

論文内容の要旨

氏名：高橋 善人

博士の専攻分野の名称：博士（生物資源科学）

論文題名：段階的高度処理方法による衛生微生物の除去

序論

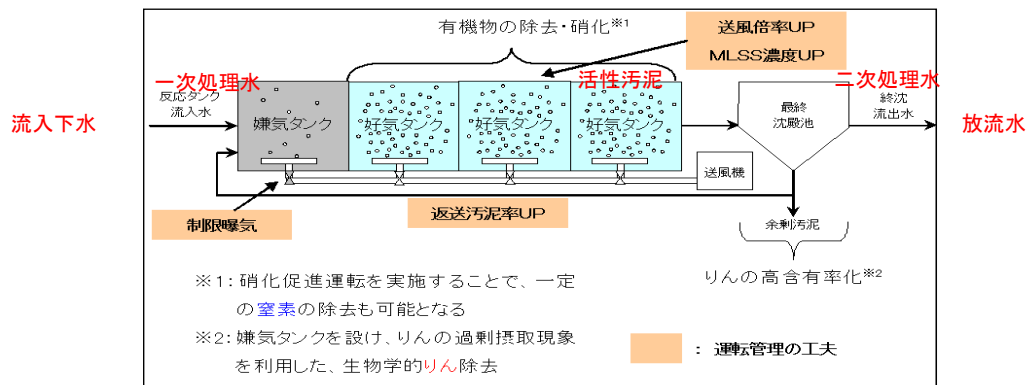
下水道整備に伴って、放流先の公共用水域のうち、河川の水質は改善している。一方で、閉鎖性水域において、富栄養化に起因する赤潮が散見されている。特に、東京湾水域は、下水処理場由来の窒素とリンの流入量の割合が高いため、下水処理における窒素・リンの削減が課題となっている。また東京湾の上流域に位置する埼玉県内を流れる河川は、高度処理の取組が求められる重要な水域である。

下水処理方法は、標準活性汚泥法、循環式硝化脱窒法、嫌気好気活性汚泥法、嫌気無酸素好気法などの複数の処理方法が存在する。標準活性汚泥法は、下水処理の主流であり、下水中の浮遊物質や生物化学的酸素要求量(BOD)の除去を主な目的としているが、窒素やリンの除去は、その好氣的処理条件が律速となり、必ずしも効率的でない。また、他の方法は高度処理方法であるが、施設規模が同程度である標準活性汚泥法に比べて建設費用や維持管理費用が高いという欠点がある。

富栄養化の原因となる窒素・リンの除去を目的とした高度処理の導入を進めているものの、既存施設の耐用年数や増改築にかかる費用等から、高度処理の導入は難しい現状がある。また、2020年東京オリンピック開催に伴う東京湾の早期の水質改善が望まれた。国土交通省では、2015年7月に閉鎖性水域の早期水質改善に向けて、既存の標準活性汚泥法施設の一部改造や運転管理の工夫により段階的に高度処理化を図るための普及ガイドラインが取りまとめられた。

これらに先駆けて、研究者らは、2013年10月から埼玉県内において、標準活性汚泥法による広域処理を行っている処理場を選定して段階的に高度処理化する実証実験を行い、運転および水質項目の変化について詳細に調べた。また、この実証実験結果に基づいて、埼玉県内の他処理場に対して、この処理方法の水平展開を進めることを目的とした。更に、閉鎖性水域内に遊泳場が設定されていること、また親水公園などの親水用水域の拡大に伴って、住民が直接処理水に接触する機会も増えていることから、下水処理水に対する衛生学的安全性の確保が課題となっている。このため、衛生微生物の除去についても重点的に研究を行った。以上の知見により、標準活性汚泥法の運用変更による段階的な高度処理方法を確認し、得られたデータに基づいて、他の処理施設を早期に高度処理化する技術基盤を確認することを目的とした。

本法の処理原理を図に示した。



第1章 研究対象施設と処理実態

本章では、処理場による通年の既存データを解析することで、段階的に高度処理化する下水処理場および実証実験対象の下水処理場を選定することを目的とした。

研究対象施設は、埼玉県において、早期に窒素とリンの処理が望まれている5処理場とした。

実証実験施設は、放流水の東京湾河口域までの到達距離、標準活性汚泥法施設の割合、処理場間の各運転項目、水質項目の比較解析により、N 処理場に決定した。

第 2 章 衛生微生物の選定と検出培地の性能評価

本章では、浄化対象となる衛生微生物とその検出培地の選定、および下水試料に対する適用例の少ない培地の検出性能を検証した。

衛生微生物は、糞便汚染指標として大腸菌群、大腸菌、糞便性大腸菌群、糞便性連鎖球菌や腸球菌、病原性指標として *Salmonella* sp., 汚水指標として *Citrobacter* sp.を含む硫化水素産生細菌群、病原性指標および消毒抵抗性指標として *Pseudomonas* sp.および *Staphylococcus* sp.を選定した。また、衛生微生物の包括的な量を把握するため、一般細菌を選定した。また、ウイルス指標として大腸菌ファージを選定した。本研究では、これらの対象細菌と大腸菌ファージを総称して、衛生微生物と定義した。

検出培地の性能は、出現コロニーを鑑別・同定することにより評価した。その結果、硫化水素産生細菌群用培地により病原性指標の *Salmonella* sp., *Proteus* sp.や汚水指標の *Citrobacter* sp.を検出した。また、緑膿菌群用培地により、病原性指標および消毒抵抗性指標の *Pseudomonas* sp.を検出した。ブドウ球菌群用培地に加えた卵黄反応の有無により *Staphylococcus* sp.の検出を簡便化した。

第 3 章 標準活性汚泥法における衛生微生物の除去

本章では、段階的な高度処理方法を導入することによる衛生微生物の除去効果を評価するために、まず、標準活性汚泥法の処理過程における衛生微生物の除去性能を評価した。

標準活性汚泥法処理施設において放流水 BOD の安定化のために反応タンクの硝化反応は促進的または抑制的に運用されている。このため本研究では硝化促進運転処理場並びに抑制運転処理場を対象とした。この結果、両処理場の流入下水における衛生微生物量 (CFU または PFU/mL) は、一般細菌が $10^6 \sim 10^7$ 、糞便性大腸菌群が 10^5 、腸球菌群が 10^4 、硫化水素産生細菌群が 10^3 、緑膿菌群が 10^2 、大腸菌ファージが $10^2 \sim 10^3$ であった。一次処理水の衛生微生物量は流入下水と近似していたが、一次処理から放流水に至る処理過程において、硝化促進運転処理場が抑制運転処理場に比べて低減した。このように、標準活性汚泥法では、硝化促進運転が、抑制運転よりも衛生微生物の除去効率が高いことが判明した。

一般細菌と衛生微生物の各検出量を比較解析したところ、一般細菌量と衛生微生物量は相関関係にあることが判明した。このことから、一般細菌量を調査することで各種の選択培地における衛生微生物量を予測することが可能であることが分かった。

反応タンクにおける衛生微生物の除去特性を検討したところ、処理時間に伴って、大腸菌群、糞便性大腸菌群は直線的に減少した。また、大腸菌ファージは大腸菌群、糞便性大腸菌群と比較してさらに減少傾向を示した。また、活性汚泥中の大腸菌ファージは反応タンク処理時間の経過とともに減少した。したがって、大腸菌ファージは活性汚泥中にて除去されていることが予想された。

衛生微生物の挙動をシミュレーションするために大腸菌群および大腸菌ファージ量とその活性汚泥に対する吸着量を調査した。その結果、反応タンクにおける衛生微生物濃度と活性汚泥との間に、フロイントリッヒの吸着等温式が成立した。この結果、反応タンクにおける衛生微生物の挙動をシミュレーションすることが可能となった。

第 4 章 段階的な高度処理方法による衛生微生物の除去

本章では、段階的な高度処理方法と標準活性汚泥法の並行運転による処理性能の比較、標準活性汚泥法から段階的な高度処理方法への運用変更に伴う衛生微生物の除去の経過、運用変更対象の処理場に段階的な高度処理方法を導入した場合の効果、について評価した。

段階的な高度処理方法 (段階法) と標準活性汚泥法 (標準法) の並行実証実験を 14 か月にわたり行った。その結果、段階法は BOD、TN、TP の目標水質を十分に満たした。同時に、二次処理水における大腸菌群 (TC)、大腸菌 (EC)、糞便性連鎖球菌 (FS)、腸球菌 (EF) の量は、1.0 Log 以上の有意差により減少した。次に、衛生微生物量、運転項目、水質項目、活性汚泥生物量を Ward's method による階層的クラスタ分析により評価した。その結果、二次処理過程における衛生微生物の対数除去率を改善するには、運転項目、水質項目、活性汚泥生物との相関関係の改善が重要であることが判明した。

また、段階法の活性汚泥は、細菌の捕食能力の高い原生動物の繊毛虫類が優占していた。このことから、衛生微生物の除去性能の指標として繊毛虫類の個体数観察が有用であると示唆された。

標準活性汚泥法から段階的な高度処理方法への運用変更実験を12か月行った。運用変更処理水の水質項目は実験開始から8か月後、TCとECは実験終了時の12月末までに段階的な高度処理水の水準に達したが、FS、EFは未達成であった。運用変更期間における運転項目の推移状況は、二次処理水における硝化率の経過と連動していた。

N処理場における実証実験結果に基づいて、未導入の4処理場における段階的な高度処理方法の導入効果をシミュレーションして評価した。その結果、4ヶ所の処理場に段階的な高度処理方法を適用した場合、全て処理場において明らかな導入効果が期待された。2020年度までに上記5処理施設は段階的な高度処理施設として運用を開始した。

総括

- 1) 実験対象とした5処理場における既存データを解析し、実証実験対象としてN処理場を選定した。
- 2) 糞便汚染指標、汚水指標、病原性指標や消毒抵抗性指標に係る衛生微生物を研究対象として選定した。また、下水試料に対する適用例の少ない、病原性指標および消毒抵抗性指標、汚水指標微生物について再評価した。その結果、硫化水素産生細菌群、緑膿菌群およびブドウ球菌群の各検出用培地は病原性指標および消毒抵抗性指標、汚水指標微生物を検出できることを確認した。
- 3) 標準活性汚泥法では、硝化促進運転が、抑制運転よりも衛生微生物の除去効率が高いことが判明した。また、一般細菌量と衛生微生物量は相関関係にあることが判明した。反応タンクにおいて、大腸菌フェージは大腸菌群、糞便性大腸菌群より減少傾向を示した。また活性汚泥中で時間経過とともに減少した。反応タンクにおける衛生微生物濃度と活性汚泥との間に、フロイントリッヒの吸着等温式が成立した。この結果、反応タンクにおける衛生微生物の挙動をシミュレーションすることが可能となった。
- 4) 段階的な高度処理方法は、BOD、窒素、リンの目標水質を充足した。また、衛生微生物量を1.0 Log以上に削減した。
- 5) 段階的な高度処理方法へ運用変更した処理水の水質項目および、大腸菌群と大腸菌は12か月までに段階的な高度処理方法の目標水質水準に達した。また、運用変更過程は二次処理過程の硝化率で評価できた。
- 6) 実証実験の結果から、新たに段階的な高度処理方法を導入する場合の予測ツールを構築した。
- 7) 2020年度までに5処理場は段階的な高度処理施設として運用を開始した。