

# 活性汚泥法ファジィ制御のシステム構成

## Control Strategies of Activated Sludge Processes Using Fuzzy Reasoning

岩堀 恵祐\*、小田原健治\*\*、辰巳 安良\*\*、  
KEISUKE IWAHORI\* KENJI ODAHARA\*\* YASUNAGA TATSUMI\*\*

山川公一郎\*\*、藤田 正憲\*\*\*  
KOICHIRO YAMAKAWA\*\* MASANORI FUJITA\*\*\*

\*静岡県立大学大学院生活健康科学研究科/〒422 静岡市谷田52-1  
Graduate School of Nutritional and Environmental Sciences,  
University of Shizuoka/52-1, Yada, Shizuoka 422, Japan

\*\*株式会社竹中工務店/〒104 東京都中央区銀座8-21-1  
Takenaka Corporation/8-21-1, Ginza, Chuou-ku, Tokyo 104, Japan

\*\*\*大阪大学工学部環境工学科/〒565 吹田市山田丘2-1  
Department of Environmental Engineering, Osaka University/  
2-1, Yamada-oka, Suita, Osaka 565, Japan

### Abstract

The application of Fuzzy Reasoning to the control of sewage treatment process was prospected with literature review. The review showed that most of the studies were devoted to the control of pumping stations and development of operation support systems for activated sludge processes, e.g., the diagnosis of treatment conditions, detection of operational problems and inference of countermeasures. Based on those studies, a novel control system and strategies for activated sludge processes using Fuzzy Reasoning were proposed in this paper and the system is composed of Fuzzy Instrumental Control and Fuzzy Diagnosis Systems. The former relies on the information from the instrumental measurement of the primary and secondary effluents, i.e., flow rate, turbidity, the concentration of organic matters and pH, and the latter on the information of the observation and judgement of operators, on-site measurements and microscopic observation. Integrated application of both systems was discussed for the effective control and maintenance of activated sludge processes.

**Key words :** activated sludge process, fuzzy reasoning, diagnosis, control strategies

## 1. はじめに

人工知能 (Artificial Intelligence: AI) は、知識を主に扱うソフトウェア技術の分野を総称したもので、1960年代から本格的な研究・開発が始められた。このAI技術の1つにエキスパートシステム (Expert System: ES) が位置付けられている。これは、特定の分野の

専門家が持っている知識と問題を解決する能力をコンピュータに納め、いつでも誰でも自由に利用できるシステムで、1970年代から実用化され始めた。初期の本格的なESとして、1971年にBuchananら<sup>1)</sup>が開発した分子構造推定システム (DENDRAL)、1976年にShortliff<sup>2)</sup>の開発した血液感染症診断システム (MYCIN) が有名である。

ESの開発には、人間の持つ言語的な知識をコンピュータ用に記号化する必要がある。この「知識の記号化」の手段の一つとしてファジィ推論の適用が検討されてきた。これは、「曖昧さ」を数学的に取り扱うもので、1965年にZadeh<sup>3)</sup>が提唱したファジィ集合論から派生した推論法であり、Mamdani<sup>4)</sup>がファジィ制御の概念にまで発展させてから、AI技術の一つとして取り扱われ、さらにデンマークでのセメントキルンのファジィ制御システム<sup>5)</sup>が実用化されたことにより、その有効性が認識されるようになった。現在では、家庭電化製品から地下鉄の自動制御までの多方面の分野でファジィ推論が活用されている。

一方、昨今の下水道普及率の向上に伴い、地方の中小都市でも下水道の建設が本格化してきた。しかし、このような都市では、下水処理に熟練した運転操作員を確保でき難く、また流入水質水量変動や施設規模・処理方式の多様化などに対応できるシステムの確立が望まれている。そこで、最近のコンピュータの進歩と相俟って、ESやファジィ推論などのAI技術を下水処理プロセスに適用する気運が高まってきた。

そこで本研究では、AI技術の中でもファジィ推論に着目し、その下水処理プロセスへの適用を展望するとともに、流入水や曝気槽などの各工程における計測情報から処理水のBODやSSという放流基準を安定して達成する方法（計測制御）と流入水や処理水の状態、曝気槽や最終沈殿池での汚泥状態、曝気槽内の微生物相などの情報を運転・維持管理に役立てようとする方法（機能診断あるいは運転支援）の両者から、代表的な下水処理プロセスである活性汚泥法にファジィ推論を適用するためのシステム構成を提案した。

## 2. 下水処理プロセスへのAI技術の適用

### 2.1 制御システムへの適用事例

下水処理プロセスにファジィ推論を適用した最初の事例は、Tongら<sup>6)</sup>により1980年に報告された。これは、活性汚泥処理水のBODやSS、アンモニア性窒素の各濃度、曝気槽DO濃度、SV<sub>30</sub>、バルキング指数などの相互関係をファジィルール化し、曝気槽送風量や返送汚泥量、引抜き汚泥量に帰着させたものである。また、長期間の変動により生じる曝気槽や最終沈殿池の変化を制御できる動的モデルとこれに基づき、状態の推移に応じて多岐の方法で対応できるファジィ制御システムの開発が1984年にBeck<sup>7)</sup>により報告された。その後、活性汚

泥法制御へのファジィ推論の適用は、Yuら<sup>8)</sup>、関根ら<sup>9)</sup>、白石ら<sup>10)</sup>やTsaiら<sup>11)</sup>から報告され、その有効性が論じられてきた。しかし、動的シミュレーションによる検討が大半であり、まだ実用化されるには至っていない。

一方、下水道システムへのファジィ推論の適用事例として、ポンプ場の運転制御が数多く報告されている<sup>12)~17)</sup>。これらの事例は、雨水の流出降雨パターンによる運転方式や、降雨量や放流先の河川水位などの将来変化の予測を運転に反映させる方式が主体であり、ポンプ場の運転制御にファジィ推論の適用が早くから検討され、実用化も進んでいる。この理由は、ポンプ場の運転操作員の経験と勘をファジィ推論に反映しやすいことや、一般的にポンプ場で行われている台数制御がファジィ推論に適していたからと考えられる。

### 2.2 運転支援システムへの適用事例

活性汚泥法の維持管理に役立てることを目的に、ESあるいはファジィ推論を活用した運転支援システムの開発が数多く報告されている<sup>18)~24)</sup>。この適用事例は①運転状態の監視と状況判断、②異常発生の早期検出とその対策に大別でき、後者については、計測器やプロア、ポンプといった機器類の故障診断と、バルキングや異常発泡・スカムといった処理障害への対策に分けることができる。これまでの報告は、ファジィ推論を活用したものよりはむしろ、ESとして開発されたものが多いが、いずれにしても、いかにして多岐にわたる関連知識を獲得し、知識ベースとして整理するかが重要である。この知識ベースの獲得法や組み立て方、入力データの対象も異なるけれども、知識を階層構造としている点がこれらの報告の共通した特徴である。また、統計解析とファジィ推論を融合させたファジィモデリングの考え方から、活性汚泥法の静特性をモデル化し、運転支援に役立てようとする試みも報告されている<sup>25)</sup>。

### 2.3 ファジィ推論適用の課題

下水処理プロセスにファジィ推論を適用する場合には、その施設に見合った知識ベースの獲得と、それに基づいたメンバーシップ関数や規則の決定が最も重要である。このため、ニューラルネットワーク<sup>26)</sup>や遺伝的アルゴリズム<sup>27)</sup>を用いたチューニング手法が提案されている。しかし、このような手法を用いたとしても、各下水処理場に特有の事情もあり、最初の決定は人間の判断に委ねるしかない。そこで、まず最初は、熟練操作員の経験則をできる限り反映させることが基本と考えられる。

一方、推論に入力するデータは、各種の計測器からのオンラインデータを用いる場合が多い。これに加えて、顕微鏡による画像処理データや目視観察によるデータなどを取り込み、推論精度の向上がはかられている。しかし、オンラインで得られる計測データは、現在の処理状況あるいは将来の変化を表すパラメータであり、前向き推論に用いるべき変量である。また、処理障害の発生や顕微鏡観察による原生動物の変化など、過去に生じた原因による処理状況の変化はむしろ後向き推論によって操作量に加味されるべきである。このように、同一レベルで判断すべきではない場合があることを常に考慮しながら、ファジィ推論を活用した下水処理プロセスのシステム構成とメンバーシップ関数、規則の構築を行う必要がある。

### 3. 活性汚泥法へのファジィ制御システムの適用概念

活性汚泥法は微生物の複雑な生態挙動により下廃水を浄化する方法であるので、生物相が変化すれば汚泥状態も変わり、糸状性バルキング、異常発泡やスカム生成、汚泥の解体・腐敗・浮上などの処理障害が発生することもある。また、SRT設定値以上の日数を経過しなければSRT制御の効果を確認でき難い。このように、リア

ルタイムで測定できる計測情報に比べて、測定でき難い現象や時間的な遅れを考慮しなければならない現象が活性汚泥法には存在する。このため現状では、目視観察、現場での簡易測定や実験室レベルでの測定結果などに基づいた運転操作員の経験や勘を制御システムにフィードバックさせて対応している。

我が国785カ所の下水処理場を対象にして、著者ら<sup>20)</sup>が行った「処理障害のアンケート調査」では、維持管理の立場から『水処理の状態把握には目視観察が非常に有効な手段の一つである』と捉えている操作員が多かった。また、計測器からの情報だけでは、処理状態の微妙な変化や障害の前兆を見逃すことがあり、『毎日毎日、自分の目で処理状態を観察し、異常の発見に努める』という意見は維持管理の本質であることを再認識したことがある。

活性汚泥法の制御システムとして、計測情報を制御に反映させることが基本であるが、上記の内容をシステムに活かすことも重要である。そこで、このような機能診断による情報からシステムを構築し、計測情報から構築したシステムと組み合わせることで、先に述べた問題点やアンケートの指摘も解決できるはずである。このシステム構築の手段として、著者らはファジィ推論が有効であると考え、Fig.1のような活性汚泥法ファジィ制御システムを提案する。

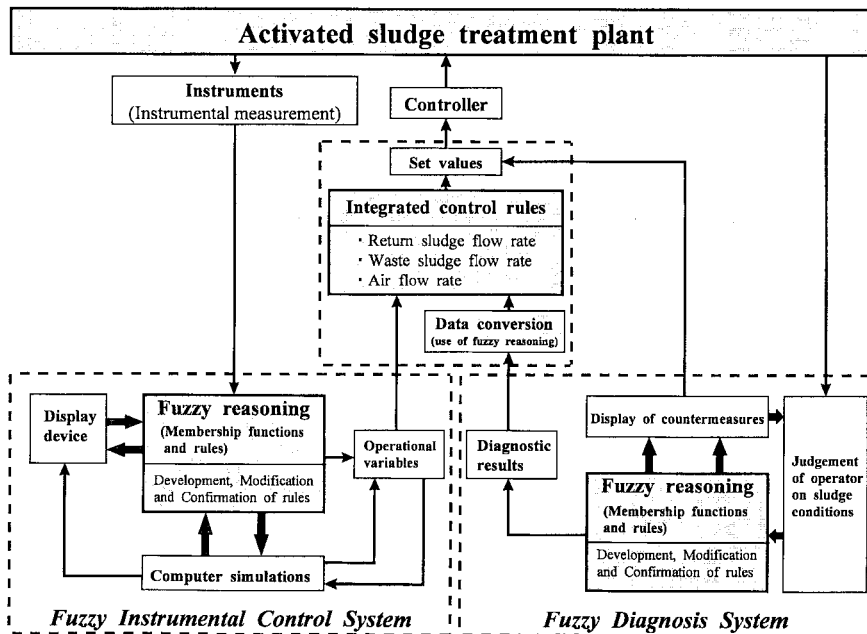


Fig.1 Master conception of activated sludge process control using fuzzy reasoning.

### 3.1 ファジィ計測制御システム

計測情報を得るための機器の精度、信頼性や維持管理を考えると、計測情報はできる限り少なく有効な項目を選定し、またその数値にファジィ推論の考え方を取り入れることが、著者らは実際的であると考えている。そこで、流入水と処理水の計測情報として、浮遊物（SS）濃度（あるいは濁度）、有機物（BODあるいはCOD等）濃度とpHをそれぞれ選抜し、流入水の計測情報によるフィードフォワード（FF）制御で水質水量変動に対応させ、また処理水の計測情報によるフィードバック（FB）制御を行うことでプロセスの安定化を目指せばよい。なお、BODあるいはCODを有機物の指標としてリアルタイムで計測することは現状では難しいので、例えば紫外光（UV）や可視光（VIS）による代替指標の利用も考慮しておく必要がある。

### 3.2 ファジィ機能診断システム

活性汚泥法には、計測情報から判断でき難い種々の処理障害が突発的に生じることが多い。これらの障害の発生は、例えば処理水SSが高くなるなどの処理情報から判断されるが、異常が検出されてからでは活性汚泥法の運転・維持管理に支障をきたすことになる。このため、何らかの情報により、その前兆を事前に検知あるいは診断することで、活性汚泥法の運転・維持管理を支援する必要がある。そこで、先のアンケートに寄せられた運転操作員のノウハウ、既往研究の成果などを知識として蓄積したファジィ機能診断システムを活用すればよい。なお、本システムは、熟練の運転操作員の確保が難しい昨今の事情を考えると、経験の浅い運転操作員の教育用にも適用できると考えられる。

### 3.3 システムの統合化

上記2種類のシステムから推論された結果をファジィ推論により統合し、最終的な判断として制御量に帰着すればよい。しかし、両者の推論結果は必ずしも同一のもので得られるわけではなく、極端な例では、返送汚泥量を一方では「少し減らす（Negative Small）」、もう一方では「増やす（Positive Medium）」と判断されることも想定できる。この場合には、両システムの中でどちらかを優先させるか、1つのシステムだけで制御あるいは運転支援を行うなど、状況に応じて対応すればよい。

### 3.4 推論結果と操作変量

標準的な活性汚泥法における実際の操作変量は曝気風

量、返送汚泥量と引抜き汚泥量の3種類であるので、これらの変量偏差に推論結果を帰着させればよい。しかし、曝気風量と返送汚泥量は制御効果が即座に現れる操作変量であるが、引抜き汚泥量（即ちSRT）はSRTに相当する日数以上が経過しないと効果が現れない変量である。したがって、メンバーシップ関数や規則を作成する上で、これらの応答性を考慮する必要がある。

## 4. 制御アルゴリズムとそのシステム構成

### 4.1 ファジィ計測制御システム

流入水と処理水の各計測情報は同一レベルで制御量に反映させるべきではない。前者の情報はFF制御、また後者の情報はFB制御として扱い、それぞれ別の判断基準に分類する必要がある。さらに、曝気槽DO濃度、曝気槽や返送ラインの汚泥濃度などの計測情報は、上下限值や制御効果の確認として捉えたらよい。なお、以下では、UV測定からCODに換算した指標を有機物の計測情報と考えた。

#### (1) 流入情報による制御アルゴリズム

流入水のpHは6.0~8.0を適正と考え、この範囲（クリップ集合）を逸脱したら、中和処理を行うか、あるいは計測器異常の可能性があると判断する（流入情報1）。また、流入水のSSとCODの計測情報から想定できる事象と対策をTable 1に一括表示した（流入情報2）。これらはFF制御の判断基準であるが、処理情報との突き合せを行う必要がある。

#### (2) 処理情報による制御アルゴリズム

処理水pHの判断は、Fig.2に示したように、「L」が硝化反応（硝酸化または亜硝酸化）の進行あるいは計測器異常の可能性、「M」が適正、「H」が有機物除去のみ進行、藻類の異常発生あるいは計測器の異常に大別できる（処理情報1）。また、処理水のSSとCODの計測情報（処理情報2）から想定できる事象や他の情報との関連をTable 2に一括表示した。処理情報2はFB制御の基準であるが、流入情報2や処理情報1とも深く関連していることが理解できる。多数の判断基準から推論すべき場合には、流入情報2や処理情報1を優先し、これに機能診断システムの推論を加味する場合もある。

#### (3) 各種情報の関連性

曝気槽DO濃度や汚泥濃度は、制御効果の確認や上下限值として捉えるが、多くの現象の中から原因を特定する判断基準として活用する場合も多く、常に判断基準にフィードバックさせる必要がある。また、流入情報と処

Table 1 Instrumental information of influent SS and COD, and recommendable countermeasures

Instrumental information of influent		Process loading	Countermeasures
SS	COD		
L	L	Low	Increase Qw Decrease Qr and Gs ( or Exccute intermittent aeration )
M			
H			
L	M	Medium	Keep present operation Increase Qw and Gs
M			
H			
L	H	High	Decrease Qw ( or Interrupt Qw ) Increase Qw and Gs
M			
H			

Symbols: L= Low; M= Medium; H= High. Qw, Qr and Gs represent the flow rates of waste sludge, return sludge and air, respectively.

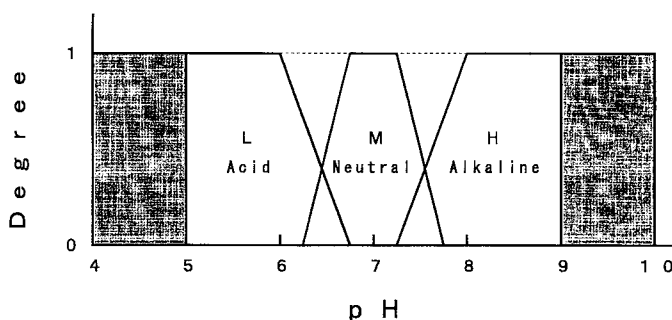


Fig.2 Membership functions of effluent pH for Fuzzy Instrumental Control System. Netty parts indicate the possible pH range of process and pH analyzer failures. Symbols: L= Low; M= Medium; H= High.

Table 2 Instrumental information of effluent SS and COD, and possible cause or recommendable actions

Instrumental information of influent		Treatment condition	Deducible sludge condition	Possible cause or recommendable actions
SS	COD			
L	L	Favourable treatment		A great possibility of changes in treatment condition, except for "L and L" or "M and M" in Table 1. Give priority to the influent information.
M				
H				
L	M	Solids-liquid separation is poor, but substrate removal efficiency is high.	Rising sludge	Nitrification and low effluent pH
M			Deflocculation	Low loading
H			Overaerated sludge	High DO level in the aeration tank
L	H	Solids-liquid separation is ordinary, but substrate removal is poor.	Filamentous bulking	Consult Fuzzy Diagnosis System
M				Low DO level in the aeration tank
H				High loading
L	H	Both solids-liquid separation and substrate removal are poor.	Floating sludge (Scumming)	Consult Fuzzy Diagnosis System
M				Development of anaerobic zone (Structural defect of the aertion tank or diffuser trouble)
H			Anaerobic sludge	

Symbols: L= Low; M= Medium; H= High.

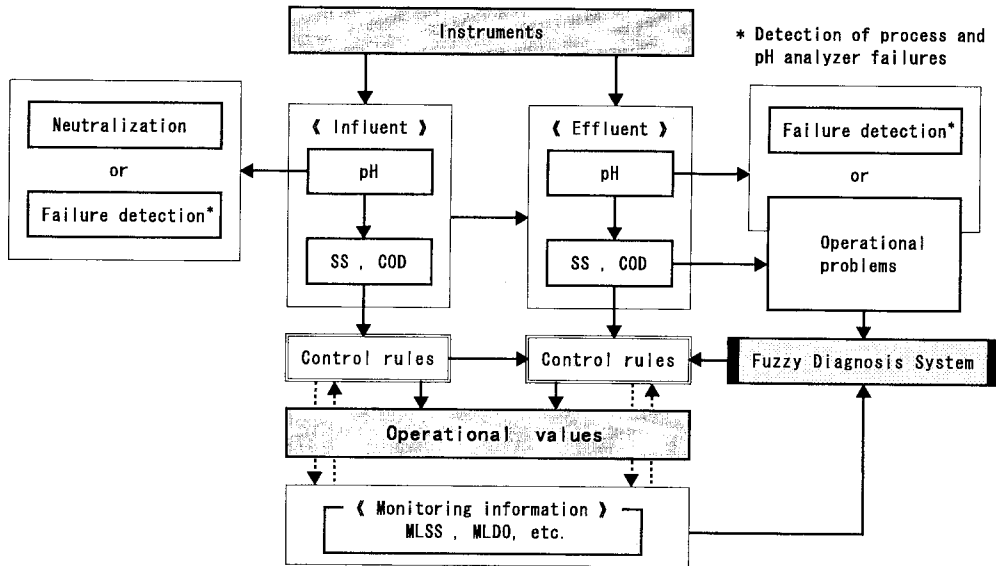


Fig.3 Schematic diagram of Fuzzy Instrumental Control System.

理情報を比較すると、現在の処理状態が良好でも流入水の変動により、将来的に処理状態が変わる可能性があるため、流入情報を優先させることが望ましい。以上のシステム構成を整理すると Fig.3 の通りである。

#### 4.2 ファジィ機能診断システム

機能診断に関わる知識は極めて多岐にわたるので、目視観察・現場測定・実験室測定という3つの判断レベルに大別する。また、対象となる場所として、最初沈殿池越流水（流入水）・曝気槽・最終沈殿池（返送汚泥ラインを含む）・最終沈殿池越流水（処理水）・返流水（汚泥処理施設のある場合）の5つを選び、判断のレベルと場所ごとに重要と考えられる項目を選抜すればよい。

##### (1) 目視観察

「目視観察」の項目として、色相・臭気・油膜・浮遊物が考えられる。例えば、流入水の色相は白・黄白色・黄色・褐色・黒褐色・黒色に、また処理水の色相は無色透明・薄黄色・黄色と黒褐色・白濁にそれぞれ分類する。白色や白褐色では流入水中に無機物が多く、特にトイレトペーパー由来の場合が経験則である。この色相の判断は運転操作員の主観が強いため、他の操作員では違う色相と判断される場合も想定できる。そこで、その基準をファジィ推論のメンバーシップに置き換えればよい。なお、処理水では、白濁は高負荷量・低負荷量・過曝気・低DO・毒物の混入などの原因が特定でき、また黒褐色

は極めて特殊な事象で、しかも他の判断基準や計測制御情報とも深く関連するため、クリस्प集合的な取扱いとする (Fig.4)。その他の項目についても同様のメンバーシップ関数を作成し、これら単独の判断基準の中から選択された各項目を適宜組み合わせ、目視観察としての判断を行わせる。

##### (2) 現場測定

「現場測定」の項目として、水温・pH・DO・SV<sub>30</sub>・透視度が考えられる。これらの項目について先と同様のメンバーシップ関数を作成すればよい。なお、メスシリンダーによるSV測定では経験的に、Fig.5に示したような状態となる。汚泥と上澄液の状況により測定可能と測定不能に分けられ、前者では正常汚泥と糸状性バルキング、また後者では分散増殖汚泥と浮上汚泥に分類できる<sup>29)</sup>。そこで、この4種類の状態をクリस्प集合として推論に加味すれば、汚泥状態の判断に利用できる。

##### (3) 実験室測定

対象微生物としては、光学顕微鏡で容易に観察できる原生動物と微小後生動物、糸状性微生物が实际的である。しかし、属名まで同定できる専門家ばかりではないので、簡易判定と計数の両者を選択できるように配慮する必要がある。簡易判定は、原生動物 (Fixed type, Crawling type, Free swimming type) と後生動物、糸状性微生物について「出現せず」、「僅かに出現」、「少し出現」、「多く出現」、「非常に多く出現」と分類し、また必要に応じ

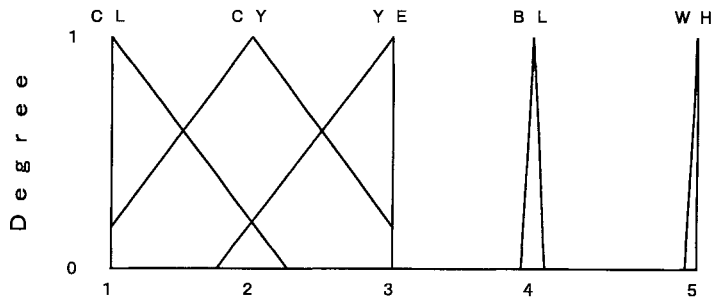


Fig.4 Membership functions of effluent colors for Fuzzy Diagnosis System. Symbols: CL= clear; CY= cream yellow; YE= yellow; BL= black; WH= white.

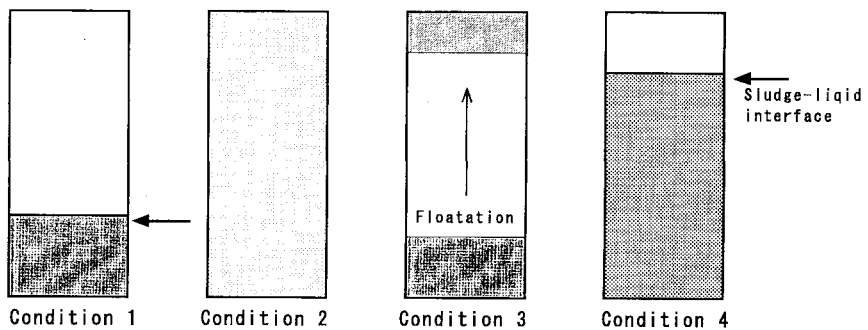


Fig.5 Sludge-liquid interfaces in the measurement of sludge volume with a one liter cylinder. Sludge condition is normal in Condition 1, flocculation is poor in Condition 2, density is low in Condition 3, and consolidation is poor in Condition 4.

Table 3 Countermeasures to poor sludge conditions

Sludge condition	Mechanism	Observations	Possible cause	Recomendable countermeasures
Dispersed sludge	Poor flocculation	No floc formation	High loading	Decrease loading by diluting influent sewage/extend SRT
Deflocculation		Dismantling of floc	Low loading Severe shearing stress	Execute intermittent aeration Adjust aerators
Rising sludge	Decrease of sludge density	Adhesion of N <sub>2</sub> gas to sludge	Denitrification	Increase underflow rate from secondary clarifier
Floating sludge		Softening of sludge/scumming	Adhesion of fat and oil/growth of actinomycetes	Remove influent fat and oil/skimming
Anaerobic sludge		Gas production of H <sub>2</sub> S, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , etc.	Decomposition of sludge	Prevent development of anaerobic zone
Overaerated sludge	Poor consolidation	Dismantling of floc	Overaeration	Decrease air flow rate Adjust aerators
Filamentous bulking		Abnormal growth of filament microorganisms		Alter the process to anaerobic-aerobic or sequential batch processes

Based on the categories by Pipes<sup>30)</sup>.

て、硝化反応が進行した場合によく出現する *Arcella*、毒物やDOに敏感な *Aspidisca* などの指標微生物を加えればよい。糸状性微生物は、菌種により現象と対策が異なるので、その事象を特定して対応する。さらに、1 ml 当たりの出現個数を計数する場合には、上記分類ごとの存在割合から出現頻度を計算し、推論させる。

#### (4) 推論結果の表示

選択した項目ごとの推論結果を各種組み合わせて、最終的にプロセスの状態と汚泥状態、対策を表示させる。例えば、最終沈殿池における固液分離能低下では Table 3 に示したような汚泥状態・発生機構・発生状況と原因を特定し、その対策を表示させる。なお、ファジィ計測制御システムとの関連も知識ベースに組み込む必要がある。

以上、ファジィ推論を活性汚泥法の自動制御システムに適用した場合のシステム構成を提案した。ファジィ推論の適用で重要な点は、メンバーシップ関数と規則の設定にある。先にも指摘したが、ファジィ計測制御システムでは、先ず熟練操作員の経験則をできる限り反映させて設定し、動力学モデルを用いたシミュレーションにより試行錯誤的に調整させる手法が現実的であると考えている。また、ファジィ機能診断システムでは、数多くの障害事例とその対策について、多くの知識ベースを蓄積させる必要がある。この点では、著者らの行ったアンケート調査の結果は極めて貴重な知識となるはずである。

本研究の提案内容を踏まえて、現在、パソコンによる活性汚泥法ファジィ自動制御システムを構築しているが、実際の運転に際しては、種々の問題点がでてくると思われ、パイロット規模あるいは実規模の活性汚泥処理装置による運転を通して、提案内容の実用化をはかっていきたいと考えている。

## 5. まとめ

AI技術の中でもファジィ推論に着目して、下水処理プロセスへのファジィ制御システムの適用を展望した。これまでの適用事例は、ポンプ場の運転制御や、活性汚泥法の監視と状況判断、異常発生と早期発見とその対策といった運転支援あるいは機能診断の事例が多いことを概説した。これらの事例を踏まえて、流入水と処理水における計測情報から処理水の有機物や浮遊物という放流基準を安定して達成する方法（ファジィ計測制御システム）と、流入水や処理水の状態、曝気槽や最終沈殿池での汚泥状態、曝気槽内の生物相などの情報を運転・維持管理に役立てようとする方法（ファジィ機能診断システ

ム）の両者から、活性汚泥状態の把握とそのファジィ制御法のシステム構成を提案した。

## 参考文献

- 1) Buchanan, B., Sutherland, G. and Feigenbaum, E.A.: Heuristic DENDRAL, A Program for Generating Explanatory Hypothesis in Organic Chemistry, in Mathine Intelligence 4, American Elsevier (1969)
- 2) Shortliff, E.H.: Computer Based Medical Consultations MYCIN, American Elsevier (1976)
- 3) Zadeh, L.A.: Fuzzy Sets, Inform. Control, 8, 338-353 (1965)
- 4) Mamdani, E.H.: Application of Fuzzy Algorithms for Control of a Simple Dynamic Plant, Proc. IEEE, 121 (12), 1584-1588 (1974)
- 5) Holmblad, L.P. and Ostergaard, J.J.: Control of a Cement Kiln by Fuzzy Logic, Fuzzy Information and Decision Processes (Gupta, M.M. and Sanchez, E., Eds.), North-Holland, Amsterdam, 389-399 (1982)
- 6) Tong, R.M. and Beck, M.B.: Fuzzy Control of the Activated Sludge Wastewater Treatment Process, Automatica, 16, 695-701 (1980)
- 7) Beck, M.B.: Modelling and Control Studies of the Activated Sludge Process at Norwich Sewage Works, Trans. Inst. Meas. Control, 6(3), 117-131 (1984)
- 8) Yu, C., Cao, Z. and Kandel, A.: Application of Fuzzy Reasoning to the Control of an Activated Sludge Plant, Fuzzy Sets and Systems, 38, 1-14 (1990)
- 9) 関根孝夫、井手慎司、清水公一：ファジィ制御による曝気槽の最適運転、用水と廃水、34 (5)、405-411 (1992)
- 10) 白石元、中原俊輔：活性汚泥処理プロセスへのファジィ制御の適用、ケミカル・エンジニアリング、39、437-441 (1994)
- 11) Tsai, Y.P., Ouyang, C.F., Chiang, W. L. and Wu, M.Y.: Construction of an On-Line Fuzzy Controller for the Dynamic Activated Sludge Process, Water Res., 28913-921 (1994)
- 12) 大音透：ファジィ論理を用いたポンプ運転制御方法、水システム自動計測制御ワークショップ論文集、93-96 (1984)
- 13) 八木俊策、金子光美：ファジィ理論を用いた合流式下水道のポンプ制御、下水道協会誌、26 (303)、71-80 (1989)
- 14) 本田和広、山田富美夫、小林主一郎、奥満男、国見正樹：ファジィ応用による下水処理場オンラインエキスパートシステム、第3回水システム自動計測制



- 御国内ワークショップ論文集、157-160 (1989)
- 15) 栗野俊正、紙谷広幸、木村孝、野田純生、丸山久：A I手法を利用した下水処理場におけるポンプ運転制御方法、第3回水システム自動計測制御御国内ワークショップ論文集、145-148 (1989)
  - 16) 鈴木一如、谷内宏：ファジィ推論による下水道ポンプ制御、新都市、43(9)、80-84 (1989)
  - 17) 深野司：下水ポンプ場におけるファジィ制御の応用について、第4回環境システム自動計測制御御国内ワークショップ論文集、214-217 (1992)
  - 18) 前田和男：知識ベースによる下水処理プロセス運用管理支援システム、水システム自動計測制御ワークショップ論文集、121-124 (1984)
  - 19) Horan, N. J. and Eccles, C. R.: The Potential for Expert Systems in the Operation and Control of Activated Sludge Plants, *Process Biochemistry*, 21(3), 81-85(1986)
  - 20) Geselbracht, J. J., Brill, E. D. Jr. and Pfeffer, J.T.: Rule-Based Model of Design Judgement about Sludge Bulking, *J. En. Eng. Div.*, 114(1), 54-73(1988)
  - 21) 圓佛伊智朗、平岡正勝、津村和志：下水処理場運転管理のための知的支援システムの構築に関する研究、水質汚濁研究、12 (10)、664-671 (1989)
  - 22) Nix, S. J. and Collins, A. G.: Expert Systems in Water Treatment Plant Operation, *J. AWWA*, 83(2), 43-51(1991)
  - 23) Watts, P. and Knight, B.: Fault Diagnosis in ASPEX; an Expert System for the Control of the Activated Sludge Proces, *Engng. Applic. Intell.*, 4(2), 151-155(1991)
  - 24) Ichikawa, M., Shimizu, K. and Iwahori, K.: Diagnosis Expert System for the Activated Sludge Process Using Biota Observed by Microscopic Examination, *Wat. Sci. Tech.*, 28(11-12), 231-237(1993)
  - 25) 鈴木一如：ファジィシステムとファジィモデリング、日本醸造協会誌、86 (4)、239-244 (1991)
  - 26) 依田幹雄、馬場研二：ニューラルネットワークの計測制御への適用、水環境学会誌、16 (9)、13-16 (1993)
  - 27) 白石元、中原俊輔：遺伝的アルゴリズムを利用したファジィ制御の活性汚泥プロセスへの適用、化学工学論文集、22 (1)、1-6 (1996)
  - 28) Fujita, M., Iwahori, K., Kawaguchi, Y. and Sakai, Y.: A Survey of Operating Problems Associated with Sewage Treatment Plants in Japan, *Japanese J. Water Treat. Biol.*, 32(4), 254-269 (1996)
  - 29) 岩堀恵祐：活性汚泥処理障害と対策、防菌防黴、24 (12)、801-806 (1996)
  - 30) Pipes, W. O.: Bulking of Activated Sludge, *Advances in Applied Microbiol.*, 9, 185-234 (1967)
- (受付 1996.10.18)  
(受理 1997.2.17)