

浄水場薬品注入制御におけるファジィ推論の適用

富士電機製造(株)公共事業部技術第二部 ○柳下 修

// 第一システム開発部 伊藤 修

1. はじめに

上水道や工業用水道の水源には最近では資源保護のため表流水が多く用いられるようになってきている。表流水は比較的豊富にあるが濁質が多く含まれ、しかもその量が大きく変動する。浄水場においてこの濁質の除去を確実にかつ効率的に行うために凝集剤を注入する。注入率は原水の水質の変化に応じて変える必要があるが、凝集剤による濁質の凝集過程が複雑であること、水質発信器で測定できるものが限られていることなどにより注入率決定の確定的方法が無く、熟練したオペレータが豊富な経験をもとに判断し注入率を決定しているのが現状である。そこでこうしたオペレータの経験的知識に基づく判断をファジィ推論により表現することにより、それを生かすことのできる制御方法を述べる。また、この方法による薬品注入ファジィコントローラの構成を実際の浄水場でのフィールドテストの結果を報告する。

2. ファジィ推論の適用

1) 基本構成

図-1に注入率推定の基本構成を示す。注入率式の値を基準値とし、それだけでは対処できない部分をファジィ推論により求め補正量として加える方法である。常時計測される水質データを X_1 、フロックの状況など常時計測できない状況をオペレータが“大きい”、“中くらい”、“小さい”という形式で入力するデータを X_2 とし、この全体を X とする。補正量推定規則は入力 X の状態が“大きい”とか“小さい”という命題と補正量についての同様の命題 Q とから(1)式で表現される。

if P then Q (もしPならばQである) (1)

$P; x =^m f \quad x \in X, f \in F$ (2)

はじめにPおよびQの表現方法を述べる。ある入力 x ($\in X$)についての命題Pは x とファジィ変数 f および modifier m により(2)式で表わされる。 f は“大きい”、“小さい”等あいまいさを含んだ状態を一般化したものである。その全体を F とする。 m は f を修飾するもので以下の4通り考える。図-2に命題の例を示す。

- ① $x = f$: x は f である。
- ② $x = > f$: x は f 以上である。
- ③ $x = < f$: x は f 以下である。
- ④ $x = \neg f$: x は f でない。

ファジィ変数 “中位” ① 水温が中位 ② 水温が中位以上 ③ 水温が中位以下 ④ 水温が中位でない (MMと記す)

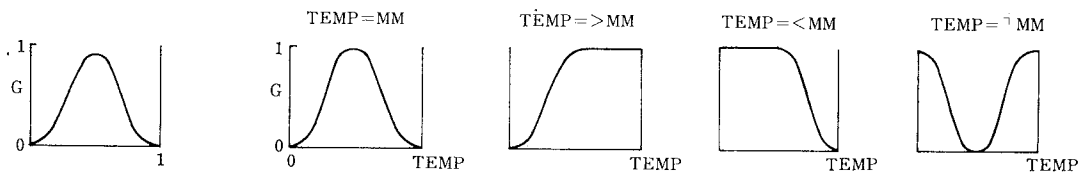
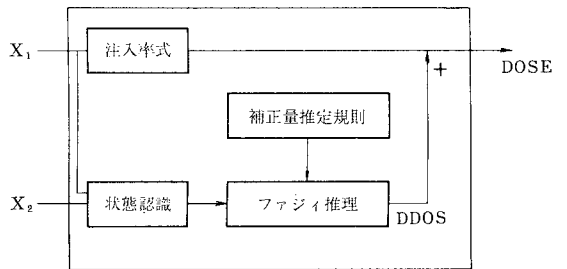


図-2 ファジィ変数およびファジィ命題の例



X_1 ; 注入率式の入力変数
 X_2 ; 入力変数
 DDOS ; 補正量
 DOSE ; 注入率

図-1 注入率推定方法

表-1 ファジィ変数

変数名	基準区間	μ	σ	意味
SS	0, 1	0.0	0.15	かなり小さい
SA	0, 1	0.0	0.3	小さい
SM	0, 1	0.3	0.15	やや小さい
MM	0, 1	0.5	0.15	中くらい
ML	0, 1	0.7	0.15	やや大きい
LA	0, 1	1.0	0.3	大きい
LL	0, 1	1.0	0.15	かなり大きい
NB	-1, 1	-1.0	0.4	負で大きい
NM	-1, 1	-0.5	0.2	負で中くらい
NS	-1, 1	-0.2	0.2	負で小さい
ZE	-1, 1	0.0	0.2	ゼロくらい
PS	-1, 1	0.2	0.2	正で小さい
PM	-1, 1	0.5	0.2	正で中くらい
PB	-1, 1	1.0	0.4	正で大きい

ファジィ変数 f は基準区間内のファジィ集合で表わす。そのメンバーシップ関数 $h_f(y)$ を(3)式とし、表-1に示す変数を用意した。“大きい”、“小さい”等のイメージは相対的なものであり、入力変数 X の範囲が変わればそのイメージの示す範囲も変化する。逆に範囲を固定すればそれらのイメージは一般的なものとして抽出できると考えられる。これがファジィ変数であり、いくつか基本的な変数を用意するだけで種々の入力に対応できる。

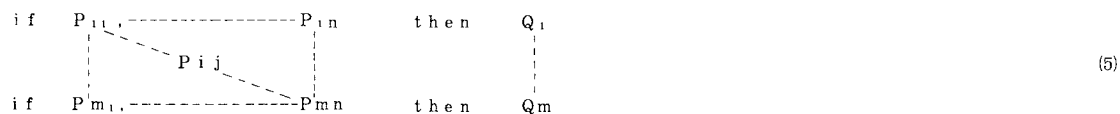
$$h_f(y) = \text{Exp} \left\{ -\frac{(y-\mu_f)^2}{2\sigma_f^2} \right\} \quad (3)$$

$y, \mu_f \in I, I$: 基準区間

(1)式と同様にして補正量 D D O S に関する命題 Q を次式で表現する。この式に用いられるファジィ変数は表-1に示す変数のうち基準区間が $[-1, 1]$ で示されるものである。

$$Q; \text{ D D O S} = f \quad f \in F \quad (4)$$

(1)式と(4)式で表わされる P, Q により補正量推定規則の全体は(5)式となる。ただし、入力変数の数を n 、推定規則の数を m とする。



2) ファジィ推論

(5)式の補正量推定規則に従い補正量を求める。1つの規則における命題 P はそれぞれ AND 条件で、そして規則どうしは OR 条件で結びつけられると考えられる。そこで補正量のファジィ集合 D D O S を(6)式で求める。 p_{ij} は命題 P_{ij} のグレード、 \cup はファジィ和集合、 $*$ は Q のグレードを一様に定数倍する演算を示す。 Q_0 は補正量が“ゼロくらい”であることを表わすもので書き換えれば $\text{D D O S} = \text{Z E}$ となる。これは推定規則で定義されていない状態では補正量はゼロにする、つまり注入率式の値をそのまま用いることを意味する。

$$\begin{aligned} \text{D D O S} &= \cup_{1 \leq i \leq m} \{ (\text{Min}_{1 \leq j \leq n} p_{ij}) * Q_i, p_0 Q_0 \} \\ p_0 &= 1 - \text{Max}_{1 \leq i \leq m} \{ \text{Min}_{1 \leq j \leq n} p_{ij} \} \end{aligned} \quad (6)$$

注入率推定の具体例を図-3に示す。左側に推定規則、右側に推定の方法を示している。図中の▲で示す入力変数の値のときに2つの推定規則から補正量 $1.0 \text{ mg} / \ell$ が得られる。補正量の算出は2つの推定規則に対応する出力②、⑤を合成した⑥のファジィ集合から求められる。この集合を h_D とすると補正量は(7)式で求められる。 d は補正量の領域を表わす変数である。

$$\text{D D O S} = \int_d \frac{\sum d \cdot h_D}{\sum h_D} \quad (7)$$

3. ファジィコントローラの構成

薬品注入ファジィコントローラはプロセスの計測値に加えてオペレータの状態認識、例えばフロックが大きいとか小さいという認識も入力として扱い制御演算を行うところに特長がある。この状態認識はオペレータの長年の経験に基づいたものでこれを単にあいまいさのない数値で扱うことは重要な要素を欠落させる恐れがあり、

IF TUUP=MM THEN DDOS=PS →

IF TU1=MM, TEMP=7SA
THEN DDOS=NM →

TU1 : 原水濁度, TUUP: 原水濁度上昇
TEMP: 水温, DDOS: 注入率補正量
MM : 中位, 7SA : 小さくない
NM : 負で中位, PS: 少しプラス

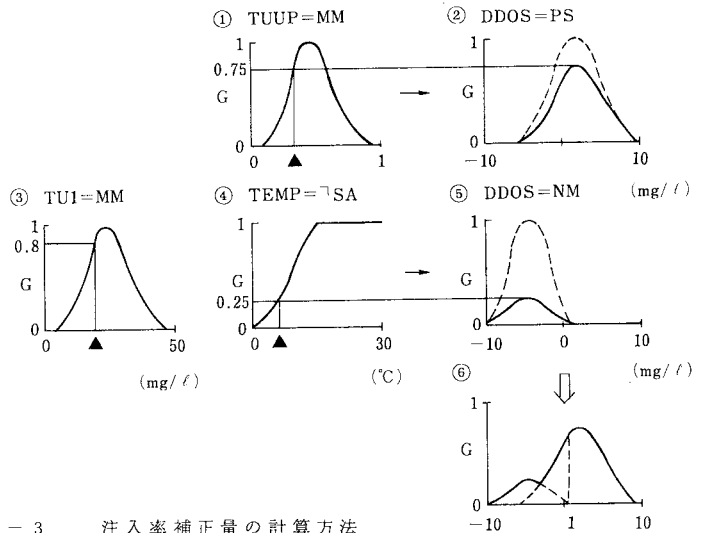


図-3 注入率補正量の計算方法

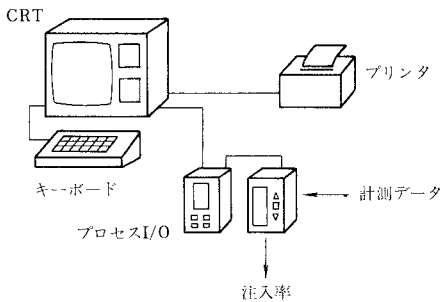


図-4 ハードウェア構成

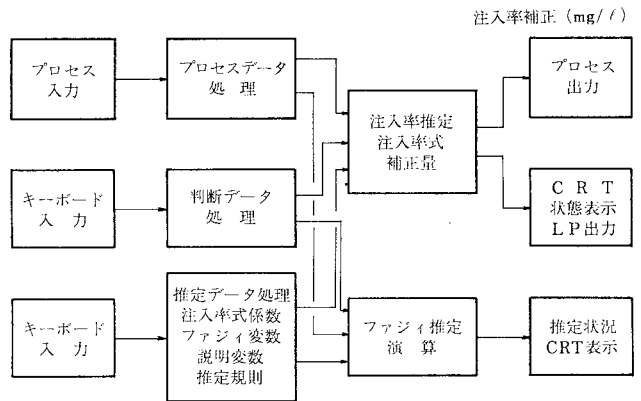


図-5 ソフトウェア構成

“大きい”, “小さい”などあいまいさを持った量として扱う必要がある。しかもその経験則はファジィ変数の定義, 入力変数の選択, 推定規則の構成に直接関係を持ち, 状況に即して追加, 変更, 削除を行いファジィ推定演算の更新が容易であることが望ましい。これらを考慮して作成したファジィコントローラのハードウェア構成を図-4にソフトウェア構成を図-5に示す。また, CRT表示画面例を図-6に示す。

4. フィールドテスト

フィールドテストを秋田市の豊岩浄水場

で昭和58年10月と11月の2ヶ月間実施した。その方法および結果を説明する。この浄水場は凝集剤としてPACを使用している。また, テスト実施時は処理水量が少ないので昼間のみの間欠運転を行っている。

補正量推定規則を7月, 8月, 10月の運転データとオペレータの経験則に基づいて作成した。表-2に使用変数, 表-3に推定規則を示す。また, 注入率式を同時期の運転データより重回帰分析により求めた。これを(8)式に示す。

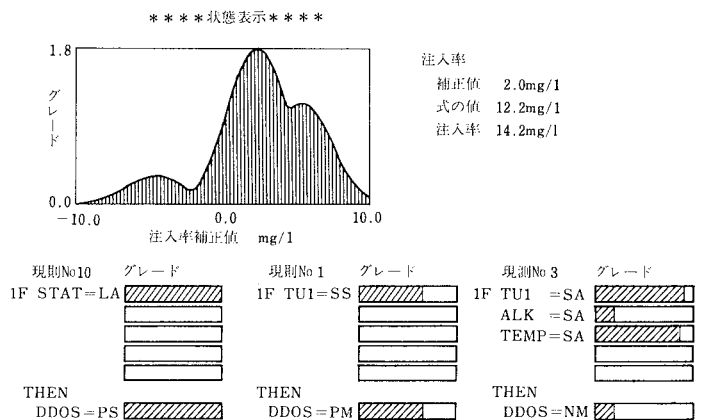


図-6 CRT表示画面例

表-2 入出力変数

	説明変数	記号	スパン	単位
入出力	原水濁度	TU1	0,50	mg/ℓ
	アルカリ度	ALK	8,18	"
	水温	TEMP	0,30	℃
	沈殿上澄液濁度	TUSE	0,3	mg/ℓ
	濁度上昇	TUUP	0,1	-
	フロック状況	FLOC	0,1	-
	処理開始	STAT	0,1	-
出力	補正量	DDOS	-10,10	mg/ℓ

表-3 補正量推定規則

- №
- 1 IF TU1 =SS THEN DDOS=PM
 - 2 IF TU1 =MM TUSE=LA TEMP=SA THEN DDOS=NM
 - 3 IF TU1 =SA ALK = SA TEMP= SA THEN DDOS=NM
 - 4 IF TU1 =LA ALK = SA THEN DDOS=NM
 - 5 IF TUSE=LA THEN DDOS=PM
 - 6 IF TUUP=LL THEN DDOS=PB
 - 7 IF TUUP=ML THEN DDOS=PM
 - 8 IF TUUP=MM THEN DDOS=PS
 - 9 IF FLOC=SA THEN DDOS=PM
 - 10 IF STAT=LA THEN DDOS=PS

$$BASE = 1.8572 + 2.375\sqrt{TU1} - 0.93ALK \quad (8)$$

BASE: 基準注入率 (mg/ℓ), TU1: 原水濁度 (mg/ℓ), ALK: アルカリ度 (mg/ℓ)

テスト方法はファジィコントローラの出力と実注入率を比較することにより行った。テスト期間中オペレータはジャーテストおよび経験的判断により注入率を設定しており、ファジィ推論の結果がオペレータの設定に合っていれば有効性が示される。テスト結果の一部を図-7に示す。注入率式ではオペレータの設定に対応できない部分でもファジィ推論では良く追従している。このことは表-4の残差平方和と残差標準偏差によっても示される。残差は実注入率とファジィ推論の値の差あるいは注入率式の値の差である。

さらに、ファジィ推定の効果を調べるために(9)式に示す判断基準を考える。Yの符号が正ならば①残差、

$$Y = \text{残差} \times \Delta TUSE \quad (9)$$

$\Delta TUSE = TUSE - TUSE$ の平均値 TUSE: 沈殿池上澄水濁度 (mg/ℓ)

$\Delta TUSE$ 共に正、または、②残差、 $\Delta TUSE$ 共に負のいずれかである。 $\Delta TUSE$ が正のとき、注入率は実注入率より大きくすべきであるので、このとき残差が正であれば、本来この値はより小さな値になっているはずである。 $\Delta TUSE$ が負のときは注入率は小さくすべき場合である。いずれにせよYの符号が正のとき残差は本来、より小さな値になるはずである。表-4に示す通りYの正符号の数の多いファジィ推定が注入率式のみに比較してより優れていることがわかる。

5. おわりに

ファジィ推論による注入率決定の方法は従来の注入率式のみによるものより大巾に改善されることが示された。今後の課題は薬品注入結果を判断して推定規則を修正する学習機能の追加があげられる。最後に、フィールドテストを行うにあたり御協力いただいた秋田市豊岩浄水場の皆様および東京工業大学の菅野先生に心から感謝の意を表わします。

表-4 テスト結果

種別	注入率式	ファジィ推定
残差平方和	6.28	2.24
残差の標準偏差	2.28	1.36
Yの正符号の数	3.3	4.1
Yの負符号の数	4.1	3.3

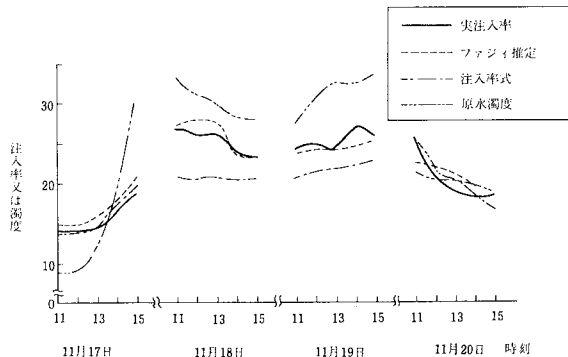


図-7 フィールドテスト結果の例