

氏 名 渡 邊 亮 哉
研究科, 専攻の名称 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 土木工学専攻
学 位 論 文 題 目 嫌気性膜分離法を用いた下水処理に関する基礎的研究
論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 李 玉友 東北大学教授 西村 修
東北大学教授 原田 秀樹

論文内容要約

膜分離活性汚泥法 (Membrane Bioreactor : MBR) は, 下水や工場排水を微生物により処理し, その後膜ろ過を行う手法である. 微生物群である活性汚泥は排水内の有機物を代謝し分解する. ここで, 活性汚泥を処理水から分離するために, 活性汚泥を沈殿させて分離を行う方法があるが, この方法では活性汚泥と処理水の完全分離が困難で, 処理水に活性汚泥が残存する問題がある. それに対し, MBR を利用して活性汚泥を沈殿させる代わりに膜によるろ過を行うことで, 活性汚泥と処理水の完全分離が可能となる. さらに, 膜を使用することで既往の水処理手法より小さなスペースで活性汚泥を分離できることから, 近年の水処理技術の中で多大な注目を集めている. しかし, 活性汚泥法はプロセス全体で必要とされるエネルギーコストが高い, 余剰汚泥の生成量が多い, 温室効果ガスの排出等の問題点が挙げられる. 一方で, 嫌気性処理技術は曝気の必要がなく, 汚泥発生量が少ないため, 省エネルギーな処理が期待されるだけでなく, 発生したバイオガスをエネルギー源として利用が可能であるため, 創エネルギーの効果も期待できる. この流れにおいて近年, 膜分離技術と嫌気性処理を組み合わせた膜分離メタン発酵法プロセスの開発が注目を集めている.

本研究においては, 嫌気性膜分離法の温度変化に対する基礎的知見を得ることを目的とし, 人工下水を用いた連続処理実験で運転温度を室温条件 (25 °C) から低温条件 (15 °C, 10 °C) まで段階的に下げて運転を行い, 処理性能評価の検討を行った. また, 分子生物学解析を用いて運転温度が与える微生物群集構造変化の検討を行うとともに, 細菌の増殖と基質消費相互間の関係に及ぼす温度および滞留時間の影響について動力的見地から検討を行った.

本論文は, 全 7 章から構成されている.

第 1 章「緒論」では本研究の背景および目的について述べた.

第 2 章「嫌気性膜分離法に関する既往の研究」では, メタン発酵に関する基礎的知見, 従来の嫌気性処理による

下水処理、膜分離技術の特徴および嫌気性膜分離法に関する研究報告を総説し、本研究の位置付けと目的を明確にした。

第3章「嫌気性膜分離法を用いた下水処理の可能性」では、室温条件において人工下水の連続処理実験を行い、水理学的滞留時間 (HRT) を段階的に短縮することで、処理性能に及ぼす HRT の影響を評価した。また、汚泥生成量や物質収支、さらに従来の標準活性汚泥法と比較しての嫌気性膜分離法の有用性を検討した。以下にこの章の結論を要約する。

HRT 12 h において、室温条件で高い処理性能およびメタン回収率が示された。一方で HRT 6 h に関しては COD 除去率が 87 % と高い結果となったが、膜にかかる負荷が大きく運転は困難であった。汚泥生成量は、活性汚泥法の約 1/3 程度まで減らすことが可能であった。回分ろ過実験より膜性能の低下の原因は、膜表面に付着した物質(汚泥、微生物代謝産物)であることが示された。ケーススタディより、AnMBR は良好な処理水質、効率の良いエネルギー回収、汚泥生成量の削減が同時に実現することが可能であり、下水処理への適用が期待される。

第4章「嫌気性膜分離法を用いた下水処理に及ぼす温度の影響」では、嫌気性消化において重要な操作因子の1つである運転温度の変化が、処理性能や物質収支、膜性能に及ぼす影響の検討を行った結果、以下の結論が得られた。

15 °C の温度条件に関しては HRT 12 h において良好な処理水質、高いメタンガス回収率が得られたのに対し、10 °C では低負荷においても処理性能やメタン回収率が著しく減少した。膜性能の評価及び回分ろ過実験の結果より、室温域と低温域における膜ファウリングの変化は微生物代謝産物が大きく関与していると考えられた。また、温度が低下するに従い、SMP や EPS といった微生物代謝産物の生成量は増加し、膜ファウリングが起きやすい環境になることから最適な汚泥濃度の検討が求められる。連続実験およびメタン生成活性試験より 10 °C の温度条件はメタン生成古細菌にとって好ましくない環境であることが考えられ、10 °C での生物学的処理は困難であることが明らかにされた。

第5章「嫌気性膜分離法による下水処理の動力学解析とシミュレーション」では、嫌気性膜分離法を用いて嫌気性消化における細菌の増殖と基質消費相互間の関係に及ぼす温度と HRT の影響について動力的見地から検討を行い、得られた動力学定数からシミュレーションモデルの構築を検討した。以下に結論を要約する。

嫌気性膜分離法による下水処理は、温度と HRT の影響を受け、同一 HRT 条件で温度が低くなるほど、あるいは同一温度条件で HRT が短いほど分解率は低下した。同一温度条件における流出基質濃度と比基質消費速度との関係は Monod 式によって表現が可能であった。動力学定数の温度依存性は Streeter-Phelps 式によって表現され、温度係数の値は $\theta_v > \theta_k > \theta_Y$ の順であり、 v_{\max} の温度依存性が最も大きい。HRT 6 h, MLVSS 12,000 mg/L の条件で 80 % 以上の COD 除去率を得るには、15 °C 以上の温度条件が必要とされる。また、10 °C の温度条件において汚泥濃度を 12,000 mg/L まで上げることで高い除去率が維持できることが示唆された。10-25 °C の温度条件で得られた温度依存モデルは次式の通りである。

$$1/\text{SRT} = \{(0.009) \cdot (1.128)^{(T-10)} \cdot S_e\} / \{(99.1) \cdot (1.030)^{(T-10)} + S_e\}$$

第 6 章「嫌気性膜分離法による下水処理における微生物群集構造」では、処理性能の変動は微生物群集の変化が大きく関与していることから、温度が与える微生物群集構造変化の評価を分子生物学解析にて検討を行った結果、以下の結論が得られた。

古細菌群集構造に関しては、温度による群集構造の変化は確認されなかった。一方で真正細菌の群集構造においては、温度毎に優占した種は異なり、特に 10 °C では 1 つの種が優占する結果となった。また、本研究において好気性菌や通性嫌気性菌等が多く検出されたことが AnMBR の特徴であると考えられる。合成洗剤を添加したことで古細菌および真正細菌群集構造は大きく変化した。特に真正細菌では、*Aeromonas hydrophila* や *Tolumonas auensis* 等の芳香族を分解するとされる菌が多く検出され、合成洗剤の分解に適応した群集構造に変化したことが明らかになった。

第 7 章「総括および今後の展望」では、本研究を通して得られた結果を総括し、今後の展望について述べた。