

| | | | |
|---------|--------------------------------------|---------|-------|
| 氏名 | 張 健 | | |
| 学位の種類 | 博 士 (生物資源工学) | | |
| 学位記番号 | 博 甲 第 8 5 8 2 号 | | |
| 学位授与年月日 | 平成 3 0 年 3 月 2 3 日 | | |
| 学位授与の要件 | 学位規則第 4 条第 1 項該当 | | |
| 審査研究科 | 生命環境科学研究科 | | |
| 学位論文題目 | 溶存酸素自動計測システムを用いる三槽式活性汚泥法の最適化と省エネルギー化 | | |
| 主査 | 筑波大学教授 | 農学博士 | 大井 洋 |
| 副査 | 筑波大学教授 | 博士 (農学) | 北村 豊 |
| 副査 | 筑波大学准教授 | 博士 (農学) | 中川 明子 |
| 副査 | 筑波大学教授 | 博士 (農学) | 張 振亜 |
| 副査 | 筑波大学名誉教授 | 農学博士 | 佐竹 隆頭 |

論 文 の 要 旨

近年、依然として窒素・リン等による水質汚染が悪化し、閉鎖水域の富栄養化が進んでいる。この問題を解決するため、リンと窒素を除去できる高度活性汚泥法が広く利用されている。活性汚泥処理プロセスは、有機物を酸化する微生物の働きに依存している。したがって、曝気は微生物の活性を維持する上で最も重要なパラメータである。しかし、従来の曝気法である連続通気法は、過剰な曝気と運転エネルギーの消費という欠点を有する。曝気動力は排水処理プラントの中で総エネルギー消費の 75% を占めている。そのため、曝気システムの制御はエネルギー節約のために重要であり、同時に、高度な処理能力も確保できる制御がさらに重要になっている。溶存酸素 (DO) 濃度の制御は、曝気システムを制御する上で最も一般的に使用される手段である。1970 年代までに、多くの排水処理プラントがオンライン DO センサーの使用を始めた。しかし、従来の DO 制御方法は人的な操業経験を必要とし、負荷変動に対して迅速に対応することができなかった。近年では、排水処理プラントにおける自動制御装置が研究開発されている。

著者は第一に、三槽式活性汚泥法モデルを取り上げ、溶存酸素自動計測システムにおける DO センサーの位置が処理特性および省電力効果等へ及ぼす影響を解明することを目的とした。

自動制御の研究開発の一例では、数種のオンラインセンサーを用いて、アンモニア窒素 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)・酸化還元電位 (ORP)・pH・DO 濃度屈曲点などの一つ以上の物理化学的制御パラメータに基づき、曝気時間の制御を行う。しかし、複数のセンサーを使用するため、制御負荷および日常的な維持管理量が増大する。これらの問題を回避するために、簡単な制御システムと 1 本の DO センサーを使用して生物反応槽内の温度と DO をリアルタイムでモニタリングし、微生物反応速度関数から必要な酸素量を瞬時に計算し、ブロワーの間欠を自動制御するシステムが提案されている。このシステムでは、理論的な酸素移動速度・硝化速度・脱窒速度などから有機物の酸化分解、硝化・脱窒反応に必要な酸素量を計算する。

これまでの研究では、単槽式活性汚泥法において DO センサーを導入した制御により、主な水質パラメー

タである窒素と有機物が安定的な高い効率で除去できることが示されている。プラグフロー式活性汚泥法は、生物反応槽の入り口から排水を導入し、出口から汚泥混合液を押し出す形で沈殿槽に導く方法である。しかし、プラグフロー式活性汚泥法における処理特性に関しては、まだ検討されていなかった。

生物反応槽が三槽から成る活性汚泥法（プラグフロー式活性汚泥法）において、1本のDOセンサーを設置する位置を第三槽（最終槽）、第二槽、または第一槽（初期槽）と変えて、それぞれの場合の処理能力および活性汚泥の指標微生物特性を比較する実験を行った。その結果、各生物反応槽で完全攪拌を続ける7-28日間の反応では、第三槽に設置した場合に全窒素（T-N） $8.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、アンモニア窒素（ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ） $0.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、生物化学的酸素要求量（BOD） $14.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ であり、第二槽に設置した場合で T-N $14.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ $4.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、BOD $14.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ であり、第一槽に設置した場合では T-N $23.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ $7.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、BOD $23.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ であった。活性汚泥指標微生物の平均総個体数に関しては第三槽、第二槽、および第一槽への設置で、それぞれ $12.35 \times 10^3 \text{ 個}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $7.74 \times 10^3 \text{ 個}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、および $3.43 \times 10^3 \text{ 個}\cdot\text{mL}^{-1}$ であった。三槽式活性汚泥法における各生物反応槽への曝気は、DOセンサーによる自動制御によって間欠で行い、日平均曝気時間は、第三槽、第二槽、および第一槽への設置で、それぞれ194分、223分、247分であった。

DOセンサーを生物反応槽の第三槽に導入することにより処理能力は最も高く、活性汚泥内の生物活性の向上に効果があり、省エネルギー効果があり、制御性能が高まることが示唆された。

著者は第二に、プラグフロー式活性汚泥法に自動酸素供給装置システムを導入し、その有機物と窒素の除去性能を明らかにすることを目的とした。また、プラグフロー式活性汚泥法におけるポーラロ式と蛍光式のDOセンサーの性能の差異を明らかにすることを目的とした。

DOセンサーを用いたDO濃度の精度は自動制御の性能において非常に重要である。ポーラログラフ式DOセンサーは、陽極と陰極の老化、電解液の消費による定期的な交換およびセンサーの補修と再較正が必要となる。一方、蛍光式DOセンサーが開発された。

著者の検討により、ポーラロ式DOセンサーでは、BOD、T-Nおよび $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の除去効率は、それぞれ96%、60%および81%となることが示された。これに対して、蛍光式DOセンサーを用いる場合の除去効率は、それぞれ93%、73%および91%であり、全窒素およびアンモニア窒素の除去効率が改善し、また微生物の活性化と凝集によって汚泥の沈降が促進された。

溶存酸素自動計測システムを用いるプラグフロー式活性汚泥法における日平均の電力消費量を従来法（嫌気・好気活性汚泥法）と比較したところ、ポーラロ式DOセンサーと蛍光式DOセンサーを用いた場合に、それぞれ55%と56%減少することが示された。

さらに著者は、膜分離活性汚泥法におけるシステム導入によるエネルギー削減効果について解析を行った。その結果、膜分離活性汚泥法による好気槽ブロー曝気動力の約32%削減下で、BOD $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、T-N $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下を確実に達成できることが実証された。また、観察された閉塞抑制効果は、微生物由来の膜ファウリング原因物質が硝化・脱窒反応の最適化で脱窒微生物に効果的に資化利用され、効率的に生分解されたためであることが実証された。

以上の研究結果から、蛍光式DOセンサーと溶存酸素自動計測システムを用いるプラグフロー式活性汚泥法によって、高い水質性能と省エネルギー化を達成できることが示唆された。

審 査 の 要 旨

本研究は、閉鎖水域の富栄養化の問題を解決するために広く利用されている高度活性汚泥法に着目し、その最適化と省エネルギー化を目指した研究で、プラグフロー式活性汚泥法における溶存酸素自動計測システムの導入を提案したものである。基礎的な実験結果は詳細で信頼性と新規性が高く、有用性のある結論が導かれている。著者の提案により、実用的な排水処理においても高い水質性能と省エネルギー化を達成できることが期待される。

平成30年1月25日、学位論文審査委員会において、審査委員全員出席のもとに論文の審査及び最終試験を行い、本論文について著者に説明を求め、関連事項について質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって合格と判定された。

よって、著者は博士（生物資源工学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものとして認める。