

## &lt;特集&gt;

## 浄水プロセスのファジィ制御

Fuzzy Control of Water Treatment Processes

伊藤 修<sup>1</sup>, 細川 浩一郎<sup>2</sup>, 栗原 裕幸<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(株)FFC プロジェクト推進センター/  
〒151-0053 東京都渋谷区代々木4丁目30-3(新宿コヤマビル)  
<sup>2</sup>富士電機(株)電機システムカンパニー環境システム本部  
水処理システム事業部 公共技術第一部/〒191-8502 東京都日野市富士町1番地

OSAMU ITOH<sup>1</sup>, KOUICHIRO HOSOKAWA<sup>2</sup>, HIROYUKI KURIHARA<sup>2</sup><sup>1</sup>4-30-3 yoyogi,sibuya-ku, Tokyo 151-0053 Japan<sup>2</sup>1fujimachi,hino-shi,Tokyo 191-8502 Japan

## 1 はじめに

浄水場の役割は、飲料水や工業用水を高品質、安全性を確保しながら確実に供給することにある。そのための水源には、地下水と河川や湖などの表流水があり、最近では資源保護のため、表流水が多く用いられている。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。この濁質の除去を行う方法に、緩速ろ過法と急速ろ過法がある<sup>1)</sup>。緩速ろ過法は、19世紀の初め頃からヨーロッパで用いられるようになった浄水方法で、沈殿→緩速砂濾過→殺菌の各プロセスからなり、濁度、臭味、細菌等の除去に優れた機能を発揮するが、高濁度原水の処理能力が十分でなく、広い敷地を必要とするため最近ではほとんど採用されていない。一方、急速ろ過法は、1883年にアメリカで開発された方法であり、凝集→フロック形成→沈殿→急速濾過→殺菌の各プロセスからなる。このプロセスは、化学薬品(硫酸アルミニウムやポリ塩化アルミニウムなど)により濁質を凝集させ(凝集した濁質の固まりをフロックと呼ぶ)、沈殿池や濾過池で除去する方法である。この方法は、緩速ろ過法と比較して高濁度原水でも十分処理でき、敷地が狭くてもよいので、現在世界で最も広く採用されている浄水

方式である。

また、浄水場では、水道の衛生的安全性を守るため消毒(殺菌)が必要であり、日本では、一般に消毒剤として塩素を用いている。

凝集剤及び塩素の注入は、確実かつ効率的に行うことがもとめられているが、操作結果が現れるまでの時間が長いことや、凝集(塩素の消費)過程が複雑なことなどから、薬品の注入率決定の確定的方法がなく、熟練しオペレータの監視・介入を必要としていた。

本稿では、この浄水場の薬品注入プロセスへのファジィ制御の適用と実用化について論じる。

## 2 ファジィ理論の応用

## 2.1 プロセス制御の設計と課題

J. Wattの蒸気機関の発明に端を発する制御技術は、200年を越える歴史を持ち、PID制御から、現代制御理論へと発展してきた<sup>2)-4)</sup>。特に、1980年代に急速に普及したコンピュータと情報処理技術の発展は、アナログ調節計で代表される1ループ制御から多変数制御の実現を容易にした。

しかし、科学技術が進歩すればするほど、製品・

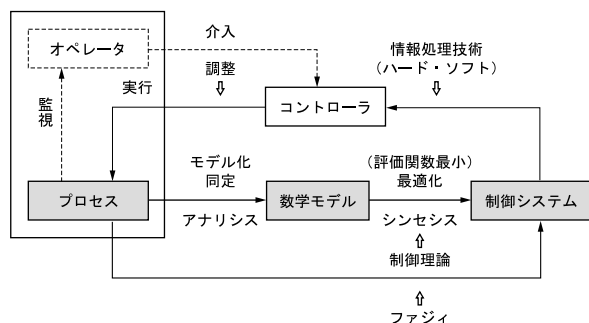


Fig.1 制御系の設計

システムのブラックボックス化と理論と実際の乖離が進むことは否定できず、制御分野においても『理論と実際のギャップ』の議論が行われ、この議論は依然として、大きな課題として残されていると認識する必要がある。その根拠の一つは、制御理論とそれを実現する情報処理技術が発展したにもかかわらず、依然としてPID制御やオンオフ制御、シーケンス制御が多く産業分野で使用されている事実である<sup>5)</sup>。

何故、このような『ギャップ』が発生するのか。Fig.1に制御系設計の処理を示す。

システムの制御系を設計し、適用するためには、制御対象の特性を解明 (Analysis) し、システムのモデル化および同定をする必要がある。そして、ある原因に対し望ましい応答をするように、制御系を構成 (Synthesis) する作業が行われる。設計された制御システムはコントローラに搭載され、センサーの情報をを用いた制御演算により制御動作を自動的に行う。すなわち、『制御対象プロセス → 数学モデル → 制御システム → コントローラ → 制御対象プロセス』という制御系・実用化ループを回すことにより『制御の自動化』を図る。

制御理論では、『数学モデル = 対象プロセスの特性』の成立が重要になる。しかし、産業プロセスではこの数学モデルが難しい、あるいは出来ない場合もある。数学モデルが出来たとしても、従来の制御理論では、生産プロセスの大規模化・複雑化や非線形・相互干渉に伴う問題は線形数学モデルに還元し、ロバスト性の問題に置き換えられたり、外乱などの問題として処理される。しかし、この制御システムがコントローラに搭載され、現場で動作するときには、

『パラメータ調整』という作業が必要となり、制御の異常が1日に1回であっても重要な問題となる。制御理論が高度化すればするほど、システムのブラックボックス化が進むのは必然であるが、その結果、オペレータに対応出来ない、あるいは、監視・介入に大変な緊張を強いることになってしまう。このような状況が、最適制御などの高度な理論が広く利用されていない理由の一つと判断出来る。一方、PID制御やオンオフ制御が依然として使用されているのは、制御性の良い最適な制御をさせるためには数学モデルを必要とするが、現場での調整レベルでは数学モデルを必要とせず、制御動作が分かり易いという特徴があることと理解出来る。

このような状況を考えると、高度な理論を複雑に展開するのではなく、高度な理論を簡単にする技術、言い換えれば、応用技術を産業界が求めていると判断出来る。

これに対し、システム論の立場から、その課題への回答が、L. A. Zadeh 教授によるファジィ集合論<sup>6)</sup>である。人間が介在するシステムあるいは複雑なシステムを記述するとき、複雑さが増すにつれいつかは正確な記述と意味の有る記述が相容れなくなる。いわば『木を見て森を見ない』という状況が生じる。そのような状況においては、数値で表すよりも言葉で表した方がより正確に全体を表現でき、かつ優れているという考えである。このファジィ制御は、『オペレータの操作方策を IF~THEN 形式でモデル化』することにより制御の自動化を実現する。

## 2.2 ファジィ制御システムの設計

我々人間の行う知的情報処理はあいまいさを含み、明確に数式化することが困難である場合が多い。しかし、あいまいな判断であっても、人間は精度の高い判断を行っており、それと同じことがコンピュータで行えればその効果は大きいと言える。その方法の一つが、専門家の『勘や経験』によるあいまいな判断手法 (もし~ならば~を~せよ) を、そのまま制御規則という形 (IF~THEN~) でモデル化し、制御や意思決定に活用しようとするファジィ制御システムである。

(1) ファジィ推論とメンバーシップ関数

- ・IF 湯の温度 = 少し高い  
 (もし湯の温度が少し高ければ): 前件部
- ・THEN 蛇口 = 少し開く  
 (その時は蛇口を少し開く): 後件部

というように、計測値と操作量との関係を表現する(制御規則)。このときに用いる『少し高い、少し開く』などの量をファジィ変数と呼ぶ。たとえば、Fig.2が『湯の温度が少し高い』という概念を表しているとすれば、ぴったりあてはまる温度は43度であり、42,44度では0.5の度合いであてはまり、41,45度ではあてはまらないことを表している。

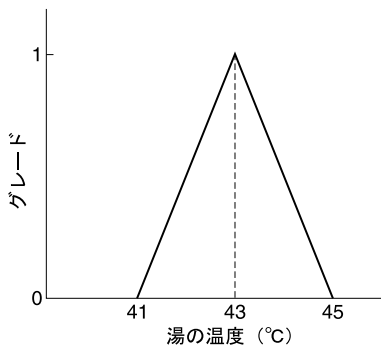


Fig.2 湯の温度が少し高いというメンバーシップ関数

この曲線をメンバーシップ関数と呼んでいる。すなわち、横軸が計測値であり、縦軸はその概念の当てはまる度合いを表している。

同様に『少し開く』に対しても、横軸に蛇口の明け具合をとり、縦軸に概念をあてはめたメンバーシップ関数を作成する。このような制御規則を何パターンか(熱ければ蛇口を多く開くなど)作成し、そのときの湯加減(事実)から、定義した制御規則の前件部・後件部共にどの程度あてはまるかを推測し、蛇口の操作量を導き出す。

(2) 制御規則の設計手順

- ① 熟練オペレータの操業ノウハウからの知識獲得を行い、制御規則及びメンバーシップ関数を設計する。
- ② 設計した制御規則及びメンバーシップ関数の最適化を行う。

- ③ 設計した制御規則及びメンバーシップ関数を検査用操業データを用い、有効性の判断または調整を行う。
- ④ 設計した制御規則及びメンバーシップ関数を評価用操業データを用い、シミュレーションにて評価を行う。

これらの手順により設計された制御規則やメンバーシップ関数に基づくファジィ制御の内容が理解出来ないのでは、ファジィ制御の効果が無くなるので、使用する制御規則やメンバーシップ関数についても制限を付し、その内容が言語表現でき、かつ直感的に理解可能なことが重要である。

### 3 浄水場の薬品注入率制御への適用

#### 3.1 ファジィ制御による凝集剤注入制御

凝集剤注入制御の自動化を目的に、Fig.3に示す注入率の演算方法を用いてファジィ制御の実用化を行った。

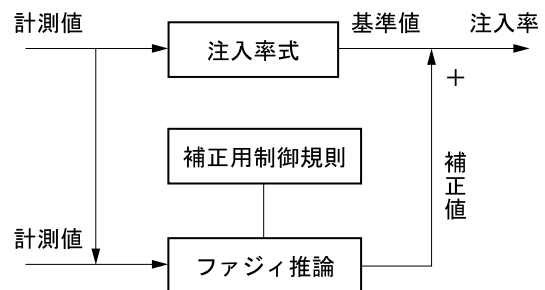


Fig.3 凝集剤注入率の演算方法

この方法は、オペレータが原水の水質の変化やフロックの生成状態などを見ながら、注入率の値を補正することに着目したもので、注入率式の値を基準とし、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。

制御規則は、IF-THEN形式、メンバーシップ関数は指数対数型でファジィ推論にはMAX-PRODUCT重心法を用いている。

このファジィ制御の実用化研究は次の手順で行った。

- ・経験則の間取調査と基礎的制御規則の設計

- ・実データによる制御規則の検証・拡充
- ・フィールドテストによる評価

### (1) 経験則の聞取調査と基礎的制御規則の設計

フィールドテストの実施に先立って行った、聞取調査の結果を以下に示す。いずれも注入率の補正についてであり、“プラス”は3~4mg/l多めに、“マイナス”は3~4mg/l少なめに注入率を設定することを意味する。

- ① 原水濁度 (TU1) がかなり低い (SS) ときはプラス (PM) せよ。
- ② アルカリ度 (ALK) が低い (SA) ときはマイナス (NM) せよ。
- ③ 沈殿池出口上澄液濁度 (TUSE) が高い (LA) ときはプラス (PM) せよ。
- ④ 原水濁度上昇 (TUUP) が高い (LA) ときはプラス (PM) せよ。
- ⑤ フロック (FLOC) が小さい (SA) ときはプラス (PM) せよ。
- ⑥ 間欠運転であり (STAT), 運転開始時 (LA) は少しプラス (PS) せよ。

この結果を制御規則として記号で表したのが Tab.1 である。この制御規則の特徴は、予測制御である原水の水質の情報① ② とその変化情報④ に加えて、制御結果のフィードバック情報③ ⑤ を使用している点にある。しかも、オンライン計測できないオペレータの判断情報⑥ を使用し、また、運用上の特殊事情⑥ を考慮している点が重要である。

### (2) 実データによる制御規則の検証・拡充

Tab.1 の制御規則を用いてフィールドテストを行い、次にフィールドテスト期間中の実注入率データと他の期間の実注入率データを用いて制御規則の拡充を行った。

その際、オペレータの聞取調査には表れなかったが、一般に注入率への影響があると考えられている処理水濁度と水温を加えて検討を行い、得られた制御規則を Tab.2 に示す。

Tab.1 に対して、原水濁度が中位の場合が追加され、アルカリ度が低い場合の制御規則を濁度により2分割し、濁度上昇の場合を3分割している。

### (3) フィールドテストによる評価

ファジィ制御の有効性の検証は、ファジィ推論の結果が熟練オペレータの設定に合っており、更に注入率式の結果より改善されていることを示す方法を用いる。注入率式は、過去のデータより下記とする。

$$\text{注入率} = 18.572 + 2.375\sqrt{\text{TU1}} - 0.93 \cdot \text{ALK}$$

テスト結果の一部を Fig.4 に示す。

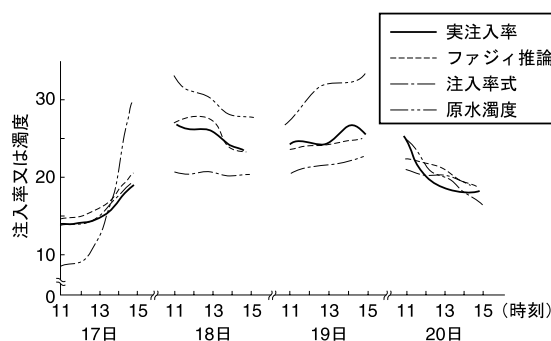


Fig.4 フィールドテスト結果の例

注入率式では18日、19日のような濁度上昇時などオペレータの設定に対応できない部分でも、ファジィ制御ではオペレータの状況判断値が入力値として採用されているため良く追従していることが確認できる。このことから、オペレータの状況判断を組み込んだ推論が重要な役割を果たす事が理解できる。テスト結果より、

- ・オペレータの操作方法のモデル化にファジィ制御が有効
- ・オペレータの操作判断に合うフィードバック制御、フィードフォワード制御が容易に実現でき、特殊状況への対応も容易
- ・ファジィ制御により、オペレータの操作を超えることも可能

であることが示され、浄水場の凝集剤注入制御の自動化が可能なが示された。

## 3.2 ファジィ制御による前塩素注入制御

ファジィ制御による前塩素注入率制御を実現したG浄水場は、水質変動が少ないが沈殿池の構造から

Tab.1 開取調査により作成した制御規制

No.	制 御 規 則			
1	IF TU1	= SS	THEN DDOS	= PM
2	IF ALK	= SA	THEN DDOS	= NM
3	IF TUSE	= LA	THEN DDOS	= PM
4	IF TUUP	= LA	THEN DDOS	= PM
5	IF FLOC	= SA	THEN DDOS	= PM
6	IF STAT	= LA	THEN DDOS	= PS

ここで、DDOS は凝集剤注入補正量

Tab.2 試験結果を用いて拡充した制御規制

No.	制 御 規 則			
1	IF TU1	= SS	THEN DDOS	= PM
2	IF TU1	= MM, TUSE = IL, TEMP = IS	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

ここで、TEMP：水温(度)，MM：中位，IL：高くない，IS：低くない，LL：非常に高い，ML：やや高い，PS：少しプラス，PB：沢山プラス

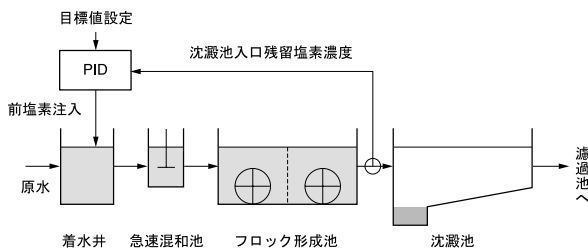


Fig.5 G 浄水場の前塩素注入方法

季節や天候の塩素消費量への影響が大きい浄水場である。そのため、Fig.5 に示すように、沈澱池入口の残留塩素濃度を測定し、その値が目標値になるように前塩素注入率をフィードバック制御する方式を採用していた。

その理由は、

- ① 塩素を注入してから、その効果が沈澱池入口の

残留塩素濃度として表れるまでの時間が30分と短く、フィードバック制御が適用可能

- ② 小さな水質変動による塩素要求量の変化は、沈澱池入口に処理水が到達するまでに反応が終了
- ③ 沈澱池や濾過池での滞留による塩素消費は日光や温度による影響がほとんどであり目標値の変化として対応可能

の点にある。この目標値の設定に、熟練オペレータの判断が必要になっていた。その判断要因として、水中の塩素は直射日光を受けると分解がすすむため

- ① 季節 原水あるいは日射の強さの季節的変動
- ② 天候 塩素の消費と日射の関係 (晴, 曇, 雨(雪))
- ③ 原水取水量 水の滞留時間の変化による塩素消費の変動

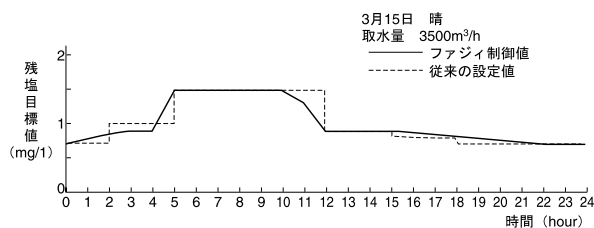


Fig.6 沈澱池入口残塩目標値のシミュレーション例

- ④ 時刻 滞留時間が長いので、夜、午前、午後では塩素消費と日射の関係が異なる

を考慮する必要がある。そこで、G 浄水場では、過去の運転結果から1日の注入パターン（ランクと呼ぶ）を8個抽出し、オペレータがその日の深夜（午前3時頃）に季節、天候、原水取水量を考慮して、注入ランクを選択する。選択したランクを計算機に入力すると計算機はその設定パターン（Fig.6の破線）に基づいて1時間毎に前塩素注入目標値を計算し、その値を設定値としたフィードバック制御による前塩素注入制御を行う。

しかし、この方式では、ランクの決定が1日単位で行われ、注入率の変更が1時間単位のため、突然の天候や取水量の変動への対応が遅れるなど、処理が不安定になる問題を含んでいる。更に、この注入ランクの選択には熟練を要し、個人差もある。そこで、ファジィ制御システムの適用を行った。

#### (1) 制御規則の設計

熟練オペレータの判断方法を整理し、

- ① もし、春で晴れており、原水取水量が多いならばランク4にする。
- ② もし、春で曇っており、原水取水量が多いならばランク5にする。

などと整理できた。この規則を Fig.7 のように原水取水量と時刻により基準になる目標値を求めるグループと、塩素消費量の外乱要因となる季節・天候を主体とした基準目標値の補正量を求めるグループに分けた。そして、両者の推論値の和を設定目標値とする演算方法とした。

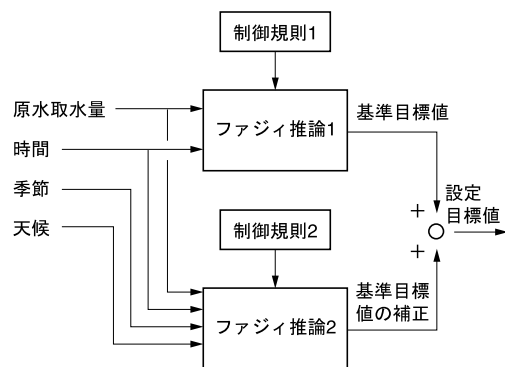


Fig.7 ファジィ制御の基本構造

#### (2) シミュレーションによる評価

G 浄水場の1年分の日報より得られた1881個の操業データを用いてシミュレーションを行った結果、Fig.6のような沈澱池入口残塩目標値が得られた。実線がファジィ制御によるものであり、従来は1日に5回の大きな目標値変更があるが、ファジィ制御では滑らかな目標値変更であることが分かる。このように、2つの部分に分けることで制御の構造が理解しやすくなり、制御規則の拡充が容易となった。

## 4 今後の課題

ファジィ制御は従来の技術で難しい制御プロセスの自動化を、そこで働くオペレータの操作モデルを作ることにより実現することが期待された。また、そのための技術開発が進められ、自動化を実現した制御システムも多く発表されている。しかし、本稿でも述べたように、ファジィ制御システムの構築には熟練オペレータのノウハウに加えて、制御に関する知識と対象プロセスに関する知識が不可欠である。このことは、制御技術者の技術に依存する割合が多くなることを意味し、現場のオペレータが求めている分かり易さ、操作のし易さを軽視する方法に進む恐れが生じるため、ファジィ制御の基本に戻って考える必要がある。

ファジィ制御の問題として、次のようにまとめることができる。

- (1) 制御情報を視覚または言葉の形で表し、オペレータの可理解性を高める。

- (2) 制御規則の設計において、制御性能（残差の2乗和など）だけでなく分かり易さ（簡易性）も評価指標に加える。
- (3) ファジィ推論に動的な要素を付加し、予測推論を可能にする。

いずれにせよ、プロセス制御において、そこで働くオペレータの存在を無視することはできない。技術は人間が使うものであり、『人間』を主体にした制御システムの実現に、ファジィ制御が今後も重要な役割を果たすものと考える。

## 参考文献

- 1) 舟保, 小笠原; 浄水の技術, 技報堂出版 (1985)
- 2) 土谷, 江上; 現代制御工学, 産業図書 (1991)
- 3) 坂和, 鈴木; 制御理論とシステム論の歩みをふり返って, 計測と制御, Vol.15, No.8, pp.38-47 (1976)
- 4) 高橋; システムと制御 (第2版), 岩波書店 (1987)
- 5) 中野他; 『制御システムにおけるヒューマンインタフェース』に関するアンケート調査報告書, 『制御におけるヒューマンインタフェース』研究会 (1993)
- 6) L. A. Zadeh; *Fuzzy sets, Information and Control*, 8, pp.338-353 (1965)
- 7) 守本, 鬼塚, 伊藤, 中峠; 上下水道施設運用への知識工学の応用, 富士時報, Vol.59, No.4, pp.312 (1986)