

1内21- 57

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

Mathematical modeling and analysis of the reaction
kinetics and dynamics of the three-phase fluidized
bed biofilm reactor for wastewater treatment
三相流動槽を用いた排水処理プロセスにおける反応速
度論と動特性の数学的モデリングおよび解析

申請者

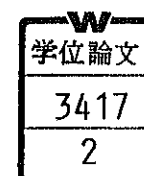
アオレセニア

ジョセフ

Joseph

Auresenia

応用化学専攻 化学工学研究



2002年 2月

環境保全に対する世界的関心が高まる中で、とりわけ水環境の保全が社会的に強く要望されている。生活排水や産業廃水に関する排出基準は世界的に強化される傾向にあるために、効率がよく経済的な生物学的排水処理技術への期待が高まってきているのが現状である。高効率な排水処理装置を設計し、安定にかつ最適に運転管理を行うためには、装置内の生物化学反応速度論や負荷変動に対する動特性についての知見が重要となる。

このような観点から本研究では、生物膜という状態で微生物を高密度に保持可能な完全混合流型三相流動槽を用いた排水処理プロセスを取り上げ、安定した運転管理を行うための動特性について検討した。2種類の非定常操作（回分式とステップ変動式）における装置の動特性を実験的に調べ、得られた結果から速度論モデルを立てて反応速度定数を算出し、装置内の生物反応機構と動特性の解明を行った。速度論モデルおよび反応速度定数の妥当性を評価するに当たっては、装置の動特性を支配する非線形偏微分方程式をRunge-Kutta法で解いた結果と実測値とを比較した。

本論文は8章で構成されている。以下に各章の概要を述べる。

第1章では、各種生物膜法の操作条件と性能の比較を行い、生物膜内部への基質の拡散と生物反応、微生物の増殖機構、速度論モデルおよび反応速度定数についての従来の知見を整理するとともに、本研究で取り上げた三相流動槽の概要についてまとめ、本論文の意義・目的を明らかにした。

第2章では、三相流動槽のスタートアップ時における粒子状担体表面への微生物の付着過程について検討した。新規担体を装置に投入した後、生物膜の付着量と処理速度との関係を経時的に調べ、反応速度定数の変化を生物膜成長段階ごとに比較した。さらにスタートアップ時における装置の最適な操作条件を明らかにするために、流入水量と流入濃度を装置ごとに変化させた実験を行った。その結果、流入TOC濃度 400g/m^3 の生活模擬排水については、付着微生物の増殖速度を高め、浮遊汚泥発生量を抑える操作条件として、装置の水理学的滞留時間5時間が最適であるという知見を得た。本章により、生物膜の担体への付着過程と固定化技術についての知見が得られ、三相流動槽のスタートアップ時における最適操作条件が明らかになった。

第3章では、回分式の非定常操作として、初期基質濃度を変化させ、生物処理実験を行った。成分基質として生物化学的酸素要求量(BOD_5)を、微生物量として強熱減量(MLVSS)を経時的に測定し、得られたデータの速度論解析を行った。実験データを基質濃度に対する微生物の比消費速度に変換し、微生物の比増殖速度式として5種類のモデル式を用いて非線形回帰分析を行った。相関係数と標準誤差で各モデルを比較評価したところ、内生呼吸型代謝維持と高濃度基質による阻害を考慮したモデルが実験結果と最も

良く適合した。本章により、限定成分基質が1種類のみである場合には、速度論モデルと反応速度定数は初期基質濃度と初期微生物濃度の相対比によって決まることを明らかにした。

第4章では、流入水量および濃度を変化させてステップ変動式の生物処理実験を行った。成分基質として BOD_5 を、微生物量として生物膜全表面積をそれぞれ経時的に測定した。基質濃度のステップ応答はピークを伴う曲線を描くことがわかった。また、生物膜表面積はステップ変動前後で大きな変化は見られないことが示された。そこで、まずMonod式をベースとした完全混合流型生物処理特性式で実験結果を整理し、ステップ変動前後の定常状態における速度定数を算出した。次に非定常項を含む収支式を用いてRunge-Kutta法でシミュレートした。しかしながら、ステップ応答の実験結果は基質濃度に対してピークを伴う2次系システムの応答であり、本章で提案した1次系モデルによる解析では実験結果をうまくシミュレートできないことが明らかとなった。

第5章では、生物膜充填率を変えてステップ応答実験を行い、成分基質としてTOCを、微生物量としてMLVSSをそれぞれ経時的に測定した。第4章で言及したようにモデルを2次系モデルに改良するために、非定常項を含むモデルとしてさらにMLVSSの収支式を加えた。比増殖速度式に関して第3章と同じ5種類のモデル式を使い、Runge-Kutta法でシミュレートしたところ、すべての比増殖速度式で定常時だけでなく非定常時のピーク高さもシミュレートできることを明らかにした。しかしながら、用いた5種類のモデルではすべてピークに達するまでの時間（すなわち時定数）が実験結果よりも小さく算出されたことから、正確に非定常時の生物処理過程をシミュレートするためにはさらに高次系のモデルへと改良する必要性のあることが示された。

第6章では、成分基質として全有機炭素濃度(TOC)とアンモニア態窒素(NH_4^+-N)の二つを取り上げ、回分式条件下で生物処理実験を行い、両成分の経時変化を測定した。生活排水を処理する場合、生物膜内には様々な代謝機能を有する微生物が存在する。TOCは主に従属栄養細菌により消費され、アンモニア態窒素は主に独立栄養細菌により消費される。そこで、これらを考慮した2基質成分モデルを立てて、非線形回帰分析法で反応速度定数を算出し、Runge-Kutta数値積分法でシミュレートした。内生呼吸型維持代謝を考慮することのほかに、高濃度基質による阻害に関して「TOCの酸化速度には NH_4^+-N の阻害はないが NH_4^+-N の酸化速度にはTOCが阻害を与える」というモデルが実験結果と最も良く適合した。

第7章では、流入基質濃度をステップ変動させたときの応答をシミュレー

トする際に、基質成分 (TOC) の生物膜および担体への吸着速度式を考慮したモデルを新たに提案し、妥当性の検討を行った。まず、攪拌式の吸着実験装置を用いて基質濃度を変化させ、生物膜および担体に対する平衡吸着量を測定した結果、吸着等温線はいずれも Freundlich 型に従うことがわかった。つづいて、算出された吸着等温式と Monod 型の微生物増殖速度式とを組み合わせモデル式を立て、異なる MLVSS におけるステップ応答実験データをシミュレートした結果、定常時における TOC 値だけでなく、非定常時における TOC 値のピーク高さおよびピーク到達時間までほぼ正確に予測できることを明らかにした。さらに、このシミュレーションの際に用いた速度定数はすべての MLVSS についてほぼ等しい値であったことから、本モデルの妥当性が確認された。

第 8 章は、本論文の総括である。

以上、本論文は、完全混合流型三相流動槽を用いた非定常実験から得られた結果を整理し、さらに、最適操作条件の導出に必要な速度論モデルと反応速度定数の算出法について検討した結果をまとめたものである。本成果が水環境改善を目指した高効率な排水処理装置の操作・設計に大きく寄与することを期待するものである。