

氏 名	青 井 透
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )
学位授与年月日	平成 5 年 9 月 8 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 48 年 3 月 北海道大学大学院工学研究科衛生工学 専攻修士課程修了
学 位 論 文 題 目	高負荷硝化脱窒素法におけるファジィ推論を用いた 直接窒素制御法に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 野池 達也      東北大学教授 箱守京次郎 東北大学教授 須藤 隆一      東北大学教授 澤本 正樹

## 論 文 内 容 要 旨

わが国において、この 15 年間におけるし尿処理分野での生物脱窒素法の技術革新には目を見張るものがある。昭和 50 年より稼働を開始した標準脱窒素法（通称低希釈に二段活性汚泥法または循環脱窒素法）は、投入し尿の量に対して約 20 倍の反応槽容量を有し、従来よりも低い希釈倍率（10 倍）で安定した脱窒素処理が可能となった。続いて登場してきた高負荷脱窒素処理は、し尿を希釈することなしに短い滞留時間の高負荷高深度反応槽（容量は投入し尿量に対して約 5 倍程度）で脱窒素処理することを可能とし、施設のコンパクト化による処理場らしくないイメージ作りに貢献するとともに希釈水の問題を解決したが、処理の安定性の面では、標準脱窒素処理法に遅れをとっているのが現状である。

し尿処理分野ではこれらの生物脱窒素処理法が急速に普及し、水環境の保全に貢献しているわけであるが、標準脱窒素処理法と高負荷脱窒素処理法は、処理の安定性とコンパクト性でトレードオフの関係にある。その原因はこれらの複合的な生物処理に対する制御技術の遅れが原因していると思われる。生物脱窒素処理は非線形モデルである生物処理の一例であり、PID 制御は基本的に適用が困難であり、また制御指標としては、硝化脱窒素処理の主たる目的が窒素の除去であるにもかかわらず、指標としては pH・ORP また DO 等の間接指標が用いられているのが現状であり、分析装置の不備により窒素そのものを指標に用いることは従来不可能とされていた。

ファジィ制御は従来の制御とは発想を全く異にしており、多入力・多出力が可能であり熟練者の

技術を実現できること、理論的な記述で理解しやすいことにより、非線形モデルの代表例である硝化脱窒素のような複合的な生物反応の制御に本質的に適していると考えられる（ファジィ制御の実施例として清酒醸造への適用例が報告されている）。

硝化脱窒素槽の窒素そのものを直接モニタリングでき、窒素を含んだ各指標を取り込んでファジィ制御による多変数入出力、論理的な記述による制御が可能になれば、より高い処理の安定性・高い窒素除去率が、簡単な操作と極く簡素な生物反応槽の構成で可能となる。その結果、高負荷脱窒素処理は標準脱窒素処理が長所とする処理の安定性をも内包することができ、全面的に標準脱窒素処理にとって替わることが可能となる。以上が本研究の動機である。

本研究は、連続投入短サイクル（例えば30分1サイクル）間欠曝気脱窒素法の作動原理を高負荷深層反応槽に新たに応用し、単一反応槽を用いた簡素なプロセスにおいて、上記の全く新しい手法（直接 $\text{NH}_4\text{-N}$ モニタリングとファジィ制御の適用）を用いることにより、コンパクトな整備で高い安定性を達成しようとするものであり、そのためにはハード及びソフトを含めた以下の検討が必要である。

#### (1) 信頼性の高い自動 $\text{NH}_4\text{-N}$ 分析装置の選定と長期耐久試験

現在市販されている隔膜式アンモニアガス電極は信頼性に不安があり実用化は困難であるため、異なったタイプの信頼性の高い自動測定装置を選定するとともに、長期耐久運転が必要である。

#### (2) (1)の自動 $\text{NH}_4\text{-N}$ 分析装置と組み合わせて使用するサンプラの開発

一般に自動分析装置実用化のボトルネックは分析装置サンプリング部分の物理的閉塞であるから、UF膜をサンプラに使用し長期無人運転に耐える自動サンプラを開発し、この自動サンプラと上記した信頼性の高い自動測定装置を組み合わせることにより、直接窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）モニタリングシステムを開発する。

#### (3) 高深度間欠曝気反応槽に適した専用的高効率曝気装置の開発

本研究の対象である高負荷単一槽短サイクル間欠曝気法は、深槽反応槽（水深10m程度）において硝化（曝気）および脱窒素（攪拌）を繰り返すことにより、安定的に窒素を除去するプロセスであり、硝化時には適切な空気量を正確に供給できること、脱窒素時には攪拌のみができることが条件である。低いエネルギー投入密度で攪拌できる条件としては、渦巻型ポンプより軸流ポンプが適しており、水中型ポンプを用いれば配管によるエネルギー損失も最小となるため水中軸流ポンプが好ましい。

容積型ブロウ（ルーツブロウ等）の可変速運転（インバータモータ）は制御巾が15Hz～60Hzと広く回転数と送気量が直接関係にあるために、吹込空気量を正確に制御する方法として適している。

以上の点から、下向流水中軸流ポンプとインバータモータ駆動ルーツブロウの組み合わせによる専用曝気攪拌装置を新規に開発する必要が生じた。

#### (4) 安価で実用性の高いファジィ制御システムの開発

近年コンピュータ分野では、ダウンサイジングと高性能化・低下格化による変化が生物処理

技術の進展とは桁外れの速度で進行中であり、安価なパーソナルコンピュータでも十分な速度と記憶容量が実現し、ソフトウェアの豊富さと相まってメインフレームやワークステーションよりも数段使い易い環境が実現している。ファジィ制御ソフト自体がパソコン用として単独で販売されている（丁度 CAD システムと同様）状況であるから、このような汎用性のあるソフトウェアとハードウェアを用いて生物処理のファジィ制御システムが実用化できれば、その普及は必然性を帯びてくると想定され、上記した目的に実現に貢献できる。

以上述べた検討項目を基本として本研究を進めることとした。上記(1)、(2)項については3章で検討し、長期モニタリングを実施した。(3)項については4章で曝気装置実機を製作して開発テストを行ない、(4)項で検討するファジィ制御システムと(1)～(3)項の成果を総合して、5章でファジィ推論を用いた直接窒素制御法の実証プラントスケールの研究開発を行った。その結果を以下に概説する。

まず初めに、反応槽中  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度をモニタリングするために、UF 膜サンブラと改良型アンモニア自動分析計（ガス膜分離+導電率検出法）を組合せて用いるモニタリングシステムを開発し、長期運転により実用化に耐えることを確認した。本研究で使用した改良型アンモニア自動分析計は、従来使用されてきた隔膜式アンモニアガス電極とは基本的な考え方を全く異にしており、手分析による蒸留滴定法と同等以上の測定精度と、長期運転の信頼性をもっている。別途開発した UF 膜サンブラと組み合わせて使用することにより、高い汚泥濃度の各種曝気槽中の  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度を汎用的にモニタリングすることが可能である。

次に短サイクル間欠曝気運転に適した高深度反応槽専用流水中軸流曝気装置を開発し、酸素移動性能を清水時・実液時に夫々測定した。従来の知見と異なり酸素移動効率は、清水時に比べ実液時に大幅に上昇したので、気泡の滞留時間及び平均気泡径の影響を検討し、液性状に起因する平均気泡径の減少が気液接触面積の飛躍的な増大を招き、その結果、酸素移動効率が増大することを明らかにした。この水中軸流曝気装置をインバータモータ駆動の低圧ルーツブロワと組み合わせることにより、ブロワを定量フィードのように作動させ、必要な空気量を正確に供給することが可能である。

さらに、熟練したオペレータの運転技術に近づくことができるといわれているファジィ制御を、広く普及している汎用パソコン上で作動させ、ファジィルールを作成して、 $\text{NH}_4\text{-N}$  を含め DO, ORP, pH の複数指標を取り込み、上記の水中軸流曝気装置を用いた高深度短サイクル間欠曝気反応槽において、吹込空気量をファジィ推論により制御し、長時間の負荷運転を行ない、多位置制御との実証プラントにおける比較運転を行なった。

その結果は極めて良好であり、ファジィ制御の運転は多位置制御の運転時に比べ極めて安定した結果を示し、また高い  $\text{NH}_4\text{-N}$  除去率を発揮した。

ファジィ制御は  $\text{NH}_4\text{-N}$  を含んだ4指標入力 ( $\text{NH}_4\text{-N}$ , DO, ORP, pH) と、 $\text{NH}_4\text{-N}$  を含まない3指標入力での運転の比較を行なった。通常負荷運転時には  $\text{NH}_4\text{-N}$  を含んだファジィ制御と  $\text{NH}_4\text{-N}$  を含まないファジィ制御に大きな差は見られず、両者とも安定した運転を示したが、最大負荷運転時には  $\text{NH}_4\text{-N}$  を含まないファジィ制御では  $\text{NH}_4\text{-N}$  が上昇したにもかかわらず、 $\text{NH}_4\text{-N}$  を含んだファジィ制御では安定した  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度を維持でき、 $\text{NH}_4\text{-N}$  指標が最大負荷時（又は外乱時）には有効であることを示した。

ファジィ推論を用いた制御法はシステムが柔軟であり、ルールの追加で色々な対応が可能なことを確認できた。本実験はファジィ制御の基本ルールのみで運転しているので、ファジィルールの改良、多出入化（返送汚泥量、曝気時間の制御等）については今後の課題として、実運転で個別対応して検討してゆきたい。

本研究で対象とした単一槽短サイクル間欠曝気硝化脱窒素法は、内部的には複合した反応が同時進行している非線形モデルであり、伝統的手法（例えば ORP を指標とした多位置制御）では、検討を重ねれば重ねるほど、乖離するモデルのように感じられ、Zadeh が述べている「不適合性の原理」がそっくりあてはまることが知られた。それに対してファジィ推論を用いた制御法は、5章で述べたように運転当初から不思議なほどスムーズにスタートし、殆ど苦勞無しに安定した運転が達成でき、本質的にファジィ制御は本研究のような生物処理に適していること、他方伝統的手法には限界があることを実感した。

## 審査結果の要旨

し尿処理に用いられている高負荷生物脱窒素法は、プロセスの簡易さと装置のコンパクト化に関しては優れた技術であるが、処理の安定性には問題が残されている。本論文は、主な除去対象物質であるアンモニア性窒素を指標とし、熟練者の技術に近づくことができるファジィ制御を用いる新しい手法により、高負荷生物脱窒素法において安定した窒素除去が達成可能であることを明らかにしたもので、全編6章からなる。

第1章は総論である。

第2章では、わが国のし尿処理における生物脱窒素法の技術開発の経緯と種々の生物脱窒素法の特徴について述べ、本研究で取り上げた反応槽の位置づけを明確にした。さらに、ファジィ制御理論および適用事例を示し、生物処理へのファジィ制御理論および適用事例を示し、生物処理へのファジィ制御の導入の適否について考察し、本研究を行う必然性を論じている。

第3章では、従来、困難とされていた生物反応槽混合液中のアンモニア性窒素濃度の測定方法として、UF膜サンブラとガス膜透過導電率法による改良型アンモニア自動分析計を組み合わせ用い、蒸留法と同等以上の測定精度を有し、高い汚泥濃度の各種曝気槽のアンモニア性窒素濃度を汎用的に測定することの可能なモニタリングシステムの開発を行った。

第4章では、単一反応槽で間欠曝気により硝化脱窒素を行う場合の曝気装置について、新方式の水中軸流下向流曝気装置を開発し、実機により静水時および実液時の酸素移動効率試験を行い、実液時に酸素移動効率が增大する原因について気泡の滞留時間および平均気泡径の影響を検討し、液性状に起因する平均径の減少が気泡接触面積を著しく増加させ、その結果、酸素移動効率が增大することを明らかにした。これは重要な知見である。

第5章では、第4章の水中軸流下向流曝気装置を用いた高深度短サイクル間欠曝気反応槽におけるファジィ制御による硝化脱窒素実験とその成果について述べている。すなわち、第3章で開発したアンモニア性窒素モニタリング装置により測定したアンモニア性窒素を始め、DO、ORPおよびpHの複数指標を取り込み、汎用パソコン上に作成したファジィルールにより実証プラントの吹き込み空気量を制御する負荷運転を長期間にわたって行ない、とくに通常の多位置制御との比較運転を通して、ファジィ制御による運転は多位置制御の運転時に比べ、極めて安定した水質と高いアンモニア性窒素除去率が得られることを実証している。これは重要な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、し尿処理における高負荷生物脱窒素法において安定した窒素除去法を行うために、ファジィ制御の導入について検討したもので、環境工学の発展に寄与するところが少ない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。