

学位論文題名

自己造粒汚泥を利用した新しい下水処理プロセスに  
関する研究

学位論文内容の要旨

都市下水の処理方法として、わが国では活性汚泥法に代表される生物学的処理方法が圧倒的なシェアを占めている。排水の生物学的処理法には様々な方法があるが、共通する基本原理は、生物の増殖にともなう同化・異化作用を利用して、排水中の有機物を無機化、ガス化したり、生物体内に取り込ませて水中から除去するものである。有機物の除去に伴い、アンモニア、りんなどの無機塩類も一部除去される。工場排水における特定の工程排水など、成分が一定の排水を処理する場合には、特定の細菌が優占種となることがあるが、都市下水のように多様で、時間的に変動する成分を含む排水の処理を行う場合には、ある処理生物種を優占種とすることは非常に困難である。このため、現在でも、都市下水の生物処理の過程は、内部の反応機構をブラックボックスとして扱っている。しかし、基質の除去に関しては、ブラックボックスとして扱われている生物処理の内部メカニズムも、因果律の明確な、異なった観点を導入することによって、処理に関わる生物叢を制御することが可能である。本研究では、処理に関わる優占種を決定する条件として、基質となる成分のみではなく、その他の環境条件も重要であることに注目した。

本研究の中心となるテーマは、生物の自己造粒現象である。通常活性汚泥法のような浮遊性生物を主体とした生物叢や、散水ろ床法のような固着した生物膜叢とは異なり、自己造粒汚泥は、微生物主体のしっかりと集塊を形成する。自己造粒汚泥が、活性汚泥と比較して優れていると考えられる点は、微生物の高濃度化による反応速度の促進が図られる点と、処理の仕上げとしての固液分離が容易である点である。さらに、特定の微生物の集積化等も期待できる。本研究では、都市下水のような、希薄で、雑多な基質を処理する場合にも、自己造粒汚泥を形成させることができることを示し、その生物学的メカニズムを検討し、種々の自己造粒汚泥の特性を明らかにした上で、最も実用的と考えられる自己造粒汚泥を組み込んだ処理プロセスを開発し、従来法との比較を試みた。本博士論文の構成とその概要は以下の通りである。

第1章は、研究の背景と目的であり、排水の生物学的処理メカニズムを解明する上での問題点の指摘と、問題解決への種々のアプローチの仕方を論じている。また、本論文の全体的な構成にも言及している。

第2章は、生物処理研究の歴史と現状を、第1章で論じたアプローチ毎にまとめたもの

であり、現在の研究の到達点を明らかにすると共に、本論文が取り扱う研究のアプローチの仕方の独自性を明らかにしている。

第3章は、著者が開発した微好気性自己造粒汚泥を用いた多段反転流式バイオリアクター（MRB）について、自己造粒汚泥の形成機構、関与する微生物の生理学的特性、排水処理のメカニズムを論じたものである。MRBにて形成される自己造粒汚泥では、排水中の硫酸イオンを還元する硫酸還元細菌と、その代謝成物である硫化水素を微好気状態にて酸化する*Beggiatoa*の共生関係が成立しており、造粒汚泥内部に生息する硫酸還元細菌を表面に生息する*Beggiatoa*が包みこむために、自己造粒汚泥が生成されることを示した。浄化の主役たる硫酸還元細菌は、通常の活性汚泥に比べ基質摂取量に対する菌体合成量が小さく、汚泥発生量が小さくなることが示された。また*Beggiatoa*は、ごく低濃度の酸素を好み、通性の独立化学栄養にても増殖可能であることを示し、微好気条件下での増殖の優位性を論じた。さらに、自己造粒汚泥形成に関する重要な因子として、反応タンク内の水理学的な攪拌条件を取り上げ、MRB、上向流式嫌気性泥床、上向流式好気性泥床、それぞれのG値を比較した。MRB、好気性汚泥床では、G値が $10^0$ のオーダーで、上向流による汚泥の浮遊化が自己造粒の主たる要因であり、嫌気性リアクターではガスの発生に起因する攪拌が自己造粒汚泥の形成に必要なことを示した。

第4章は、MRBの処理実験を、プロトタイプ、及びパイロット規模で行った。プロトタイプのMRBは処理水量 $1.2\sim 1.7\text{m}^3/\text{日}$ の小型実験装置であり、負荷が低い場合には良好な処理が行われたが、高負荷時には自己造粒汚泥が大きな集塊を形成し、反応タンク底部に沈積したため処理効率が悪化した。パイロットプラントは処理水量 $225\text{m}^3/\text{日}$ の、実用規模に近い施設であり、自己造粒汚泥の形成に成功し、夏期には良好な処理成績を示したが、冬期には水温の低下、負荷の増大によって処理成績が低下した。高負荷時におけるこれらの問題は、酸素不足による、不十分な有機物の酸化と硫化水素の処理水への残留によることを解明し、酸素供給を実施設にて促進するための基礎的な検討を行った。検討された手法は、“曝気タンクにおけるエアリフト効果”を利用した、処理水の循環であり、パイロットプラントにおいて、付加的な循環ポンプなどを用いなくとも、流入水の10倍以上の水量を、循環させることができた。また、微好気性自己造粒汚泥を用いる方法の問題点として、窒素・りん除去への対応が困難であることが懸念された。

第5章では、前章の検討結果を受けMRBパイロットプラントを大幅に改造した。曝気タンクに、ポリプロピレン製の結合固定化担体を投入し、溶解性有機物の生物体への変換と、流入水中アンモニアの硝化を同時に行った。自己造粒汚泥がブランケットを形成する生物反応タンクでは、固形性汚濁物、及び前段で変換された生物体を、ブランケットで捕捉すると共に、前段で生成された硝酸イオンを脱窒するものとした。汚泥ブランケットに持ち込まれる水素受容体は、MRBでは別のタンクで溶解させた酸素のみであったが、今回のフローでは当該の酸素に加え硝酸イオンも供給するように変更したため、汚泥ブランケットは好気的な状態を維持することが可能となった。パイロットプラントによる2年間の運転において、有機物、窒素とも良好な除去性能を示したため、プラントの実用化に向け設計因子を抽出した。溶解性ケルダール性窒素・容積負荷として $0.1\text{kg-D-K-N}/\text{m}^3/\text{日}$ で硝化の進行を担保し、自己造粒汚泥濃度 $6,000\sim 7,000\text{mg}/\text{l}$ で脱窒と自己造粒汚泥の確保が行

われることを示した。現在の、代表的な窒素除去プロセスである、循環式硝化脱窒法と本法を同一条件で設計し、所要の反応タンク容積、消費動力を比較したところ、いずれも本法が優位であった。

第6章はまとめであって、本研究を総括した。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 渡 辺 義 公

副 査 教 授 高 桑 哲 男

副 査 教 授 田 中 信 壽

副 査 教 授 木 下 晋 一

## 学位論文題名

### 自己造粒汚泥を利用した新しい下水処理プロセスに関する研究

本論文は、現在まで処理の内部機構をブラックボックスとして扱ってきた都市下水の生物学的処理過程に、因果律の明確な異なった観点を導入すれば、処理に関わる生物叢を制御することが可能であるとの立場に立って、生物の自己造粒現象を利用した新しい都市下水処理プロセスを開発することを目的としている。本論文では、処理に関わる優先種を決定する条件として、基質となる成分のみではなく、その他の環境条件も重要であることに着目している。通常の活性汚泥法のような浮遊性生物を主体とした生物叢や、散水ろ床法のような固着した生物叢とは異なり、自己造粒汚泥は微生物主体のしっかりとした集塊を形成することを明らかにした。著者は、自己造粒汚泥を利用した下水処理では微生物の高濃度化による反応速度の促進が図られ、処理の仕上げとしての固液分離が容易になることに着目して、微好気性自己造粒汚泥を用いた多段反転流式バイオリアクター（MRB）を開発し、そこにおける自己造粒汚泥の形成機構、関与する微生物の生理的特性、排水処理のメカニズムについて論じた。MRBの都市下水処理への有効性を立証するために、処理水量225m<sup>3</sup>/日の実用規模に近いパイロットプラントを長期間運転し、所期の目的を達成している。さらに、冬期における水温の低下による処理成績の悪化を改善するために、曝気タンクにおけるエアリフト効果を利用した処理水の循環を行う新しい運転手法を提案した。MRBでは窒素・リン除去への対応が困難である点を克服するために曝気タンクにポリプロピレン製の結合固定化担体を投入し、溶解性有機物の生物体への変換と流入水中のアンモニアの硝化を同時に行う方式を提案した。この方法を用いたパイロットプラントを2年間運転し、有機物、窒素とも良好に除去できることを立証した。

これを要するに、著者は、下水処理水の高規格化に応えるために、生物の自己造粒現象を応用した新しい都市下水処理プロセスに関する新知見を得たものであり、環境工学、下水道工学の発展に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。