

(論文内容の要旨)

活性汚泥処理後の二次処理水は従来、放流直前に塩素による消毒が行われてきたが、塩素は残留性があるため、過剰の注入は河川や海域の生態系に影響を及ぼすことが懸念されている。消毒の指標である大腸菌群数の測定で用いられている培養法は、18 時間以上必要であることから、大腸菌群数の測定値に応じて消毒剤の注入量をリアルタイムで制御することは困難である。そのため、消毒剤は経験則により安全側に過大に注入されてきたが、今後は放流基準を達成しつつ、かつ消毒剤の残留量がほとんどない、すなわち過不足の無い消毒方法が望ましい。そこで本研究では、時間のかかる培養操作を行わない蛍光酵素法を利用した迅速大腸菌群数測定の原理の実証を行ったうえで、30 分以内で測定が可能な大腸菌群数迅速測定装置を構築し、さらにはこの装置を活用したオゾン消毒システムによる消毒効果および消毒剤節減効果を検討したものであり、6 章からなっている。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的、および研究の進め方について述べるとともに、大腸菌群数迅速計測方法、微生物数の迅速計測装置および消毒システムに関する既往研究を概説し、本研究の意義付けを行っている。

第2章では、30 分以内の迅速測定を実現するために、大腸菌群数の迅速計測技術の開発について、培養操作を行わない蛍光酵素法について研究しており、大腸菌群が所持する酵素 β -ガラクトシダーゼによる酵素反応が Michaelis-Menten 式に従うものとして最適化した測定方法を提案し、従来の培養法による測定結果との相関について検討している。蛍光酵素法の反応試薬について、装置構成を行うことを想定した上での研究を行い、蛍光基質、界面活性剤、pH 緩衝剤を最適化することで、下水二次処理水中の大腸菌群数 200 個/mL が測定可能であることを明らかにしている。また、下水二次処理水を対象として、蛍光酵素法と培養法との相関について検討しており、二次処理水に浮遊物質 (SS) が 10 mg/L 以上混入すると両者の測定値の相関が悪化することを明らかにし、大腸菌群を通過させ SS を除去する前処理フィルタの導入によりこの問題を解決し、一年間を通じて高い相関が得られることなどを明らかにしている。

第3章では、第2章で開発した蛍光酵素法の反応プロセスを用いて、大腸菌群数を自動で計測する装置を構築し、フィールド実験による性能評価を行っている。フローインジェクション法を用いた装置化により測定結果は 10~40 分毎に得られること、内部洗浄は希塩酸を用いて計測後に洗浄を行う方法が妥当であること、また下水処理場での実験では、二次処理水を対象とした場合従来の培養法の測定値に対して -40~+16% の範囲で収まる一方、流入下水の場合は $\pm 0.51 \log$ の範囲内で収まり、安定した計測が達成できていることなどを明らかにしている。

第4章では、雨天時未処理下水の消毒についてのオゾンによる高速処理実験について検討を行っている。流入下水を対象にオゾン注入率を変化させたビーカー実験を実施し、大腸菌群数を 3,000 個/mL 以下にするために必要なオゾン消費率が 100mg/L 程度であることを明らかにしている。また、実際の雨天時未処理下水のオゾンによる連続消毒実験を行い、降雨開始時から 30 分程度でファーストフラッシュが見られ、 $3.9 \times 10^4 \sim 2.9 \times 10^6$ 個/mL の大腸菌群数である未処理下水に対し、反応時間 1.7 分間、オゾン消費率が 89~109mg/L の条件により大腸菌群数 3,000 個/mL 以下を達成できることなどを明らかにしている。

第5章では、既存の二次処理水や雨天時未処理下水に関する公開データおよび第4章で得た雨天時未処理下水のオゾン消毒のデータを用いて、大腸菌群数迅速測定装置を利用した消毒システムの効率性について、シミュレーションによる研究を行っている。シミュレータの妥当性について、水中に溶解したオゾンと大腸菌群、COD_m、SS の反応が一次反応で表現できると仮定し、Chick のモデルを採用したシミュレータを構築し計算した結果、大腸菌群数 100 個/mL 以上の範囲で計算値と実測値は概ね合致した結果が得られることを明らかにしている。二次処理水を対象として大腸菌群数迅速計測装置を利用したフィードバック制御によるモデルを構築し、流量比例制御方式と比較を行い、大腸菌群数が 1,000 個/mL 以下の日変動を想定した条件でシミュレーションした結果、オゾン量は約 30% 節減可能で、処理流量 57,600m³/日の処理場では CO₂ 排出量は約 9,000kg/年節減できることを明らかにしている。また、雨天時未処理下水をターゲットとしたフィードフォワード制御によるモデルを構築して、同様にシミュレーションによる計算を行い、流量比例制御による消毒制御と比較した結果、大腸菌群数迅速計測装置の消毒制御方法によるオゾン量は流量比例制御と比較して、21~41% の消毒剤の節減効果が得られることを明らかにしている。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

活性汚泥処理後の二次処理水は従来、放流直前に塩素による消毒が行われてきたが、過剰の注入は河川や海域の生態系に影響を及ぼすことが懸念されている。消毒の指標である大腸菌群数の測定で用いられている培養法は、18時間以上必要であることから、消毒剤は経験則により安全側に過大に注入されてきたが、今後は過不足の無い消毒方法が望ましい。そこで本研究では、時間のかかる培養操作を行わない蛍光酵素法を利用した迅速大腸菌群数測定の原理の実証を行ったうえで、30分以内で測定が可能な大腸菌群数迅速測定装置を構築し、それを活用した効率的なオゾン消毒システムによる消毒効果および消毒剤節減効果を検討した。本研究で得られた主な成果は次のとおりである。

- 1) 30分以内の迅速測定を実現するために、大腸菌群数の迅速計測技術として、培養操作を行わない蛍光酵素法を開発した。
- 2) 蛍光酵素法を組み込んで大腸菌群数を自動で計測する装置を構築し、フィールド実験により性能を評価し、安定した計測が達成できていることを明らかにした。
- 3) 雨天時未処理下水の消毒について、流入下水による実験で対象試料の大腸菌群数を3,000個/mL以下にするために必要なオゾン消費率が100mg/L程度であること、および実際の雨天時未処理下水によるオゾンによる連続の消毒実験では反応時間1.7分間、オゾン消費率が89~109mg/Lの条件で大腸菌群数3,000個/mL以下を達成できることを示した。
- 4) シミュレーションによる検討を行い、流量比例制御による消毒制御と比較した結果、大腸菌群数迅速計測装置の消毒制御方法では21~41%の消毒剤(オゾン量)の節減効果が得られ、二酸化炭素排出削減も可能であることを明らかにした。

以上要するに、本論文は、大腸菌群数迅速計測手法による高速オゾン消毒システム開発とその効率化を考察したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成21年4月21日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。