

(19) 高負荷単一槽硝化脱窒法へのファジィ制御の適用

An application of fuzzy control for a single basin,
high-load nitrification-denitrification reactor.

青井 透*・岡庭 良安*・萩原 薫*・元村 勝公*

Toru AOI*, Yoshiyasu OKANIWA*, Kaoru HAGIWARA*, Katsunori MOTOMURA*

ABSTRACT; The single basin and high-load biological denitrification system with alternative aeration is an excellent system which consists of simple components and performs flexible operation. Usually indirect parameters such as DO, ORP and pH etc. have been used to control denitrification reactors. The authors tried to monitor $\text{NH}_4\text{-N}$ in a reactor by using newly developed automated analyzer combined with UF sampler, and then tried to control the operation of a denitrification reactor by using fuzzy inference. The fuzzy control system infers a suitable condition from multi-variables ($\text{NH}_4\text{-N}$, DO, ORP and pH) obtained in an actual process. The fuzzy control system performed quick response and high nitrogen removal with stability and easy maintenance.

KEYWORDS; ammonia, fuzzy inference, biological denitrification, control, human excreta

1. はじめに

し尿処理における生物脱窒素処理技術は、近年著しい進展が見られる。循環脱窒素法（標準脱窒素法）の導入により安定した脱窒素処理が可能となり、また高負荷処理の普及により、殆ど希釈水を用いずコンパクトな設備で脱窒素処理が可能となった。また現在は高負荷膜分離法が実用化され、より衛生的に確実な処理ができるようになってきた¹⁾。

標準脱窒素法では循環脱窒を行うため、反応槽は脱窒・硝化・二次脱窒・再曝気の4槽で構成されるが、現在普及している高負荷脱窒素処理では、単一反応槽を用いし尿を間欠的に投入し曝気も間欠又は段階的に変化させる方法（1サイクル3-4時間）²⁾が一般的である。反応槽の制御指標には、DO、pHまたはORP等のいずれか一つの指標を用い、その指標の1サイクルのパターン変化をとらえてフィードバックする自動制御が多く用いられている。

し尿処理においては最近浄化槽汚泥の混入率が増加の傾向にあるが、浄化槽汚泥には油分(n-Hex抽出物)が過大なケースや、搬入量や濃度の変動が著しいという特徴があり、また生し尿自体も全般的に濃度が低下しBOD/N比も低下する傾向【厚生省・し尿処理施設構造指針によれば、除渣後し尿のBOD/N比は2.67程度であるが実際には2以下のケースが増加している】にあり、高負荷化に伴う反応槽滞留時間の低下と相まって生物反応槽の制御にはより高い安定性と柔軟性が要求される。

単一槽硝化脱窒素法は非常にシンプルな構造で高い窒素除去率を発揮する優れた処理法である。この単一槽硝化脱窒槽の基本的考え方は、循環脱窒法において水塊が受ける環境変化を一槽で時間的に再現するものであるが、硝化・脱窒各槽の水槽容量が固定されていないので、タイマーの設定等運転条件の変更により、幅のある環境を作ることができ柔軟性に富んでいる。反面、単一槽のため硝化脱窒の各工程は他工程の影響

を受けやすい。特にアルカリ度の問題は顕著であり、投入し尿BOD/N比が低い場合には $\text{NO}_x\text{-N}$ の蓄積によるpHの低下は硝化細菌の活動低下を招き、 $\text{NH}_4\text{-N}$ もまた蓄積する状況となる。そのため単一反応槽では $\text{NO}_x\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ の両方を十分除去する必要がある、槽の構成が単純なだけ制御系の負担が大きくなってくる。

ファジィ制御は、水処理関係では浄水場の塩素注入制御、下水ポンプ場での運転制御等の実施例が報告されており、また発酵関係では清酒の醸造の適用例等が報告されている^{3), 4)}。

小泉らによれば生物処理は非線形モデルであり⁵⁾、無駄時間・時空間局所性・履歴依存性等の特徴があり、モデル化、及びフィードバックが困難という特徴をもっている。そのためPID制御は基本的に適用困難である。一方ファジィ制御は複数指標の入力が許され、熟練技術者の運転に近づくことが可能であるといわれており、単一槽硝化脱窒素法のような複数反応が同時進行する系の制御に適用できる可能性がある。

生物反応槽の管理は、熟練オペレータの感や経験（活性汚泥の色・泡立ち・臭い等）に依存するところが多い。ファジィ制御は人間の認識・判断などの曖昧さを含む情報の処理ができるため、この制御法が適用できれば単一反応槽で連続投入・短サイクル間欠曝気運転により安定した脱窒素処理ができると思われる。

演者らは高負荷膜分離実証プラント(10kℓ/日)を用いて、改良型自動アンモニア計⁶⁾とUF膜サンプリング装置により、反応槽中の $\text{NH}_4\text{-N}$ をリアルタイムに計測し指標化を可能にする^{7) 8)}とともに、pH、ORP、DO等の複数指標と組合せて使用し、ファジィ推論により反応槽を制御する（連続投入短サイクル間欠曝気）ことを試みた。本実証プラントにおいても生し尿の低濃度化が進んでおり、負荷が不足する場合には酢酸アンモニウムを添加して負荷を上昇させた。

2. 実験装置及び方法

2.1 $\text{NH}_4\text{-N}$ のモニタリング

反応槽（硝化脱窒素槽）の $\text{NH}_4\text{-N}$ 直接モニタリングシステム⁷⁾はチューブラUF膜とポンプを組合せたUF膜ユニットと、改良型 $\text{NH}_4\text{-N}$ 自動分析計（紀本電子工業VS-2920型）で構成される。測定は30分に1回行われ、測定値は30分間ホールドされる。

2.2 硝化脱窒反応の各指標⁹⁾

硝化脱窒に使用される指標には、DO、ORP、pH、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 等があるが、従来反応槽の制御にはこの内から1指標のみが使われるのが通例であった。 $\text{NH}_4\text{-N}$ を除く各指標は硝化・脱窒素に関しては間接指標であり、各々が曖昧さを含んだ指標である。各々の指標の特性を以下に示す。

DO：脱窒素側環境が把握できない、測定場所により測定値が異なる。

ORP：硝化・脱窒素両環境を表示できるが還元物質やpHの影響を受ける。

pH：おおまかな環境は把握できるが、定量化は困難。

また $\text{NH}_4\text{-N}$ は絶対指標だが測定装置が高価である等、一長一短があるが、ファジィ制御は複数指標の入力が可能なため、 $\text{NH}_4\text{-N}$ を含む4入力及び $\text{NH}_4\text{-N}$ を含まない3入力で実験を行った。

2.3 実験装置

本実験は当社高負荷膜実証プラント（神奈川県寒川町）で行った。フローシートをFig-1に示し、また実験装置の概要をTABLE-1に示す。投入量は8-12kℓ/日で連続的に供給される。反応槽容量は38m³で水中軸流エアレータにより曝気攪拌が行われる。硝化工程にはインバータ駆動ブローから空気が水中エアレータ下部に送り込まれ、気液混合液となってドラフトチューブ下部に送られる。酸素溶解効

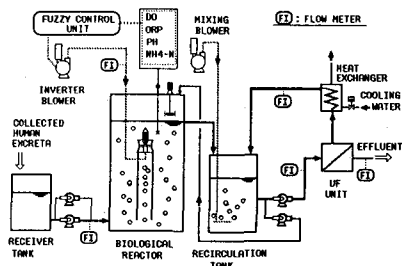


Fig-1 Flow diagram of the pilot plant

率は50%以上である。脱窒素工程にはブロー送気が停止し攪拌のみが行われる。硝化・脱窒工程の1サイクルは30分であり硝化・脱窒時間の区分は状況に応じてマニュアルで設定した。Fig-1に示す箇所に各計測計器が設置され、これらの信号がファジィコントローラへ取り込まれる。膜循環槽は攪拌ブローで攪拌される。

供給し尿水質をTABLE-2に示す。3月は負荷を増加するため酢酸アンモニウムを添加している。BOD/N比は2以下でありC/N比は低い。

TABLE-1 Experimental apparatus

貯留槽	Receiver tank	V=20m ³ , PE
反応槽	Biological reactor	V=38m ³ , 2.2mφ×10m ^{WD} , SS
膜循環槽	Recirculation tank	V=8m ³ , WD MAX4m, mixing with air, SS
反応槽	Submerged	Submerged axial flow aerator (down flow with draft tube)
曝気装置	aerator	Q=30m ³ /min×2mAq×15kw
曝気ブロー	Aeration blower	roots type blower with inverter-motor
UF膜	UF unit	Q=0.3-3m ³ /分×5mAq×3.7kw

TABLE-2 Composition of substrate (screened collected human excreta)

	pH	TS (mg/l)	BOD (←)	TKN (←)	NH ₄ -N (←)	CQ (←)	TKN load in the reactor when feed ratio=10kQ/d
Jan 1991	7.9 (20;0.32)	12,900 (12;2,300)	3,600 (2;430)	2,200 (11;370)	1,700 (20;340)	1580 (11;370)	⇐ 0.579kgN/m ³ /D
Mar 1991	8.2 (22;0.4)	15,500 (18;2,700)	4,700 (12;1,860)	2,960 (22;510)	2,300 (22;430)	1,740 (13;280)	⇐ 0.779kgN/m ³ /D

** (n;σ)

2.4 ファジィ制御の特質

小泉ら⁵⁾によれば、ファジィ制御は多入力・多出力が可能であり、非線形だが再現性のある現象に適している。生物処理は無駄時間が有り複合反応がocこり非線形だが、再現性があるためファジィ制御に適しているモデルの1つであると考えられる。複数の入力を取り込みメンバーシップ関数により各入力の重みづけをして出力するため、いわば妥協の論理でありルールの積み重ねにより熟練者の判断に近づいた出力を出すことができるといわれている。またルールが数式でなくif x=small and y=big then z=medium 【x, yは制御に関する情報(プロセス変数)、zは出力(操作変数)】といったルールで表すため現象の記述が容易である点も特長である。

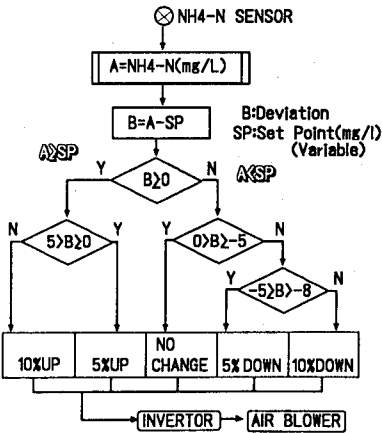


Fig-2 An example of sequential control program using ammonium analyzer

2.5 ファジィ制御の基本フローと構成

当初アンモニア計測定値を用いてFig-2に示すようなシーケンス制御を試みたが、自動アンモニア計は間欠で採水し測定時間が若干(10-15min)かかるために時間遅れによりFig-14上部の図に示すような変動(ハンダ)をおこしうまく制御できなかった。

ファジィ制御の基本フローをFig-3に示す。構成は汎用MS-DOSパソコン(PC9801VX+ハードディスク+数値演算プロセッサ)とシーケンサ(オムロンC200H)を用いる簡潔な構成である。

入力としてはDO、ORP、pH、NH₄-N(使用しないケースもあり)の4指標、出力は曝気ブロー風量としたが、加えて曝気時間等も制御可能である。

ファジィ制御ソフトウェアにはオシーエンジニアリングのORPXシステム¹⁰⁾を使用した。本システムはMS-DOS環境下で使用され、DDC(Direct Digital Control)のプラットフォームの上にファジィコントローラが搭載された構造となっている。出力値である風量と実風量測定値のインバート特性に起因する偏差はDDC上のPID制御で修正される。

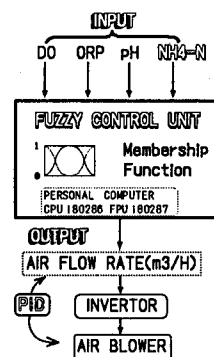


Fig-3 Basic flow of the fuzzy control system

2.6 ファジィルールの構築

この部分はオペレータの経験とソフトウェア技術者によるルール作成の接点であり、良好なマッチングが必要である。

オペレータ側にてFig-4に示すように、4指標中各2指標の関係チャートを作成した。Gは望ましい環境を示し、Nはありえない環境を示す。例えばFig-4の左上のチャートはORPとpHの関係を示しているが、pHが下がる場合にはORPが上昇(pHが1低下するとORPは59mV上昇する)するが、pHが下がってORPも下がるケースはありえないのでNで表示している。各L、Hの数値は実際におこりうる上限と下限の値(メンバーシップ関数の幅)を入れている。Fig-5にはファジィルール作成法の一例を示している。例えばpHが低く、ORPが高い場合には硝化過剰、又は低負荷が原因として考えられるので、出力としては負荷を増大させるか、空気を低下させる必要がある。

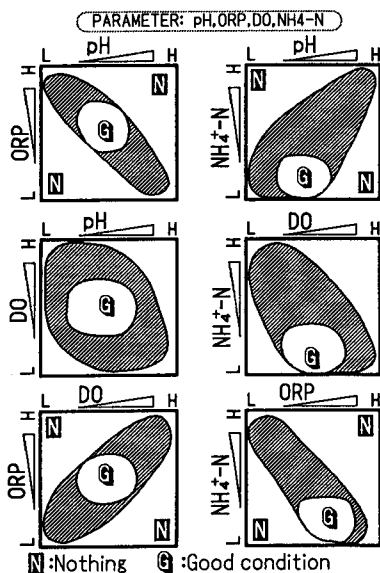


Fig-4 Relationship of each 2 parameter

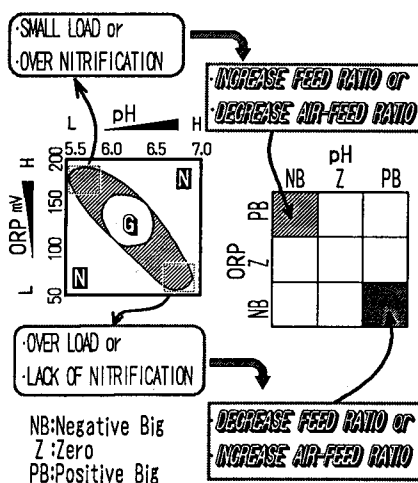


Fig-5 An example of making fuzzy rule

芹沢によれば¹¹⁾、ファジィ制御は『制御の対象となるプロセスの状態量空間においていくつかの代表点を選択し、この点における操作量を与えることによりこの代表点周辺での操作量をも内挿的に決定するもの』とされている。Fig-5の左図を9つに区分し代表点を選択すると右図の斜線部となる。右下の枠の場合には $pH=PB$, $ORP=NB$ であるが、この点の操作量は空気量の増加であるので空気量 (Blowd) = PB となる。このようにしてファジィルールが組み立てられる。その例をFig-6に示す。Fig-6のルールのなかでBLOWdは出力の空気量の増減を示している (Zは増減無し、PBは大きく増加、PBは少し増加を示す【NBは少し減少を示す】) が、この増減の各指標ごとの重みづけをFig-7のMANIPULATORのところでやっている。Fig-7にコントロールプログラムの一部を示すが、この場合にはORPではPBの値は2 m³の幅で増加、DOではPBで5 m³の幅で増加させているのでDOのほうが重いことになる。このようにして操作量 (この場合はブロー風量) は、各指標毎にファジィ推論されるが、出力としては重心法ではなく簡素化した平均化重み付け法を使用している。本システムではメンバーシップ関数は吊鐘型パターンを使用しており、Fig-6のINDIRECT VARIABLEがメンバーシップ関数であるがこの場合にはメンバーシップ関数に実測値 (移動平均値) と設定値 (マニュアルで入力する) の偏差をとっている。

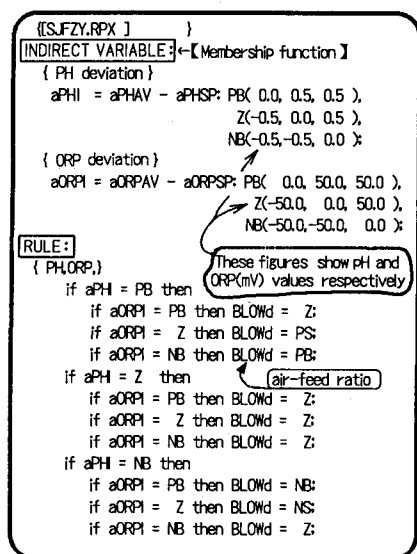


Fig-6 A part of fuzzy rule statement

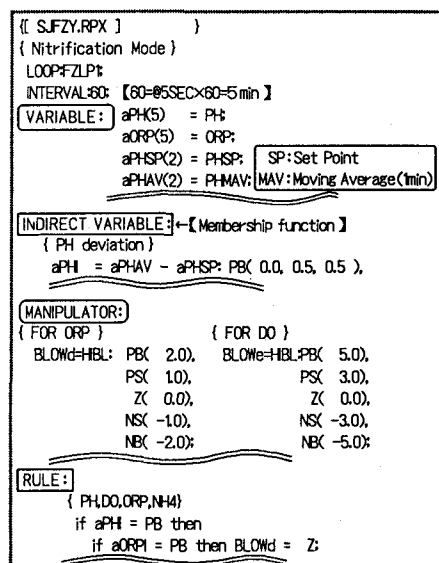


Fig-7 A part of fuzzy control program

3. 実験結果の考察

3.1 運転状況のモニタリング

自動アンモニア計の使用により今まで監視が困難であった反応槽中アンモニアが常時把握できるようになった。Fig-8に各指標の変化の1例を示す。この例では1サイクル30分で硝化・脱窒工程はそれぞれ20分・10分であった。曝気風量は5分毎にファジィ制御で修正される。右側の矢印はファジィ制御における各指標の設定値 (マニュアルで入力した値・NH₄-N 2.5mg/l, pH 6.5, ORP 100mV, DO 1.0mg/l) であり、上下の数字はメンバーシップ関数の上・下限を示す。これらの設定値は運転中でも簡単に変更できる。ファジィ制御の場合には、この上・下限の幅を大きくとり傾向をみる (絶対値で判断ではなく統計的に重さで判断する) ためにセンサーの管理は比較的ラフにできる点、管理する側では楽である。

3.2 ショックロードの追従性

Fig-8 ではし尿供給量を0.5 m³/hから2時間2.4倍の1.2 m³/hに上げたショックロード時の対応を示してい

る。供給量増加に伴いpHが上昇、ORPは低下、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の上昇、DOの低下がおき、これに対応して風量が速やかに増加した。2時間後供給量を元に戻すとともに $\text{NH}_4\text{-N}$ は低下し、風量も低下してショック前に復帰している。この場合には $\text{NH}_4\text{-N}$ を含めた4入力でファジィ制御を行っているが、供給量増加と共にpHを除いた3入力が風量増加の判断を出しているの
で速やかに対応できたことになる。

3.3 $\text{NH}_4\text{-N}$ を含まないファジィ制御による $\text{NH}_4\text{-N}$ の残留

Fig-9は設計最大値(0.05kgN/kgSS/日)の運転における各成分の変化を示したものである。pHが5.6以下(1サイクル中で0.3程度変化)になると $\text{NH}_4\text{-N}$ の上昇が始まり16時間後には70mg/Lまで増加した。Fig-9の運転モードは $\text{NH}_4\text{-N}$ を抜いたファジィ制御(DO、ORP、pH・設定値は夫々2.0mg/L、150mV、6.5)であり、BOD/N比が低いために $\text{NO}_x\text{-N}$ の蓄積(≒70mg/L)がおこりpHが低下し、それに伴ってORPが上昇したためORP及びpHは風量を減少させる方向に作用して $\text{NH}_4\text{-N}$ が上昇しているにもかかわらず風量は低下した。

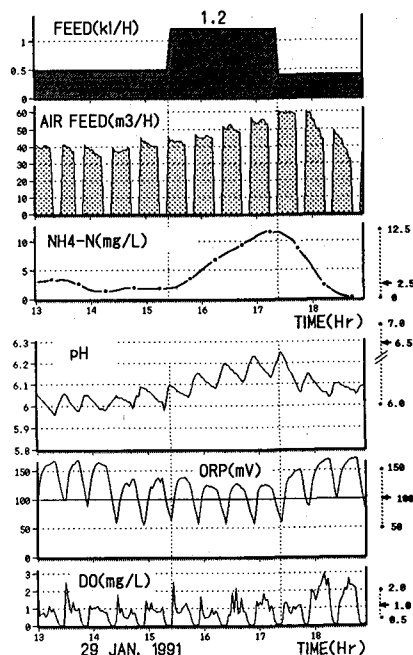


Fig-8 Operational data of fuzzy control in a shock load

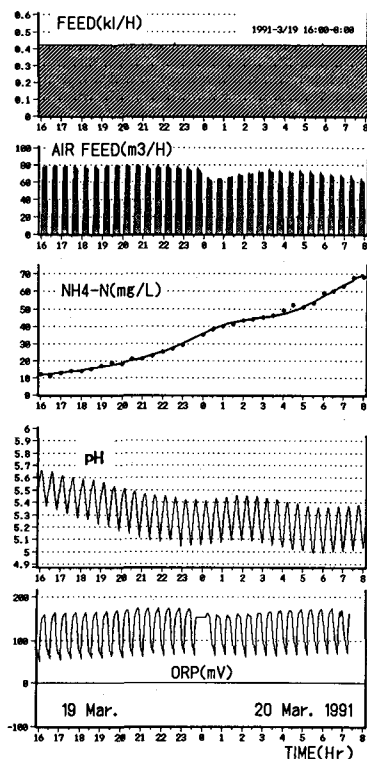


Fig-9 Time-series variation of each parameter under fuzzy control without $\text{NH}_4\text{-N}$

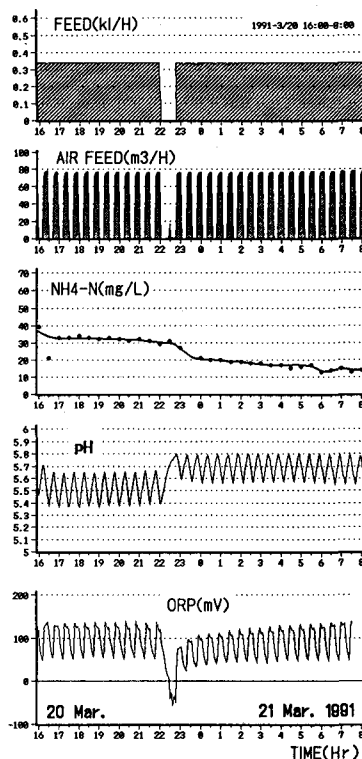


Fig-10 Time-series variation of each parameter under fuzzy control with $\text{NH}_4\text{-N}$

3.4 $\text{NH}_4\text{-N}$ を含めたファジィ制御による $\text{NH}_4\text{-N}$ の低下

Fig-9 で $\text{NH}_4\text{-N}$ が上昇したため運転モードを切り替え $\text{NH}_4\text{-N}$ を含めたファジィ制御(DO、ORP、pHの設定値は変化無し、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 設定値 0mg/l)で運転した。Fig-10に $\text{NH}_4\text{-N}$ を含めたファジィ制御の各成分変化を示す。供給量が0.42kQ/H $\rightarrow$ 0.34kQ/Hに低下しているが、これは投入し尿中窒素濃度が増加(TKN 2500 $\rightarrow$ 3000mg/l, $\text{NH}_4\text{-N}$ 2090 $\rightarrow$ 2430mg/l)しているため窒素負荷は2日共ほぼ同じである(TKN負荷0.64Kg/m³/D, 0.05KgN/kgSS/D)。

Fig-10では22:00~22:45の45分間供給を停止し攪拌のみを行った。嫌気攪拌によって脱窒が促進されpHは0.2上昇した。この場合には嫌気攪拌によるpHの上昇の結果ORPが低下したため風量増加に作用し、また $\text{NH}_4\text{-N}$ も風量増加に作用したため、その後原料の供給を再開したが同一負荷(最大負荷)にもかかわらず $\text{NH}_4\text{-N}$ は低下を続け良好時の状態に回復した。

嫌気攪拌によるpHの回復はマニュアルで操作したが、pHが低下(5.6以下)した場合に数サイクルの間、嫌気攪拌を行うといったルールの追加はファジィ制御では容易であり、ルールを追加することによりこのような状況から切り抜けることが出来る。

3.5 硝化速度に及ぼすpHの影響

山中¹²⁾、中西¹³⁾によれば、Nitrosomonasはアンモニウムイオンの形ではなく、フリーのアモニア(NH_3)を摂取するとされる。



ところで液中での NH_3 の解離はアンモニアのpK値(pK=9.25)よりFig-11¹⁴⁾のパターンとなる。pH5.5付近では $\text{NH}_3 \approx 0$ となるためFig-9に見られる $\text{NH}_4\text{-N}$ の上昇はpHが最も大きく影響していると考えられる。Fig-10でpHの回復(約0.2上昇)と共に $\text{NH}_4\text{-N}$ が速やかに減少することからも、pHの低下により NH_3 の供給速度が律速になっていると推察される。

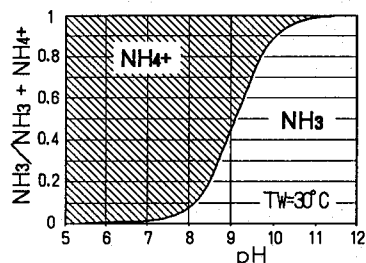


Fig-11 Equilibrium curve of NH_3

3.6 反応槽混合液嫌気性攪拌時の各成分変化

Fig-10の実験の後、反応槽混合液を20Qポリタンクに採取しサンプリング用UFユニットを用いて嫌気性攪拌時の成分変化を分析した結果をFig-12に示す。Fig-12の数値は分析室での測定値($\text{NO}_x\text{-N}$:Technicon Analyzer, $\text{NH}_4\text{-N}$:蒸留滴定法)である。pHは採取時に大気圧になるため脱炭酸によりFig-10に示した反応槽設置pH計測定値より0.5程度高い値を示す。pHは1時間で約0.3上昇した。 $\text{NO}_x\text{-N}$ は採取時は60mg/l以上であり直線的に低下した。脱窒速度は約17mg/l/HrでありMLSSの値から呼吸速度に換算すると4.2mgO₂/grSS/Hrとなり、一般に言われている内生呼吸速度に近い値となった。

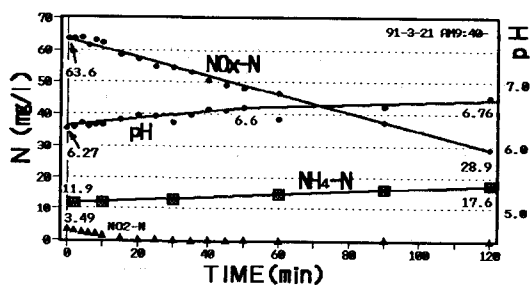


Fig-12 Time-series variation of each parameter under anoxic mixing (batch mode)

$\text{NH}_4\text{-N}$ はタイムラグ無しに上昇を続けた。この現象は汚泥の解体と考えるよりも山中¹²⁾が示しているように硝酸塩呼吸により一部直接 $\text{NH}_4\text{-N}$ まで(例 *Achromobacter*, sp)還元されているものと思われる。

尚汚泥は硝化工程終了時に採取したものである。

3.7 1 サイクル中の各成分の変動

Fig-10の曝気停止前(21:16~)に3-6と同様にサンプリング用のUFユニットを使い1サイクルの変化を2分おきに採取し測定した各成分変化をFig-13に示す。各態N分析値は同様に分析室の分析結果であるが、DO、ORP、pHは反応槽設置計器の値を示す。

$\text{NO}_2\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ はほぼ同じ幅(5-6mg/l)で変動しており脱窒素量の約1/2は $\text{NO}_2\text{-N}$ のまま脱窒されたことになる。

3.8 ファジィ制御の安定性

Fig-14に自動アンモニア計による長期測定パターンを示す。上部チャートはFig-2に示したシーケンシャル制御($\text{NH}_4\text{-N}$)のパターンであり、下部チャートがファジィ制御時のパターンである。ファジィ制御の前半部では間欠曝気のサイクルを1時間としているので $\text{NH}_4\text{-N}$ は2回/サイクル測定されることになり1サイクル中の変動幅を拾うためにギザギザのパターンとなる。30分1サイクルでは反応槽 $\text{NH}_4\text{-N}$ は極めて安定して低い濃度を維持した。全期間を通じて運転負荷はほぼ同等(0.55~0.58kgN/m³/日)である。図中のadjustmentとは調整のため制御しなかった時期を示している。

4. まとめ

高負荷し尿処理にファジィ制御を組み込み硝化脱窒反応槽への適用を試みた。投入し尿は最近の傾向でBOD/N比が2以下であった。最大負荷時における制御の追従と、通常負荷における長期安定性を検討した。その結果以下のことがわかった。

- (1) ファジィ制御は変化への対応が速く、ショックロード(2.4倍)に速やかに追従した。
- (2) ファジィ制御の採用によりpH調整用のアルカリ剤も有機炭素源(MeOH)も使用することなく高い窒素除去率と、安定した運転が可能であった。
- (3) 最大負荷時の運転においては $\text{NH}_4\text{-N}$ を指標に取り込んだファジィ制御は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ を指標に含まないファジィ制御に比べてより安定した結果を示した。
- (4) 反応槽pHが5.6以下になると硝化速度の低下がおこり $\text{NH}_4\text{-N}$ が蓄積した。
この場合には数サイクルの間嫌気性攪拌を行うというファジィルールの追加で対応が可能であった。

尚、本実験でモニタリングに用いた改良型アンモニア自動分析計は紀本電子工業㈱の好意により借用したものを使用した。またファジィ制御に関しては、オーシーエンジニアリング㈱の祝原課長・今井殿に多大に協力を頂いたことを付記する。

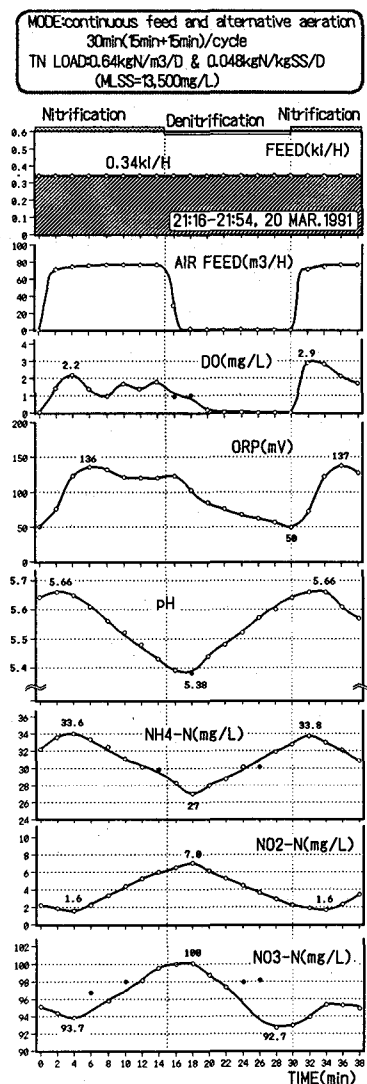


Fig-13 Time-series variation of each parameter through 1 cycle of operation measured every 2 minutes

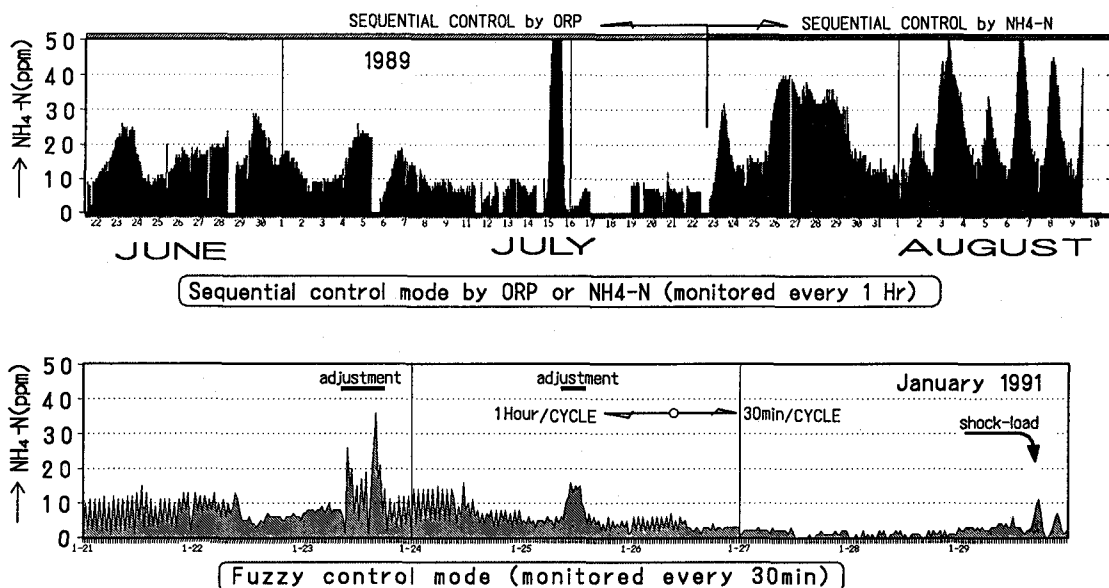


Fig-14 Comparison of NH₄-N values monitored under sequential control mode and fuzzy control mode

参考文献

- 1) Magara, Y. and Itoh, M., (1990): The effect of operational factors on solid/liquid separation by ultra-filtration in a biological denitrification system for collected human excreta treatment plants, Wat. Sci. Tech. Vol. 23, Kyoto, pp1583-1590
- 2) 石田 宏司ほか、(1987): 深層反応槽と限外ろ過膜によるし尿処理, 水処理技術, 28, No. 9, PP27-38
- 3) 原 純ほか、(1990): 清酒もろみ工程に対するファジィ制御, 平成2年度発酵工学会大会講演要旨集, p49
- 4) 大石 薫ほか、(1990): 清酒発酵プロセスのファジィ制御, 平成2年度発酵工学会大会講演要旨集, p50
- 5) 小泉 淳一(1990): バイオプロセスのファジィ制御について, 第6回オリエンタルバイオセミナー講演
- 6) 平田 寛 (1989): 水質自動計測装置の最近の進歩から, PPM, 19, No. 8, pp12-19
- 7) Aoi, T., et al. (1990): Monitoring of ammonia nitrogen in a bioreactor by autoanalyzer pretreated with UF membrane, Water pollution research and control, Kyoto, pp5-8
- 8) 中野 孝二ほか、(1991): 高負荷し尿処理硝化脱窒素槽混合液中のアモニア性窒素直接自動測定について, 第12回全国都市清掃会議研究発表会論文集, pp40-42
- 9) 青井 透ほか、(1991): 高負荷し尿処理にファジィ推論を用いた直接アモニア制御法について, 京都大学環境衛生工学研究会第13回シンポジウム講演論文集, pp204-207
- 10) オーシーエングニアリング(株): 「ORPXシステム機能概要書」
- 11) 岸沢 貴清 (1991): 日本ファジィ学会「ファジィ制御の応用の実際」講演会テキスト, pp42-58
- 12) 山中 健生(1986): 微生物のエネルギー代謝, p64, p153, 学会出版センター
- 13) 中西 弘ほか、(1991): 活性汚泥法における亜硝酸脱窒に関する基礎的研究, 第28回衛生工学研究討論会論文集投稿中
- 14) 加藤 明徳(1991): 住友重機械工業(株)社内資料