合の最大の課題は入出力変数を決定し、制御規則を設計することである。その良否がファジィ制御の成功を左右するといっても過言でない。現状では試行錯誤的な設計がほとんどであり、設計技術の開発による自動化が待たれている。

### 4.1 聞き取り調査による設計

プラントの特性を理解し、その操作方法を熟練オペレータから聞き出すことにより、制御規則を設計する。たとえば、熟練オペレータの注目している情報から入力変数が定まり、その情報に基づく操作内容から制御規則が作成できる。また、操作内容や操作時の状況判断（温度が高いから、温度が非常に高いからなど）とそのときの計測値の対応関係を整理することにより、メンバーシップ関数を決定できる。

この方法は熟練オペレータの操作のモデリングであり、プラント操作に関する経験・知識を言葉で表し、規則化する。この方法で基本的な制御規則を設計できるが、熟練オペレータの操作方法は必ずしも明文化されておらず、無意識のうちに使われている知識は表に現れない。そのため、完全な制御規則を設計することは難しく、検証と拡充が必要である。

## 4.2 操業データに基づく設計

操作方法を言葉で表さなくても熟練オペレータの運転時の操業データには操作ノウハウが含まれている。その操業データと同じ操作をする制御規則を設計すれば熟練オペレータのノウハウを表したことになる。この場合、収集データにはファジィ制御の対象範囲をすべて含んでいる必要がある。

収集したデータを用いて、まず相関分析や主成分分析などで有意な入力変数を決定する。次に、熟練オペレータの操作結果とファジィ推論値とを比較し、その差の二乗和が最小になるように制御規則のメンバーシップ関数パラメータを調整する。メンバーシップ関数パラメータの調整で不十分な場合は、操作結果とファジィ推論値の差の大きい状態を解析し、制御規則の拡充を行う。

この方法も熟練オペレータの操作のモデリングであるが、データを重視した解析的な設計が4.1と異なる。そして、熟練オペレータの潜在的な操業ノウハウを抽出し、整理できる効果がある。

## 4.3 プロセスのファジィモデルによる設計

熟練オペレータのファジィモデルを作るかわりに、プロセスのファジィモデル<sup>7)</sup>を作成してファジィ制御を行う研究が進められている。この場合、制御規則は(1)式でなく、(8)式が用いられる。ここで、関数  $f$  は線形式を用いる場合が多い。

$$\text{IF } x_1=A_i, \quad x_2=B_i \quad \text{THEN } u=f_i(x_1, x_2) \quad (8)$$

ファジィ推論は(2)式の  $\omega$  を用いて、次式で行う。

$$u = \sum_i \omega_i \cdot f_i(x_{10}, x_{20}) / \sum_i \omega_i \quad (9)$$

この形式は高次多変数系への適用が容易であり、前件部の状況に対するプロセス法則を後件部関数で表したものとになっている。

このファジィモデルの同定は次の手順で行うが、まだ確定した方法はない。

- ① 入力変数を選択し、入力空間の分割を行う。
  - ② 前件部の適合度  $\omega$  を重みとした重み付き最小二乗法により、関数の最適パラメータを求める。
- この方法はプロセスの特性を制御規則の中に含んでおり、熟練オペレータの制御を超えることができる。

## 4.4 セルフオーガナイズシステム

ファジィ制御における制御規則の自動学習コントローラをセルフオーガナイズシステムと呼び、研究が進められている。

サンプリングごとに制御性能を評価し、その結果に

基づいて制御規則を修正または新規に作成する学習アルゴリズムが提案<sup>8)</sup>されている。制御偏差とその変化率から制御性能を評価し、その評価値と制御規則の修正量(ファジィ変数の平行移動の量)の関係を与える表を用いて学習を行う。シミュレーションにより、制御規則の作成ができ、かつ満足のいく制御性能の得られることが確認されている。

一方、4.3のファジィモデルを用いた学習化の研究<sup>9)</sup>も行われている。その学習アルゴリズムは、制御規則後件部の線形式の係数を逐次型の重み付き最小二乗法で、1データごとに求める方法である。それにより、制御精度の向上が図れる。

## 5. 適用事例

### 5.1 浄水場の薬品注入制御<sup>3)</sup>

浄水場はその公共性から安定した運転が不可欠である。ところが、薬品注入制御は水質にかかわる制御であるため、制御が難しくオペレータの経験に強く依存し、負荷を大きくしている。その中で、凝集剤は取水した原水に含まれる濁質を沈殿池やろ過池で除去するために注入する。このプロセスにファジィ制御を適用した。

このプロセスの特徴は無駄時間が長く、かつ数学モデルができないため、多くの情報に基づく予測制御が必要なことである。そこで、注入率式(回帰式)により大まかな注入率を求め、それで表しきれない非線形部分をファジィ推論で補正する方式を用いている。そのフィールド試験結果の例を図-6に示す。オペレータの行った実注入率(実線)とファジィ推論で求めた値(破線)がよく一致し、ファジィ制御の有効なことが分かる。また、ファジィ推論のほうが、オペレータよりよい注入を行っていることも確認している。

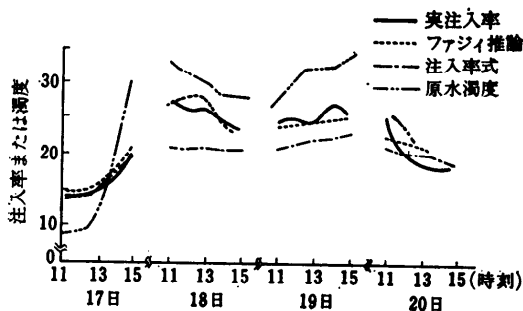


図-6 フィールド試験結果の例

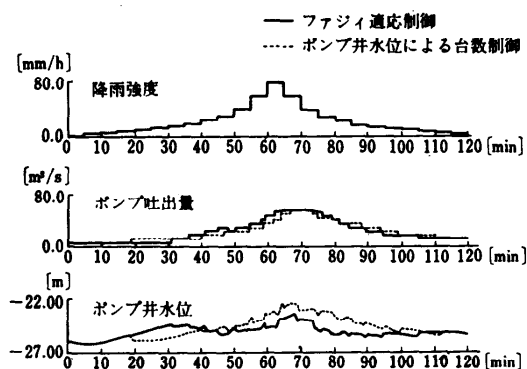


図-7 降雨時のシミュレーション結果の例

### 5.2 雨水ポンプ制御<sup>10)</sup>

都市域に降った雨水を河川などに排水するために雨水ポンプが用いられている。その雨水ポンプの運転は、一般にはポンプ井水位による台数制御が使用されている。しかし、急激な降雨時には対応できず、オペレータの介入が必要になっている。

ポンプ場のオペレータはポンプ井水位だけでなく降雨量・雨水の流入量・ポンプの運転状況などの多くの情報と過去の経験より、安全優先とポンプの起動・停止頻度を抑えるという二つの制御目標をうまく協調させた運転を行っている。そこで、熟練オペレータの判断方法を降雨状況とポンプの吐出量から雨水の流入状況来判断し、その結果とポンプ井水位およびその変化勾配からポンプの運転・停止を推論する2段階の決定プロセスとして捉え、ファジィ適応制御を適用した。

まず、熟練オペレータの操作方法を雨水の流入状況( $\omega$ )を推論する制御規則とポンプの運転・停止を推論する制御規則で表す。次に後者に対して、少降雨時の雨水ポンプ起動・停止頻度を抑える前件部メンバシップ関数と多雨時の安全優先の前件部メンバシップ関数の2組を用意し、雨水流入状況判断の推論値  $\omega$  で適応させる。

その結果、図-7に示すように、少降雨時にはポンプの起動を抑え、水位の上昇が見られるが、降雨の増大にしたがい安全優先の運転に替わり、最大上昇水位は抑えられ、降雨状況に合った臨機応変の制御が可能となることが確認できる。

## 6. 今後の課題

プロセス制御用ファジィコントローラとその応用に関して解説した。制御系の知識化に関心が高まる中で、ファジィ制御の実用化が進んでいる。しかし、まだ解決すべき課題も残されている。たとえば、

- ① 制御規則設計の自動化技術の開発
- ② 現場のオペレータが親しみをもて、オンラインで調整できるシステムの開発

がある。前者は最大の技術課題であり、後者は人間との係わりを有するファジィ制御では避けては通れない課題である。これらの課題の解決には理論的研究と現場の応用技術がみあうことが必要であり、そのことが今後のファジィ制御の発展を促進するものと考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) Mamdani, E. H.: Applications of Fuzzy Algorithms for Control of a Simple Dynamic Plant, Proc. IEEE, Vol. 121, pp. 1585-1588 (1974).
- 2) Holmblad, L. P. and Ostergaard, J. J.: Control of a Cement Kiln by Fuzzy Logic, Information and Decision Processes (Gupta, M. M. and Sanchez, E., Eds.), NorthHolland, Amsterdam, pp. 389-399 (1982).
- 3) 柳下, 伊藤, 菅野: ファジィ理論の浄水薬品注入制御への応用, システムと制御, Vol. 28, No. 10, pp. 597-604 (1984).
- 4) 安信, 宮本, 井原: Fuzzy 制御による列車定位置停止制御, 計測自動制御学会論文集, Vol. 19, No. 11, pp. 873-880 (1983).
- 5) 菅野: ファジィ制御, 日刊工業新聞社, 東京 (1988).
- 6) 菅野, 伊藤, 柳下, 鬼塚: 汎用ファジィコントロールシステム, 富士時報, Vol. 58, No. 4, pp. 59-66 (1985).
- 7) Sugeno, M. and Kang, G. T.: Fuzzy Modeling and Control of Multilayer Incinerator, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 18, No. 3, pp. 329-345 (1986).
- 8) 山崎, 菅野: 自動学習ファジィコントローラ, 計測自動制御学会論文集, Vol. 20, No. 8, pp. 720-726 (1984).
- 9) 新留: 冷延セットアップモデルへのあいまい制御の適用, 計装, Vol. 30, No. 10, pp. 76-79 (1987).
- 10) 伊藤, 右田, 柳下, 青木: 雨水ポンプ運転におけるファジィ適応制御, 第3回ファジィシステムシンポジウム予稿集, pp. 121-126 (1987).

(平成元年4月25日受付)