HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	高負荷硝化脱窒素法し尿処理におけるファジイ推論を用いた直接窒素制御法の開発
Author(s)	青井, 透
Description	第1回衛生工学シンポジウム（平成5年11月17日（水）-18日（木） 北海道大学学術交流会館） . 8 環境システム制御 . 8-7
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 1, 329-334
Issue Date	1993-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7475
Type	departmental bulletin paper
File Information	1-8-7_p329-334.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

8－7

高負荷硝化脱窒素法し尿処理におけるﾌｧｼﾞｨ推論を用いた直接窒素制御法の開発

The Direct ammoniUm Control System applied Fuzzy Inference to a High-load Biological Denitrification Reactor.

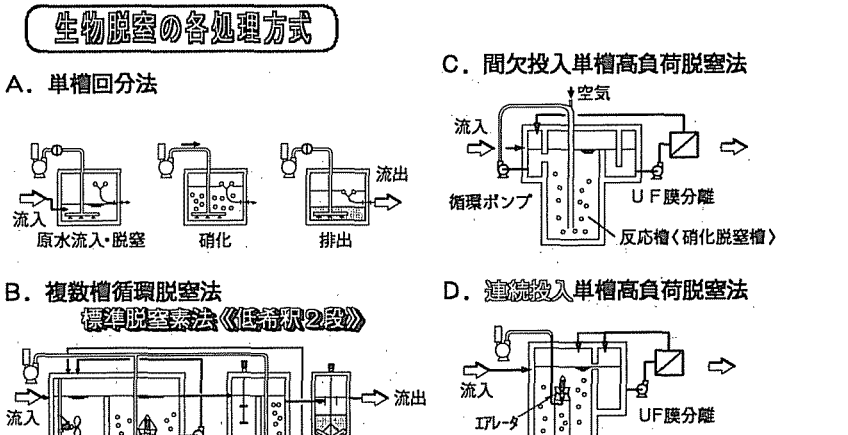
住友重機械工業株式会社　衛生施設プロジェクト部　　青井　透

１．まえがき

し尿処理における生物脱窒素処理技術は、この15年間に著しい発展が見られる。1976年には循環脱窒素法(標準脱窒素法)が稼動開始し、４つの反応槽を用いることにより低い希釈倍率(10倍以下)で安定した窒素除去が可能となった[1)]。続いて登場した高負荷脱窒素処理法は、曝気装置の高効率化により、殆ど希釈することなしに短い滞留時間で脱窒素処理を完了するｼｽﾃﾑであり、希釈水の問題を解決し施設のｺﾝﾊﾟｸﾄ化により処理場を連想させない斬新なｲﾒｰｼﾞ作りに貢献し、急速に普及した。さらに1986年には、高負荷脱窒素処理の固液分離に限外ろ過膜を使用した、高負荷脱窒素膜分離法が稼動開始し、高負荷処理法の弱点といわれた固液分離のあいまいさを解決した。この方法で使用される限外ろ過膜は、大腸菌やｳｨﾙｽを捕捉するﾊﾞﾘｱとして機能するため、処理水の衛生学的安全性が大幅に向上することとなった。以上述べたような連続的な技術革新により、従来のし尿処理場のｲﾒｰｼﾞは一新され、ｽﾏｰﾄな外観のみならず、高度に浄化された無害無色の放流水と完全な臭気対策により、現在の処理場は市民に親しまれ誇りをもって働ける職場を実現している。

ところで、し尿処理におけるこのような技術革新にやや遅れをとっているのは、制御技術である。生物による硝化脱窒素反応は、硝化細菌・脱窒素細菌及び有機物酸化細菌による複合的反応であり、主たる除去対象物質が窒素である(BODは自動的に除去される)にもかかわらず、窒素を直接ﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞすることは従来不可能とされていたので、DO(溶存酸素)・ORP(酸化還元電位)やpH等の間接指標を制御指標に用いざるを得ないのが現状であり、短い反応時間と無希釈の厳しい条件下で安定的に窒素を除去することは中々困難である。その結果、標準脱窒素法の有する高い処理安定性と高負荷脱窒素処理法が持つｺﾝﾊﾟｸﾄさは、ﾄﾚｰﾄﾞｵﾌの関係にあるように見受けられる。

著者らは、生物脱窒素処理の主たる除去対象物質が窒素であることから、原点に立ち返って『**生物脱窒素処理は、窒素そのものを指標として制御するのが最も確実！**』という基本的概念を提案し、反応槽中のｱﾝﾓﾆｱ性窒素を直接ﾘｱﾙﾀｲﾑに計測できるﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞ技術を開発し[2)]さらに熟練者の技術を



各工程運転モード

	流入	硝化脱窒	流出	備考
A.	間欠	間欠	間欠	間欠ｻｲｸﾙ 6-8時間
B.	連続	連続	連続	

各工程運転モード

	流入	硝化脱窒	流出	備考
C.	間欠	間欠	間欠	間欠ｻｲｸﾙ 3時間
D	連続	間欠	連続	間欠ｻｲｸﾙ 30分

図－１　各脱窒素処理方式のフローシートと運転モード

取り込めると云われるﾌｧｼﾞｨ推論を組合わせることにより、標準脱窒素法の安定性を内包したｺﾝﾊﾟｸﾄな高負荷脱窒素処理技術を実現することを目的として、実証ﾌﾟﾗﾝﾄで直接窒素制御法の連続運転を行なった[3)4)]。その結果、簡素なｼｽﾃﾑ構成で非常に良好な結果が得られたので報告する。

図１に、現在生活排水処理に実用化されている各脱窒素処理方式のﾌﾛｰｼｰﾄと運転ﾓｰﾄﾞを示した。前記した標準脱窒素法はBに該当する。Cは高負荷脱窒素処理の一例であり、この処理方式は単一の反応槽を用い、例えば３時間を１サイクルとして時間毎に吹込み空気量を変化させ、環境変化により一槽で硝化反応と脱窒反応を行うシンプルな構成である。Dは本論文で提案している方法であり、短いｻｲｸﾙ（例えば30分）の間欠曝気を行い、NH_4-N測定とﾌｧｼﾞｨ推論を用いた直接窒素制御により吹込み空気量をコントロールする。本法では流入・流出は連続であり、あたかも連続のように振舞う間欠曝気により、流入水質の変化に速やかに追従して安定した窒素除去を達成しようとするものである。

２．実験設備と実験方法

2.1 NH_4-Nのﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞｼｽﾃﾑと分析装置

図２に反応槽NH_4-N直接ﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞｼｽﾃﾑを示した。本モニタリングシステムで使用した導電率検出型自動NH_4-N分析装置の仕様を図３に示した。反応槽混合液(MLSS1.0～1.8%)は、限外ろ過　(UF)膜を用いたｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ装置を通過することにより汚泥(SS)を含まない透過液となり、改良型自動NH_4-N分析計でNH_4-Nが計測される(30分に1回又は1時間に1回)。本分析計はガス膜透過・導電率検出型の革新的な測定装置であり、従来用いられてきたｲｵﾝ電極とは構造を全く異にしており、0～100Nmg/ℓの範囲で直線的に計測され、蒸溜滴定法と同等以上の精度を持つ信頼性の高い分析装置である[2)]。

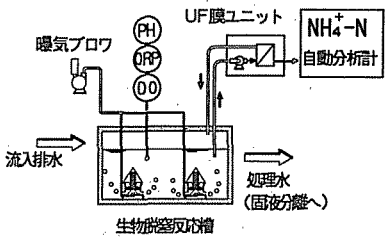
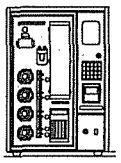


図２　NH_4-N直接ﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞ装置

項目	仕様
計測方法	膜濃縮法及び導電率法
計測範囲	0-10 mg/ℓ N（標準） 0-0.1mg/ℓ to 0-100mg/ℓ N
計測周期	30分または60分
計測精度	±5% of full scale
寸法	W500×D570×H700(mm)
重量	60 (kg)
製造者	紀本電子工業(株)
型式	VS-3920


図３　導電率検出型自動NH_4-N分析計概要

2.2 実験設備

本実験設備のﾌﾛｰｼｰﾄを図４に示す。生物反応槽容量は38m^3であり、日量8～12Kℓのし尿が連続的に投入されている。槽内には軸流下向流水中曝気装置[5)]が設置されており、硝化時間帯には、ｲﾝﾊﾞｰﾀ駆動曝気ﾌﾞﾛﾜから送られた空気は、水中曝気装置とﾄﾞﾗﾌﾄﾁｭｰﾌﾞにより気液混合流となって最深部(10m^D)へ送られ、激しい撹拌と高い分圧を受けて効率良く水中へ酸素を供給する（酸素移動効率は60%以上）。脱窒素時間帯にはｲﾝﾊﾞｰﾀが低速運転となるため、ﾌﾞﾛﾜ送気が停止し撹拌のみが行なわれる。曝気撹拌の1ｻｲｸﾙは30分または1時間とした。反応槽には図３に示す各計測器とNH_4-Nﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞ装置が設置されており、これらの信号がﾊﾟｿｺﾝとｼｰｹﾝｻから構成されるｺﾝﾄﾛｰﾗへ送られ、ﾌｧｼﾞｨ推論の結果吹込空気量がｲﾝﾊﾞｰﾀへ出力される。

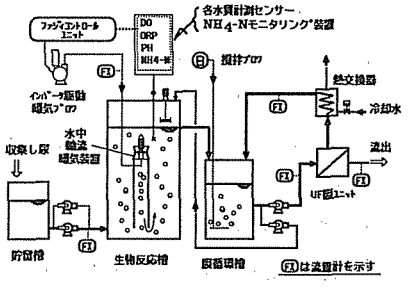


図４　実験設備フローシート

2.3 硝化脱窒反応槽で用いられる制御指標

硝化脱窒素に使用される指標にはDO、ORP、pH及びNH_4-N等があるが、各々の特徴を以下に示す。

ＤＯ　:脱窒素環境が把握できない。場所により測定値が異なる。

ORP　:脱窒素環境も把握できるが還元物質やpHの影響が大きい。
　　例えば、pH1の低下に対しORPは59mV上昇する。
ｐＨ　:大まかな環境は把握できるが定量化が困難。
NH_4-N:絶対指標だが測定装置が現状ではやや高価。従来のｲｵﾝ電極は信頼性が低い。

DO、ORP、pH等は間接指標であり、制御において必要条件ではあるが充分条件ではないという宿命を持っている。NH_4-Nは、本実験で初めて実用化されたものである。

2.4 生物処理の特質

小泉によれば、生物反応(生物処理)は非線形ﾓﾃﾞﾙであり、無駄時間・時空間局所性・履歴依存性等の属性があるために、ﾓﾃﾞﾙ化が困難という特徴をもっている[6]。例えば、清酒の醸造にみられる杜氏のような熟練技能者の経験と勘に頼って運転されているのが通例であり、それゆえ広く用いられているPID制御は生物反応の制御には基本的に適用不能である。『生物処理はﾌﾞﾗｯｸﾎﾞｯｸｽである』としばしば語られるのは、このような所以によるのであろう。

2.5 ﾌｧｼﾞｨ制御の特質と基本ﾌﾛｰｼｰﾄ

ﾌｧｼﾞｨ制御は人間の判断など、曖昧さを含む制御ｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑをif-then形式で表現し、ﾌｧｼﾞｨ推論を用いて計算機に実行させるものであり[7]、生物処理のような非線形で複雑なモデルに適しているとされている。小泉らは清酒の醪（もろみ）醸造にﾌｧｼﾞｨ制御を適用した[8]が、このｹｰｽでは出力は温度のみであった。硝化脱窒素反応においても出力は空気量のみであるが、実際にはｵﾍﾟﾚｰﾀが各ｾﾝｻをﾁｪｯｸし、さらに活性汚泥の色、臭気、泡立ち等を観察しながら総合的に判断しており、ﾌｧｼﾞｨ制御が最も適している対象であると思われる。

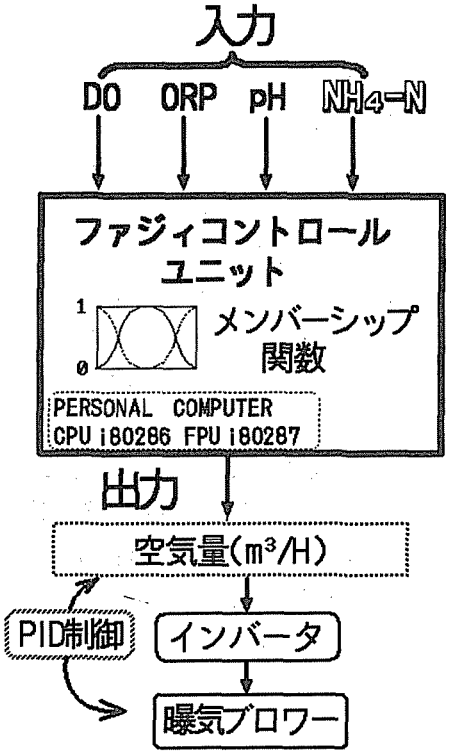


図５　ﾌｧｼﾞｨ制御フローシート

図５にﾌｧｼﾞｨ制御の基本ﾌﾛｰｼｰﾄを示す。ﾊｰﾄﾞｳｪｱとしては、汎用MS-DOSﾊﾟｿｺﾝとｼｰｹﾝｻから構成される簡潔な構成である。ﾌｧｼﾞｨ制御ｿﾌﾄｳｪｱには、ｵｰｼｰｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ(株)のORPXｼｽﾃﾑを使用した。ｵｰｼｰｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞは大阪ｾﾒﾝﾄのｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ部門であり、自社のｾﾒﾝﾄｷﾙﾝ制御にﾌｧｼﾞｨ制御を導入した結果を、纏めて市販ソフトとしたのがORPXｼｽﾃﾑである。出力値である風量と実風量測定値との偏差は、同ｼｽﾃﾑに搭載されたPID制御で修正される。

2.6 ﾌｧｼﾞｨﾙｰﾙの構築

この部分はｵﾍﾟ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、良好なﾏｯﾁﾝｸﾞが必要である。まずｵﾍﾟﾚｰﾀ側で図５の入力4点中各2点の組合わせにおいて、主な現象とその対策についての関係ﾁｬｰﾄを作成した。その一例を図６に示す。図６はpHとORPの関係を示しているが、Gは良好な環境を示しており、Nはあり得ない環境を示している。例えば

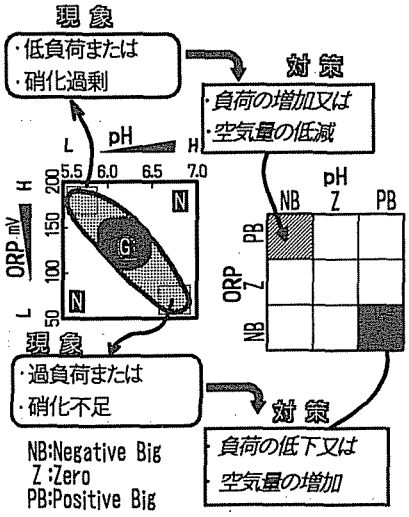


図６　pHとORPの関係と必要とされる対策(ﾙｰﾙ作成の一例)

pHが下がる場合にはORPが上昇するが、pHが下がってもORPが下がるｹｰｽはあり得ないのでNで表示している。各L,Hの数値は実際におこり得る上限・下限の数値(ﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数の幅)を用いている。図６に示した現象と対策をif-then形式で記述していくとﾌｧｼﾞｨﾙｰﾙが構築される。ファジィルールの中には重複するもの、欠けているもの、矛盾するものがあるかも知れないが、全体としての出力値は協調がとれてうまくいくというのがﾌｧｼﾞｨ制御の狙いである。

３．結果と考察

3.1 NH_4-Nの直接ﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞ

6ヵ月以上の長期間にわたって、NH_4-N直接ﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞ装置は連続運転を行ったが、薬品類や記録用紙の補充以外には殆ど手を掛けることなく順調に測定を継続した。一般に水質自動測定装置のﾎﾞﾄﾙﾈｯｸになる試料採取部にUF膜ｻﾝﾌﾟﾗを使用したことと、恒温室を内蔵し導電率の検出には独自の研磨電極を用いている本自動NH_4-N計の優れた装置構成が有効に機能した結果である。

本ﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞの測定結果から、反応槽内のNH_4-Nは激しく変動していること、1日に1回の手分析による測定は必ずしも代表値にはならないことなどが明確となった。

3.2 ﾌｧｼﾞｨ制御における処理の安定性

図７は、従来型制御である多位置制御とﾌｧｼﾞｨ制御運転時の反応槽NH_4-N連続ﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞ結果を示している。ORPまたはNH_4-Nを単独で指標に用いた従来型の多位置制御では、精密に制御を行おうとした試みは、安定性の壁にぶつかってしまった(図７上段)。他方、NH_4-Nを指標に含む複数入力のファジィ制御は、運転開始から殆ど問題につまずかないまま滑り出し、極めて安定したNH_4-N除去性能を示し(図７下段)、ﾌｧｼﾞｨ制御がｵﾍﾟﾚｰﾀの意図に忠実に安定した性能を発揮することを示した。

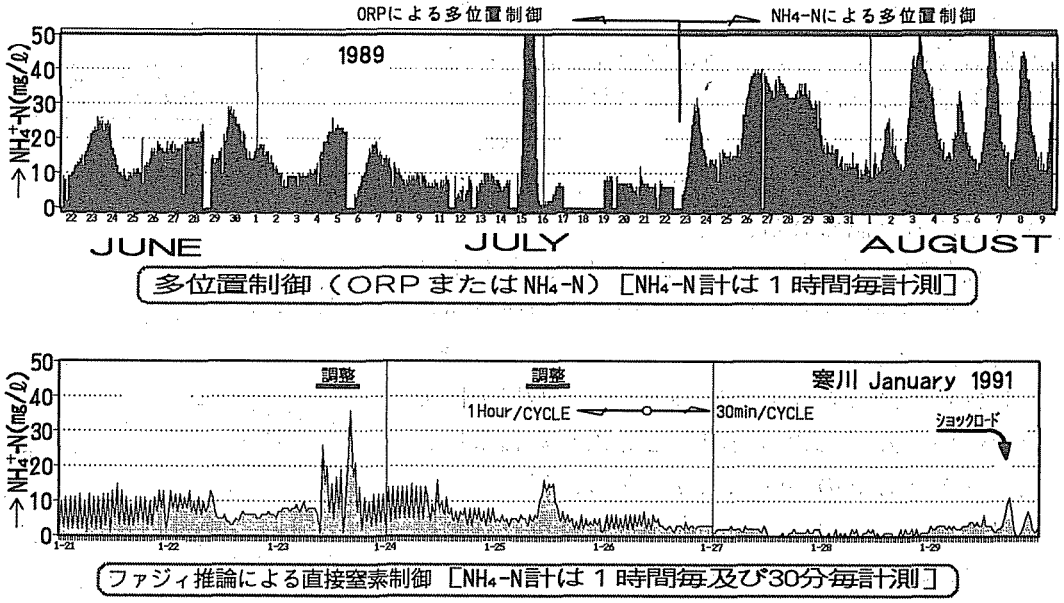


図７　反応槽NH_4-Nの連続モニタリング結果の一例

3.3 ｼｮｯｸﾛｰﾄﾞへの追従性

図８にﾌｧｼﾞｨ制御でｼｮｯｸﾛｰﾄﾞ試験を行なった場合の各指標の経時変化を示した。し尿供給量を2時間の間2.4倍に増加させたが、供給量の増加に伴いpHの上昇、ORPの低下、NH_4-Nの上昇及びDOの低下が観察され、それぞれの指標で風量増加の判断が出されたため、速やかに供給空気

量が増加し、NH_4-Nの上昇を最小限に抑えている。またｼｮｯｸﾛｰﾄﾞ終了に伴い、各指標値が回復したため、供給空気量も急激に減少し、過剰な空気供給を防いでいる。このように、ﾌｧｼﾞｨ制御では、各指標の判断が出力に反映する（多数決の原理？）ため、変動に対して迅速に追従することがわかる。図８の右側の数字は各指標の設定値（←）と制御幅上下限値を示している。ﾌｧｼﾞｨ制御の場合には、ﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数を用いるため、各指標の制御幅を広くとれるためにｾﾝｻｰの若干の誤差に対して鈍感であり、ｾﾝｻｰ管理に他の制御法ほどの厳密さを要求されないため、ｵﾍﾟﾚｰﾀの精神的負担が大幅に軽減されることも大きな利点である。

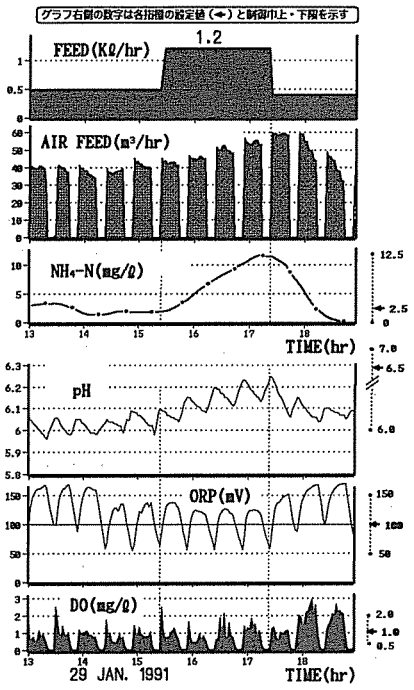


図８ ｼｮｯｸﾛｰﾄﾞ時の各指標経時変化

４．むすび

高負荷し尿処理生物脱窒素反応槽の制御に、ﾌｧｼﾞｨ推論を用いた直接窒素制御法を組込み、処理の長期安定性と最大負荷時における制御の追従について検討した結果、以下のことがわかった。

(1)ﾌｧｼﾞｨ推論を用いた本制御法は、常に必要空気量を吹込むことができるため、NH_4-N濃度を定常的に低く保つことができる。

(2)同制御法は変化への対応が速いため、急激なｼｮｯｸﾛｰﾄﾞ(2.4倍)に速やかに追従した。

(3)同制御法は各指標の制御幅を広く設定しているために、ｾﾝｻｰ感度の低下に対して鈍感であり(頻繁なｾﾝｻ校正を特に必要としない)、１つの指標が誤動作を起こしても他の指標がカバーするように働くことと相まって、実際の運転に際してはｵﾍﾟﾚｰﾀは非常に楽に運転できる。

ﾌｧｼﾞｨ推論を用いた直接窒素制御法(ﾌｧｼﾞｨDUCｼｽﾃﾑ)により、生物反応槽内のNH_4-Nを処理水ﾚﾍﾞﾙに常に保つことができ、若干残留する酸化態窒素(NO_x-N)は、仕上げ反応槽及び固液分離槽で脱窒素により除去されるため、極めて簡素な水槽の構成及び単純な制御ｼｽﾃﾑで安定した窒素除去が可能となり、今後予想される浄化槽汚泥混入率の増加に起因する負荷変動の増大に対しても、充分な対応が可能である。

参考文献

(1)日本環境衛生工業会編、"廃棄物処理技術変遷史(水処理編)、日環工３０年の歩み"、1992、p29～53

(2)青井 透、萩原 薫、山崎真彦、三浦 明、平田 寛、"生物脱窒反応槽中のNH_4-N及びNO_x-Nの直接測定法について"、日本機械学会環境工学総合ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ'92講演論文集、1992,p278～281

(3)青井 透、岡庭良安、萩原 薫、元村勝公、"高負荷単一槽硝化脱窒法へのﾌｧｼﾞｨ制御の適用"、土木学会衛生工学研究論文集、Vol.28,1992,p171～179

(4)T.Aoi,Y.Okaniwa,K.Hagiwara,K.Motomura,I.Iwaihara,M.Imai and Y.Serizawa,"A direct ammonium control system using fuzzy inference in a high-load biological denitrification process treating collected human excreta",Water Science and Technology,Vol.26,No.5～6,1992,p1325～1334

(5)青井 透、岡庭良安、野池達也、"深層式曝気槽における下向流水中軸流曝気装置の酸素移動特性の検討"、下水道協会誌論文集,Vol.30,No.357,1993,p30～40

(6)小泉淳一、"技を持ちﾌｧｼﾞｨﾈｽを扱えるｴｷｽﾊﾟｰﾄｼｽﾃﾑの醸造への応用"、日本醸造協会会誌、Vol.86,No.1,1991,p8～12

(7)菅野道夫、"ﾌｧｼﾞｨ制御"、日刊工業新聞社、1988,