

嫌気性流動層バイオリアクターシステムによる 下水の高度処理

学位論文内容の要旨

湖沼や内湾など閉鎖性水域において、窒素やリンなどの栄養塩類の過剰な流入に伴い富栄養化が進行し、藻類の異常増殖による水質汚濁および利水上の弊害が生じ、大きな社会問題となっている。富栄養化防止の観点から、下水や廃水中の窒素およびリンを効率よく除去できる高度処理技術の確立は重要な課題である。また、省エネルギー、省資源および資源有効利用が可能な処理技術の開発が要望されている。

本研究は上述のことを念頭において、生物的機能と物理化学的機能とを融合させた新しい下水の高度処理システムの提案と実用化のための基礎的研究を行ったものである。その結果、嫌気性流動層バイオリアクターと好気性生物処理プロセスとを連設した処理システムが硝化・脱窒などの生物機能と懸濁物質やリンの造粒化などの物理化学的機能を有していることおよび経済的でかつ効率的な高度処理システムとして機能することを明らかにした。さらに本処理システムによる汚濁物質の除去機構を解明するとともに速度論的知見および設計・操作条件の設定法に関する知見を得た。

本論文は、10 章から構成されており、以下に各章の概要を述べる。

第 1 章では、下水の高度処理システムに関する研究の現状と問題点を明示し、処理システムへの嫌気性条件の導入と嫌気性微生物機能の有効活用および物理化学的機能との融合が高度処理システムの開発に重要であることを指摘し、本論文の背景と目的を示した。

第 2 章では、嫌気性流動層バイオリアクター（以下 AFPB バイオリアクターという）と好気性生物処理プロセスとを組み合わせた簡単な処理システムが下水の高度処理システムとして機能することを原理的に示した。また、小型実験装置を用いた下水の連続処理実験結果から、下水中の COD、窒素、リンおよび懸濁（SS）成分の同時かつ高速除去が可能であり、極めて良好な処理水を得ることができることおよび水温 10℃前後の低水温期にも適用できることを明らかにした。

第 3 章では、本処理システムの中核である AFPB バイオリアクターで形成される造粒汚泥の性状が処理機能や処理効率に大きく影響するので、高密度造粒汚泥の形成機構とその物理化学的および生物化学的特性に関して検討した。造粒汚泥は、無機凝集剤のポリ塩化アンモニウム（PAC）の荷電中和と弱アニオン性ポリマーの架橋効果により大型フロックとして形成されるが、この物理化学的作用に加えて、糸状性細菌 *Beggiatoa sp.* と球菌の造粒汚泥表面および内部での増殖がフロックの高密度化に関与し、処理効率の向上に大きく

貢献していることを明らかにした。高密度造粒汚泥フロックには、微好気性の *Beggiatoa* sp.、脱窒菌、硫酸塩還元菌およびメタン生成菌などの細菌群が生息する興味ある生態系を構成し、高い生物活性を有することを明らかにした。

第4章では、AFPB バイオリアクターシステムによって SS、COD、窒素およびリン成分の同時除去を行うための操作条件と設計条件について検討した。水温 15℃以上の条件では、滞留時間 4 時間および循環比を約 3 に設定すると、完全な硝化・脱窒反応が起こり、窒素除去率が 80%以上に達し、SS および COD の 90%以上、リン化合物の 95% 以上が除去できた。水温 15℃以下では、滞留時間を 7.5 時間と大きくすることによって、良好な処理水を維持することができた。

第5章では、AFPB バイオリアクターから排出される多量の造粒汚泥を流動床型嫌気性消化槽によってメタンガスへ変換する省エネルギー型下水処理システムを提案した。その結果、滞留時間 10 日で、消化率 60%以上およびガス発生率約 0.4l/gVS の値が得られ、エネルギー回収が可能であることが判った。また、この下水処理システムでは、消化ガス発電システムを採用し、消化ガスを電力に変換すると、処理水量 1m³ 当り 0.1kWh の電力を回収でき、下水の処理水量 1m³ 当りの電力消費量は 0.12~0.14kWh となり、標準活性汚泥法の約 60%に削減できた。

第6章では、AFPB バイオリアクターと接触曝気槽から構成された基本処理システムに第二脱窒槽を付設して、AFPB バイオリアクターで生成される下水造粒汚泥を炭素源とする残留硝酸塩の除去に関して実験的検討を行った。下水造粒汚泥は脱窒のための良好な炭素源として利用でき、最適条件で運転すると最終処理水の窒素濃度は 0.5~1.0mg・ℓ⁻¹ となり、窒素除去率は 96~98%に達した。

第7章では、AFPB バイオリアクターシステムを下水処理場の汚泥処理設備からの高汚濁排水である返流水の処理に適用して、窒素およびリンの除去に関して検討した。本処理システムは返流水においても、下水汚泥を脱窒のための水素供与体として利用すると高効率な高度処理システムとして適用でき、ほぼ完全な硝化・脱窒が起こり、処理プロセスの窒素除去率は75%以上に達することが判った。

第8章では、汚泥処理設備の返流水に2段式 AFPB バイオリアクターシステムを採用し、閉鎖性水域などにも直接放流可能な水質(T-N:20mg・ℓ⁻¹, T-P:1mg・ℓ⁻¹)にまで処理することができると否かを検討した。その結果、第2段目 AFPB バイオリアクターの滞留時間を3時間以上に設定し、汚泥添加率を BOD 換算で除去 NO₃⁻-N 当たり 2.8~4.8 に制御すると、直接放流可能な水質が安定して達成された。

第9章では、AFPB バイオリアクターシステムをスケールアップしたパイロットプラントを下水処理場に建設し、実証実験を実施し、実用化について検討した。AFPB バイオリアクターおよび接触曝気槽の容積をそれぞれ約 20m³にスケールアップした処理システムを返流水の処理に適用して、約1年間の連続処理を行った結果、窒素除去率 75%およびリン除去率 90%以上が得られ、目標値が達成された。実証実験の結果、実用化の可能性が示唆されたが、今後の課題としては、システム全体の滞留時間の短縮化、添加汚泥の最適添加量の自動化および大型 AFPB バイオリアクターにおける汚泥界面管理手法が上げられる。

第10章は総括であり、本研究で得られた成果を要約したものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 清 水 達 雄
副 査 教 授 高 桑 哲 男
副 査 教 授 太 田 幸 雄
副 査 教 授 木 下 晋 一

学 位 論 文 題 名

嫌気性流動層バイオリアクターシステムによる 下水の高度処理

湖沼や内湾など閉鎖性水域において、窒素やリンなどの栄養塩類の過剰な流入に伴い富栄養化が進行し、藻類の異常増殖による水質汚濁および利水上の弊害が生じ、大きな社会問題となっている。富栄養化防止の観点から、下水や廃水中の窒素およびリンを効率よく除去できる高度処理技術の確立は重要な課題である。また、省エネルギー、省資源および資源有効利用が可能な処理技術の開発が要望されている。

本研究は上述のことを念頭において、生物的機能と物理化学的機能とを融合させた新しい下水の高度処理システムの提案と実用化のための基礎的研究を行ったものである。その結果、嫌気性流動層バイオリアクターと好気性生物処理プロセスとを連設した処理システムが硝化・脱窒などの生物機能と懸濁物質やリンの造粒化などの物理化学的機能を有していることおよび経済的でかつ効率的な高度処理システムとして機能することを明らかにしている。さらに本処理システムによる汚濁物質の除去機構を解明するとともに速度論的知見および設計・操作条件の設定法に関する知見を得ている。本論文は、10章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章では、下水の高度処理システムに関する研究の現状と問題点を明示し、処理システムへの嫌気性条件の導入と嫌気性微生物機能の有効活用および物理化学的機能との融合が高度処理システムの開発に重要であることを指摘し、本論文の背景と目的を示している。

第2章では、嫌気性流動層バイオリアクター（以下 AFPB バイオリアクターという）と好気性生物処理プロセスとを組み合わせた簡単な処理システムが下水の高度処理システムとして機能することを原理的に述べている。また、小型実験装置を用いた下水の連続処理実験結果から、下水中の COD、窒素、リンおよび懸濁（SS）成分の同時かつ高速除去が可能であり、極めて良好な処理水を得ることができることおよび水温 10℃前後の低水温期にも適用できることを明らかにしている。

第3章では、本処理システムの中核である AFPB バイオリアクターで形成される造粒汚

泥の性状が処理機能や処理効率に大きく影響するので、高密度造粒汚泥の形成機構とその物理化学的および生物化学的特性に関して検討している。造粒汚泥は、無機凝集剤のポリ塩化アンモニウム（PAC）の荷電中和と弱アニオン性ポリマーの架橋効果により大型フロックとして形成されるが、この物理化学的作用に加えて、糸状性細菌 *Beggiatoa sp.* と球菌の造粒汚泥表面および内部での増殖がフロックの高密度化に関与し、処理効率の向上に大きく貢献していることを明らかにしている。高密度造粒汚泥フロックには、微好気性の *Beggiatoa sp.*、脱窒菌、硫酸塩還元菌およびメタン生成菌などの細菌群が生息する興味ある生態系を構成し、高い生物活性を有することを明らかにしている。

第4章では、AFPB バイオリアクターシステムによって SS、COD、窒素およびリン成分の同時除去を行うための操作条件と設計条件について検討し、水温 15℃以上の条件では、滞留時間 4 時間および循環比を約 3 に設定すると、完全な硝化・脱窒反応が起こり、窒素除去率が 80%以上に達し、SS および COD の 90%以上、リン化合物の 95% 以上が除去できるが、水温 15℃以下では、滞留時間を 7.5 時間と大きくする必要があることを示した。

第5章では、AFPB バイオリアクターから排出される多量の造粒汚泥を流動床型嫌気性消化槽によってメタンガスへ変換する省エネルギー型下水処理システムを提案している。この下水処理システムでは、消化ガス発電システムを採用し、消化ガスを電力に変換すると、処理水量 1m³ 当り約 0.1kWh の電力を回収でき、下水の処理水量 1m³ 当りの電力消費量は 0.12~0.14kWh となり、標準活性汚泥法の約 60%に削減できることを示した。

第6章では、AFPB バイオリアクターと接触曝気槽から構成された基本処理システムに第二脱窒槽を付設し、下水造粒汚泥を炭素源とする残留硝酸塩の除去システムを提案し、その結果、窒素除去率を 96~98%に向上させることを明らかにしている。

第7章では、AFPB バイオリアクターシステムを下水処理場の汚泥処理設備からの高汚濁排水の返流水処理に適用して、窒素およびリン除去能力を検討し、下水汚泥を水素供与体として利用すると高汚濁排水に対しても高効率な高度処理システムとして機能することを明らかにしている。

第8章では、汚泥処理設備の返流水に 2 段式 AFPB バイオリアクターシステムを採用し、閉鎖性水域などにも直接放流可能な水質にまで処理することができるか否かを検討している。その結果、第2段目 AFPB バイオリアクターの滞留時間を 3 時間以上に設定し、汚泥添加率を制御すると、直接放流可能な水質が安定して得られたことを示した。

第9章では、AFPB バイオリアクターおよび接触曝気槽の容積をそれぞれ約 20m³ にスケールアップしたパイロットプラントを下水処理場に建設し、実証実験を実施し、実用化について検討している。約 1 年間、返流水の連続処理を行った結果、窒素除去率 75%およびリン除去率 90%以上が得られ、目標値が達成されている。実証実験の結果、実用化の可能性が示唆されたが、今後の課題としては、添加汚泥の最適添加量の自動化および大型 AFPB バイオリアクターにおける汚泥界面管理手法などが上げられる。

第10章は総括であり、本研究で得られた成果を要約したものである。

これを要するに、著者は生物的機能と物理化学的機能を同時に発揮できる嫌気性流動層バイオリアクターシステムによる新しい下水の高度処理法を開発し、実用化のための基礎研究を行ったものであり、水環境工学ならびに水質保全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。