

小規模汚水処理施設における 活性汚泥法ファジィ制御システムの検証実験

Effects of Activated Sludge Fuzzy Control System on Influent Variations
at Small-Scale Domestic Wastewater Treatment Facility

岩堀恵祐¹, 安井幹人^{2*}, 藤田正憲², 山川公一郎³

¹ 静岡県立大学環境科学研究所/〒422-8526 静岡市谷田52-1

² 大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻/〒565-0871 吹田市山田丘2-1

³ ㈱竹中工務店/〒104-0061 東京都中央区銀座8-21-1

KEISUKE IWAHORI¹, MIKIHITO YASUI^{2*}, MASANORI FUJITA², KOICHIRO YAMAKAWA³

¹ Inst. for Environ. Sciences, Univ. of Shizuoka /52-1, Yada, Shizuoka 422-8526, Japan

² Div. of Environ. Eng., Grad. School of Eng., Osaka Univ./2-1, Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

³ Takenaka Co./8-21-1, Ginza, Chuo-ku, Tokyo 104-0061, Japan

Abstract

Effects of activated sludge fuzzy control system on the influent variations were experimentally investigated at the small-scale domestic wastewater treatment facility. The results were that, without broad changes of return sludge and air flow rates, the effluent CODs in fuzzy control showed slight fluctuations in spite of the pulse and the daily variations of the influent. Therefore, this system could be verified to be effective on the influent variations. Using the portable telephone and terminal, operational supports with remote data links were tried in this experiment and the results of fuzzy reasoning could be surely obtained from the distant place and then their availability and possibility may be expected in future.

Key Words : activated sludge process, influent variation, fuzzy control, expert system, small-scale domestic wastewater treatment facility, remote data link

1 はじめに

エキスパートシステムは、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。この知識や問題の解決能力には、明確に定義できない場合や曖昧な表現が多いので、それらを数学的に取り扱うことのできるファジィ推論の適用が検討されてきた。ファジィ推論は Zadeh¹⁾ のファジィ集合論から派生し、Mamdani²⁾ がファジィ制御の概念にまで発展させてから、家庭電化製品や地下鉄の自動制御などの

多方面の分野で活用されてきた。

一方、昨今では、地方の中小都市でも下水道の建設が本格化してきている。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にくく、さらに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。これは、下水処理場ばかりではなく、し尿処理場あるいは規模の大きな合併処理浄化槽でも同様である。そこで、最近のコンピュータの進歩と相俟って、エキスパートシステムなどの技術を処理プロセスに適用する気運が高まってきている。

このような社会的な背景を踏まえて、著者らは、流入水や曝気槽などの各工程における計測情報から

*現在の所属： 大阪市下水道局

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)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³⁾、活性汚泥ファジィ制御システムを構築した⁴⁾。また、流入変動にはファジィ計測制御で運転を行い、汚泥状態の変化にはファジィ機能診断による運転支援を行うことで活性汚泥法を良好に維持運転できることをパイロット規模の処理装置で検証してきた^{5, 6)}。

本研究は、これら一連の研究内容を踏襲・発展させることを目的に、実際の集合住宅汚水処理施設に本システムを適用し、流入変動に対する制御効果を検討したものであり、また最近の通信技術の発展を鑑み、遠隔データ通信システム(リモートデータリンク)を利用した活性汚泥法の運転支援も試みた。

2 実験材料並びに方法

2.1 小規模汚水処理施設の概要

処理施設は、長時間曝気法と接触曝気法を組み合わせ合わせた合併処理浄化槽(処理対象人員:670人)で、活性汚泥処理装置(Fig.1)のみを対象として実験を行った。沈砂槽、流量調整槽と沈殿槽の有効容積はそれぞれ 3.9m^3 、 71.6m^3 と 31.5m^3 である。また、既設の曝気槽は2槽あるが、実験には、流入と返送の両パイプラインを変更して、後段の曝気槽(有効容積: 63.1m^3)のみを使用した。曝気槽への汚水の流入と汚泥の返送は汚水計量槽と返送汚泥計量槽の三角堰により、また曝気槽への送風は4つの散気装置から行われている。流入汚水量は移流ポンプの台数と計量槽のノッチ高、返送汚泥量はエアリーフトポンプの送風量、また曝気量はバルブと前段の曝気槽などへの放風によりそれぞれ調節可能である。

2.2 活性汚泥処理装置の状況調査と初期調整

本処理装置は通常、流量調整槽内のフロートにより汚水が間欠的に流入され、この曝気槽への汚水の流

入に併せて、タイマーによりプロアが稼働している。曝気槽の水理学的滞留時間(Hydraulic Retention Time:HRT)は約2日、汚泥返送率は300%、また対象とした曝気槽への総送風量は約 $58\text{m}^3/\text{hr}$ にそれぞれ設定され、返送汚泥計量槽からの汚泥引抜は適宜行われている。この運転条件で曝気槽と返送汚泥のMLSS濃度はそれぞれ約 $5,000\text{mg/L}$ と約 $9,000\text{mg/L}$ に維持されていた。そこで、実験を開始する前にまず、汚水・汚泥の両計量槽での流量範囲、エアリーフトの風量と返送汚泥量の関係を、またバルブを調整して均一曝気にしてから、曝気槽への総送風量の範囲をそれぞれ調査した。次に、流入汚水と沈殿槽越流水(処理水)の水質を分析し、平均的な流入汚水・処理水の水質(Table 1)を把握するとともに、移流口からの前段の曝気槽へのバックミキシングの影響がないことを確認した。

2.3 実験方法

流量調整槽への汚水の流入状況とその貯留量、施設利用の制約から、本実験では、曝気槽への流入量の短期的な変動を試みた。まず、実験を開始する1日前に、連続流入・連続曝気運転に切り替え、予備調査の結果を踏まえて、HRTを30hr、汚泥返送率を125%、総送風量を $58.3\text{m}^3/\text{hr}$ に設定し、ほぼ安定した処理状況を確認してから実験を行った。なお本実験は、流入水の短期的な変動であるので、汚泥の引抜きは行わなかった。また、実験を行うにあたり、構築したファジィ制御システムのメンバーシップ関数と規則を、本処理装置に合わせてチューニングした。即ち、予備調査の結果と変動条件から、これらを著者らの経験則に基づいてまず決め込み、次にシミュレーション⁸⁾で微調整を行った。本実験でのメンバーシップ関数と規則の代表例をFig.2、Table 2にそれぞれ示す。

(1) パルス変動に対する定量運転とファジィ制御の比較実験(実験1)

集合住宅で代表的な生活パターンを示すと考えられる火曜日に運転モードを切り替え、翌日、安定な処理状況を確認してから、流入水量の3倍及び2倍のパルス変動を与えた。ファジィ制御の操作手順は、変動開始の15分前に流入水の浮遊物(SS)と溶解

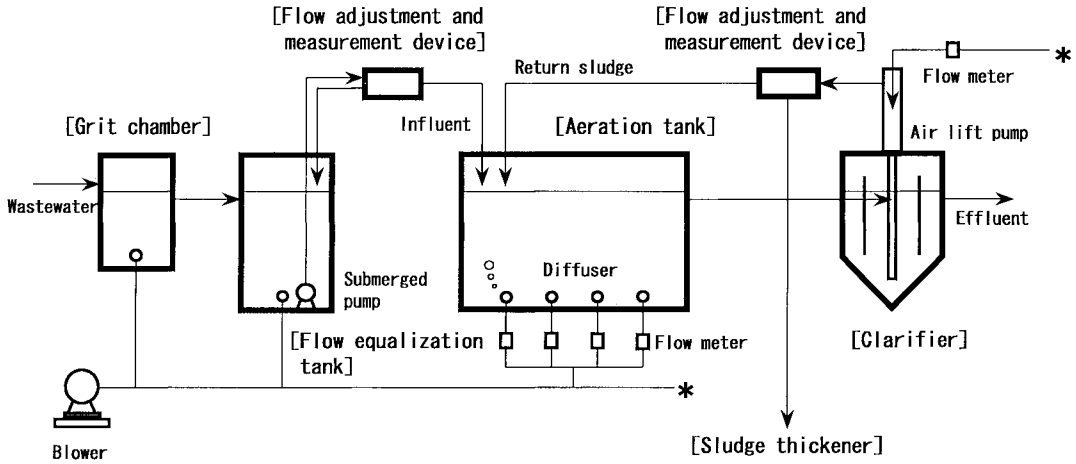


Fig.1 A schematic of activated sludge process used in this experiment

Table 1 Analytical results of influent and effluent

	Organics (mg/L)			Nitrogen compounds (mg/L)				PO ₄ -P (mg/L)	Surfactant (mg/L)	
	BOD	COD	TOC	T-N	Org-N	NH ₄ -N	NO ₂ -N			NO ₃ -N
Influent	56.8	28.5	34.3	29.3	1.26	27.7	0.16	0.35	1.16	2.55
Effluent	2.8	5.5	7.3	15.3	1.23	1.8	0.05	12.3	1.72	0.20

All samples were filtrated and measured by standard methods. The above values were averaged for several analyses.

Table 2 Some examples of rule in activated sludge fuzzy control system

- R1 If "inSS=Z0 and inQS*inCOD" then "dQW=MTRX1"
-
- R10 If "inSS=NB and inQS=NS and inCOD=MSF" then "dQR=NB NB NB NM NS"
- R11 If "inSS=NB and inQS=Z0 and inCOD=MSF" then "dQR=NB NB NM NS Z0"
- R12 If "inSS=NB and inQS=PS and inCOD=MSF" then "dQR=NS Z0 PS PM PB"
-
- R33 If "inSS=PB and inQS=PB and inCOD=MSF" then "dGA=PS PM PB PB PB"

MTRX1					
inQS (line)*inCOD (column)=dQW					
	NB	NS	Z0	PS	PB
NB	PB	PB	PM	PS	Z0
NS	PB	PM	PS	Z0	NS
Z0	PM	PS	Z0	NS	NM
PS	PS	Z0	NS	NM	NB
PB	Z0	NS	NM	NB	NB

Symbols: dQW, deviation of waste sludge flow rate (without actual operation); MSF, membership function; the others, see Fig.2.

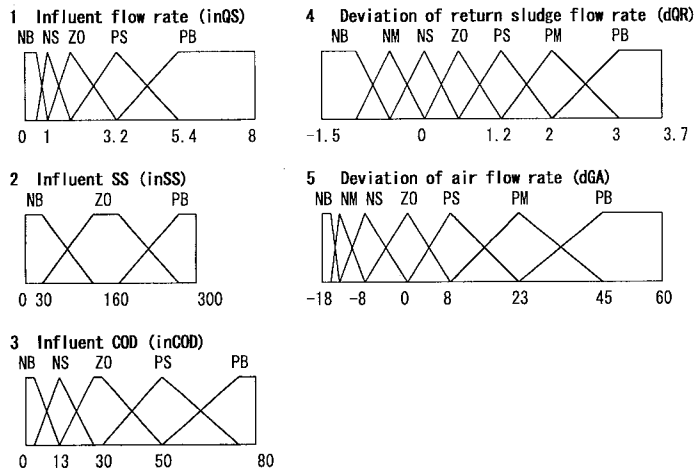


Fig.2 Representative membership functions of fuzzy control system. Symbols: NB, negative big; NM, negative medium; NS, negative small; ZO medium; PS, positive small; PM, positive medium; PB, positive big.

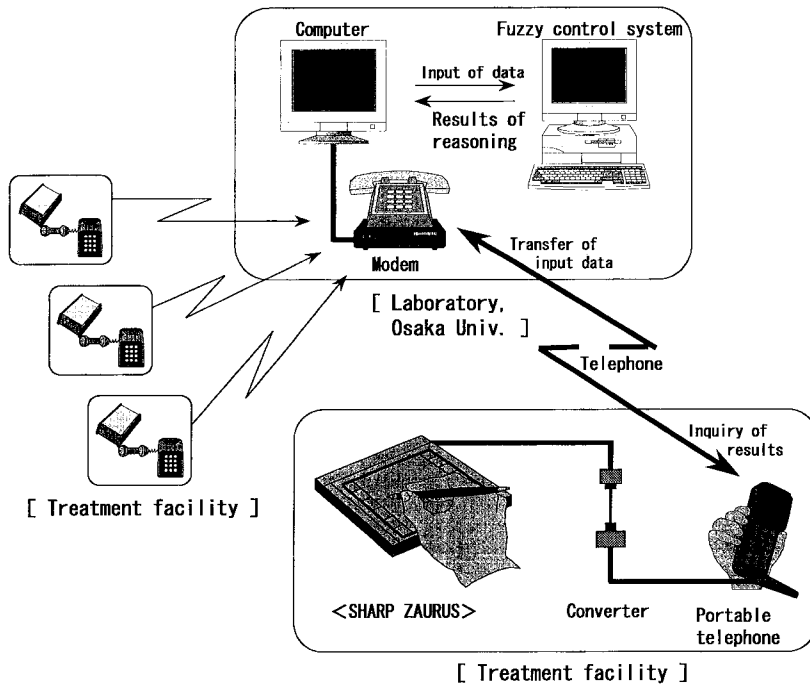


Fig.3 Conception of remote data link used in this experiment.

性有機物(COD)を測定し、これらの値と流入水量からファジィ制御システムで推論させ、曝気槽への総送風量と返送汚泥量を所定値になるように手動で調節した。また定量運転では、操作変量を変えずに、同様の変動を与えた。なお、流入水と処理水は、流量調整槽の三角堰越流水と沈殿槽越流水をオートサンプラーで採取して分析に供し、曝気槽内の溶存酸素(DO)濃度、曝気槽・返送汚泥の両MLSS濃度、曝気槽混合液のSV₃₀とpH、処理水の透視度を適宜測定した。

(2) 日間変動パターンに対するファジィ制御の検証実験(実験2)

実験1と同様に運転モードを切り替え、朝と夜に高くして昼間に低くなる日間変動パターンとなるように、流入水量を3倍、2倍あるいは約1/2倍に変動させてファジィ制御を行った。その操作手順と測定項目などはすべて、実験1と同じである。なお、流入水のCOD濃度を高め、水質変動を与えるために、実験開始2時間目と15時間目に、コーンステーパー(CSL)を沈砂槽あるいは流量調整槽にそれぞれ約18L投入した。

(3) リモートデータリンクによる運転支援

携帯端末を用いたリモートデータリンクのシステム構成をFig.3に示す。

携帯端末として液晶ペンコム(ZAURUS PI-6000、シャープ製)、通信手段としてデジタル携帯電話(デジタルツーカーN、㈱ツーカーホン関西製)を用い、携帯端末には専用アダプター(CE-DA1、シャープ製)を、またパソコン(PC-9801RA、NEC製)には通信速度2400bpsのモデム(MD2400F、立石電機製)をそれぞれ接続した。同機種のもう1台のパソコンには、活性汚泥法ファジィ制御システムをインストールした。

ホストパソコンには、携帯端末とリモートデータリンクするためのソフト(ザウルスリモートPI-RM1、シャープ製)をインストールし、日時の設定と、曝気槽への流入汚水の水量、浮遊物(SS)・溶解性CODの各濃度の入力を行うためのファイルを作成した(携帯端末にも同様のファイルを作成)。また、ホストパソコンと携帯端末に、日時と、返送汚泥量・引抜汚泥量・曝気風量の推論結果を格納するファイル(推論ファイル)をそれぞれ作成した。

リモートデータリンクによる運転支援は実験2で行った。流入水のSSと溶解性CODの各濃度を現場で測定してから、これらの値と流入水量を携帯端末のファイルに入力し、携帯電話を介して、研究室(大阪大学)のホストパソコンに送信した。この情報をもとに、オペレータがファジィ制御システムに入力して推論を行い、その結果をホストパソコンの推論ファイルに入力・保存した。ここでは、ホストパソコンから送信するのではなく、現場の携帯端末からホストパソコンに再度アクセスし、所定の情報を推論ファイルから検索する方法をとった。この情報をもとに、曝気槽への曝気風量と返送汚泥量を所定値になるように手動で調節した。

2.4 分析方法

流入水と処理水のろ液のCODを簡易COD計(HC-507型、セントラル科学製)で迅速に測定した。また流入SSと曝気槽内MLSSは、予め作成した吸光度(OD₄₂₀)との相関関係から換算し、処理水SSはろ紙法⁸⁾(1.0 μ m)で分析した。その他の項目は、ポータブルの水質計測器あるいは下水試験方法⁸⁾に準じて測定した。なお、簡易COD計の測定値が下水試験方法による手分析値とほぼ同一であることを予め確認している。

3 実験結果並びに考察

3.1 パルス変動に対する定量運転とファジィ制御の比較実験(実験1)

実験1における流入水量、流入SSとCOD、処理水CODの経時変化をFig.4に示す。定量運転とファジィ制御における流入SSはそれぞれ、146.4~289.3mg/L(平均199.7mg/L)、120.3~231.6mg/L(平均167.7mg/L)、流入CODは21.0~32.3mg/L(平均24.8mg/L)、18.3~34.2mg/L(平均26.4mg/L)であり、また流入pHは7.10~7.20と7.10~7.25で、ほぼ同一の流入条件で比較実験を行うことができた。

本実験の処理水質を比較するとTable3の通りであり、処理水SSでは定量運転の平均値が低かった

Table 3 Analytical results of constant and fuzzy controls in experiment 1

		Constant	Fuzzy
SS (mg/L)	Range	10.4~17.0	10.7~16.2
	Average	12.3	13.5
	C. V. * (%)	13.5	10.3
Effluent COD (mg/L)	Range	3.8~7.4	3.5~6.0
	Average	4.9	4.5
	C. V. * (%)	15.4	12.1
pH		6.6~6.8	6.5~7.0
Transparency (cm)		≥30	
Aeration tank	MLSS (mg/L)	4752~6458	4567~5889
	pH	6.6~6.8	6.5~7.0
	SV ₃₀ (%)	33~40	33~45
Return sludge	MLSS (mg/L)	9032~14840	10767~16989

* C. V. : coefficient of variation

Table 4 Evaluations of return sludge and air flow rates before and after a 3-fold variation in experiment 1

	before	after	Increase or decrease
A) Return sludge flow rate			
Fuzzy	2.63m ³ /hr (125%)	→ 5.71m ³ /hr (91%)	Increase of 117% with variation of 3.08m ³ /hr
Constant	2.63m ³ /hr (125%)	→ 7.89m ³ /hr (125%)	Increase of 200% with variation of 5.26m ³ /hr
B) Air flow rate			
Fuzzy	58.0m ³ /hr (27.6-fold)	→ 89.3m ³ /hr (14.2-fold)	Increase of 54% with variation of 31.3m ³ /hr
Constant	58.0m ³ /hr (27.6-fold)	→ 174m ³ /hr (27.6-fold)	Increase of 200% with variation of 116m ³ /hr

The numbers in the parentheses correspond to return sludge ratio in A) and air flow ratio in B), respectively, both with respect to the influent flow rate.

Table 5 Evaluations of return sludge and air flow rates before and after half variation in experiment 2

	before	after	Increase or decrease
A) Return sludge flow rate			
Fuzzy	2.63m ³ /hr (125%)	→ 2.80m ³ /hr (233%)	Increase of 6.5% with variation of 0.17m ³ /hr
Constant	2.63m ³ /hr (125%)	→ 1.50m ³ /hr (125%)	Decrease of 43% with variation of 1.13m ³ /hr
B) Air flow rate			
Fuzzy	58.0m ³ /hr (27.6-fold)	→ 62.0m ³ /hr (51.7-fold)	Increase of 6.9% with variation of 4.0m ³ /hr
Constant	58.0m ³ /hr (27.6-fold)	→ 33.0m ³ /hr (27.6-fold)	Decrease of 43% with variation of 25.0m ³ /hr

See Table 4 on the numbers in the parentheses.

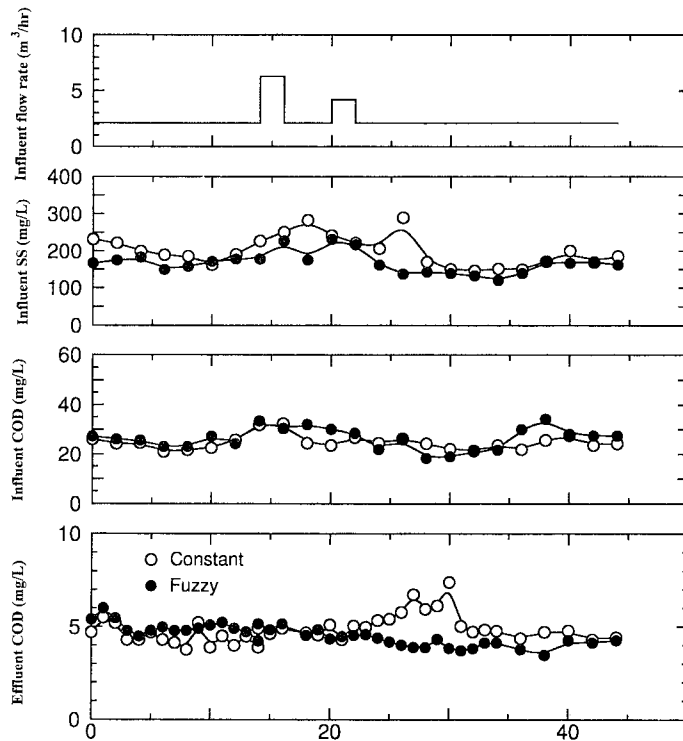


Fig.4 Time courses of influent flow rate, influent SS and COD and effluent COD concentrations in exp.1.

が、変動係数は逆に高く、また処理水 COD では平均値・変動係数ともファジィ制御の方が低かった。曝気槽や返送汚泥の MLSS 濃度、 SV_{30} と処理水 pH は両者とも大差無く、処理水の透視度も 30cm 以上であり、汚泥状態に差異は認められなかった。しかし、Fig.4 から明らかなように、定量運転では、パルス変動を与えてから HRT 相当の遅れで処理水 COD が高くなり、その後、元の値に戻って安定したが、ファジィ制御では、パルス変動の影響が全く現れず、逆に低下・安定していた。また、変動前後の曝気槽内 DO 濃度を比べると、定量運転では 3.2~4.0mg/L が 0.4mg/L 程度まで低下したが、ファジィ制御では低くとも 1.2mg/L までであった。このように、単純な 2 回のパルス変動にもかかわらず、定量運転では処理水 COD にピークが現れたが、ファジィ制御では安定した処理性能が得られ、流入変動に対するファ

ジィ制御の効果が明らかとなった。そこで実験 2 では、さらに複雑な変動をかけ、ファジィ制御の効果のみを検証することにした。

3.2 日間変動パターンでの検証実験 (実験 2)

実験 2 における流入水量と、流入・処理水の SS と COD の経時変化を Fig.5 に示す。実験 1 の状況とは異なり、流入 SS と COD は高く、特に CSL の投入の影響で COD は大きな変動を与えることができた。処理水 SS と COD は 8.8~28.1mg/L (平均 19.7mg/L、変動係数 28.07%)、4.06~6.78mg/L (平均 5.56mg/L、変動係数 14.1%) であった。実験 1 のファジィ制御と同様に、その他の流入・処理水の特性は大差無く、曝気槽内 DO 濃度は最低でも 1.6mg/L

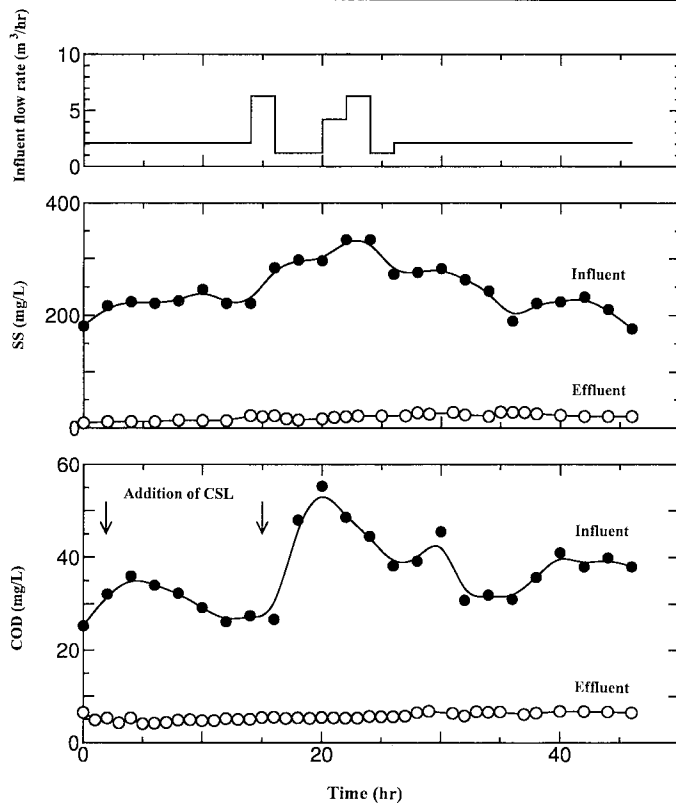


Fig.5 Evaluations of return sludge and air flow rates before and after half variation in experiment 2 experiment 2

に維持されていた。このように、実験1よりもSSで約1.5倍、CODで約1.4倍の高い流入負荷をかけ、しかも複雑な水質水量変動を与えたにもかかわらず、処理水CODはほぼ一定の値を維持していたので、ファジィ制御システムは流入変動に対応できる有効なシステムであるといえる。なお、汚泥の沈降状態が良好であったにもかかわらず、実験1よりも処理水SSが変動していた。これは流入水量の急激な増減により、沈殿槽での汚泥界面が安定しなかったためであり、エアリフトポンプにより、沈殿槽の汚泥ホッパーから、より多くの汚泥を計量槽に送ることと改善できると思われる。

3.3 操作変量からみたファジィ制御の有効性

実験1で14時間目に流入水量を3倍(2.1m³/hrから6.3m³/hr)に増加させた場合と、実験2で16

時間目に約半分(2.1m³/hrから1.2m³/hr)に減少させた場合の操作量の変化をTable4とTable5にそれぞれ示した。なお、比較のため、同一条件での定量運転(汚泥返送比と通気倍率を一定)の場合を試算し、Table5に併記した。これより、実験1では、流入SSとCODの変動が少ないため、汚泥返送率あるいは通気倍率を一定にした場合よりも、ファジィ制御では操作変量を大幅に変える必要がないことがわかる。しかし、実験2の場合、流入水量の減少に伴って、返送汚泥量や総送風量は減少するはずだが、ファジィ制御では両者とも僅かに増加した。この変動時には、流入SSとCODが急激に増加しており、これらが推論に考慮されたため、安定した制御結果が得られたものと考えられる。したがって、操作変量からみてもファジィ制御が流入変動に有効であると判断できる。

なお、両実験とも運転操作・測定をすべて手動・手分析で行ったが、今後はプロセス用の水質計測器

による自動制御系で長期間、ファジィ制御システムの効果を検証する予定である。

3.4 リモートデータリンクによる運転支援

リモートデータリンクによる運転支援の結果は Fig.5の通りであり、実験1のような現場でも、実験2のような遠隔地(大学)でも推論結果を得ることができた。この試みは、ホストパソコンとファジィ制御システムの操作をオペレータが行った事例であるが、今後は、これらのインターフェイス機能をソフトで補うことにより、オペレータを介さずに直接、推論やそのファイル保存ができるように、システムを機能アップさせたい。また、今回は短期的な流入変動を与えたため、操作員の視覚情報(色相、臭気や汚泥状態など)や簡易測定の結果(SV₃₀やpH、DOなど)を踏まえた活性汚泥法の機能診断⁵⁾は試みなかったが、その適用も可能である。本実験では、最も単純なシステム構成によるリモートデータリンクを試みたが、最近の携帯電話とインターネットの普及、携帯端末の性能向上により、さらに機能アップされたシステムを構築できるはずである。

小規模な活性汚泥処理施設は、計測・制御・自動化といった機能をほとんど持たず、さらに操作員の巡回により維持管理を行っている場合が多い。経験豊富な操作員であれば、処理状態や汚泥状況の変化に対応して、適正な維持管理を行うことができるが、経験不足の操作員では対応に苦慮することも考えられる。このような場合、本実験で試みたリモートデータリンクによる運転支援は、極めて価値の高い維持管理法の一つである。また、経験豊富な操作員にとっても、知識の確認ができる点で有用である。さらに大規模な処理施設では、施設内の巡回で観察した結果や現場での簡易測定の内容を現場から中央監視室にアクセスし、維持管理の効率化をはかることも重要である。昨今の情勢を考慮し、処理施設間の広域的なネットワーク化は進展するが、それと同時に、携帯端末によるリモートデータリンクを維持管理に活用することも意義深いことであり、今後の普及に期待したい。

4 まとめ

本研究では、著者らが構築した活性汚泥法ファジィ制御システムを集合住宅の汚水処理施設に適用し、流入変動に対する制御効果を実規模で検討した。その結果、流入水のパルス変動と日間変動パターンを与えても、処理水CODはほぼ一定の値を維持していたので、本システムは流入変動に対応できる有効な制御法であることを検証できた。また、操作変量からみてもファジィ制御が流入変動に有効であることが示唆された。さらに、リモートデータリンクによる活性汚泥法の運転支援も試みたところ、携帯電話を通して、有用な情報を制御に活用できたので、今後の発展が期待される。

参考文献

- 1) Zadeh, L.A.: Fuzzy Sets, Inform. Control, 8, 338-353(1965)
- 2) Mamdani, E.H.: Application of Fuzzy Algorithms for Control of a Simple Dynamic Plant, Proc.IEEE, 121(12), 1584-1588(1974)
- 3) 岩堀恵祐、小田原健治、辰巳安良、山川公一郎、藤田正憲: 活性汚泥法ファジィ制御のシステム構成、環境システム計測制御学会誌、1(3)、9-17 (1997)
- 4) 岩堀恵祐、安井幹人、藤田正憲、山川公一郎、小田原健治: ファジィ推論を活用した活性汚泥法制御システムの開発、日本水処理生物学会誌、別巻15号、52(1995)
- 5) 岩堀恵祐、山川公一郎、藤田正憲: ファジィ機能診断システムによる活性汚泥法の運転支援、環境システム計測制御学会誌、3(2)、75-79(1998)
- 6) Iwahori, K., Yamakawa, K., Fujita M.: Effect of Fuzzy Control on Influent Variations in a Pilot-Scale Activated Sludge Process. The 7th International Conference on Computer Applications in Biotechnology, 541-546, May 31-June 4(1998)
- 7) 岩堀恵祐、藤田正憲、小田原健治、山川公一郎: 活性汚泥法制御へのファジィ推論の活用に関する研究、第31回下水道研究発表会講演集、310-312(1994)
- 8) 下水試験方法-1984年版-、日本下水道協会、東京(1984)

(受付 2000. 2. 4)

(受理 2000. 2. 28)