

## 論文内容の要旨 Abstract of Dissertation

論文題目：

Membrane fouling development and biofilm-forming bacteria in anoxic/oxic-MBR under low organic loading rate conditions (低有機物負荷A/O-MBRにおける膜ファウリングの発生機構とバイオフィーム形成細菌に関する研究)

氏 名 Name 滝本 祐也

持続的な下水処理システムの構築は、SDGsに指定されているように世界的な課題である。膜分離活性汚泥法（Membrane bioreactor: MBR）は、その高い処理性能によって世界的に普及が進んでおり、従来の活性汚泥法に代わる生物学的排水処理プロセスとして注目されている。一方で、MBRは孔径0.1  $\mu\text{m}$ 程度の精密分離膜を使用するため、継続運転に伴い、膜面バイオフィームの形成とともに膜透過流速が著しく低下する“膜ファウリング”の発生が主要な問題である。特に、膜面バイオフィームの形成を担う細菌群に関する知見は不足しており、複雑かつ多様な微生物群によって構成されるバイオフィームの形成機構に関する知見は極めて少ない。本学位論文は、膜面バイオフィーム形成を担う細菌の特定と、膜ファウリング発生機構を明らかにすることを目的として、極めて低い有機物負荷条件でMBRを運転し、膜面に発達したバイオフィームおよびMBR内活性汚泥中の膜ファウリング原因物質・微生物に関する知見をまとめたものである。本論文は全6章から構成され、まず、第1章では、本研究の背景として低有機物負荷MBRで発生するバイオフィームの微生物群集構造を明らかにする意義を整理し、本論文の目的についてまとめた。

第2章では、MBRによる排水処理プロセスの特徴と膜ファウリングを誘発する物質、運転方法および関連する微生物群集について、既往の知見を整理し、本論文の意義を明確にした。

第3章では、バイオフィーム形成細菌を特定することを目的に、低有機物負荷条件下でMBRを運転し、各種運転パラメーターのモニタリングおよび膜面に発生したバイオフィームと通常条件で発生した膜面バイオフィームの細菌群集構造を比較した。その結果、通常条件のMBRは2ヶ月間安定的に運転された一方で、低有機物負荷のMBRでは、運転開始5日から膜ファウリング発生の指標である膜間差圧（TMP）が上昇し始め、17日後に深刻な膜ファウリングが発生した。低有機物負荷MBRで確認された急速な膜ファウリングは、溶菌に由来する物質が寄与していることが示唆された。膜面に発生したバイオフィームはMBR内の活性汚泥の細菌群集構造と大きく異なっており、特に低有機物負荷MBRでは未培養のTM6門が、通常MBRではOD1門がバイオフィーム上で優占して存在するという興味深い知見が得られた。これらの未培養細菌の存在割合はいずれのバイオフィームにおいても活性汚泥と比較して有意に増加しており、バイオフィーム形成に関与する可能性が示唆された。

第4章では、低有機物負荷MBRで発生する膜面バイオフィームの形成機構を明らかにするために、共焦点レーザー顕微鏡（CLSM）と微生物群集構造解析を用いて、バイオフィル

ムの形成過程をモニタリングした。CLSM観察の結果、低有機物負荷運転初期において膜面への死菌由来成分が付着し、運転中期において死菌由来成分の上層に生菌の集合体が点在することが明らかとなった。このことは、低有機物負荷運転の影響によって溶菌した細胞が初期のバイオフィルムを形成し、その後、生細菌が付着・増殖によってマイクロコロニーを形成したことを示唆している。微生物群集における主成分分析の結果、初期バイオフィルムの細菌叢はMBR内の活性汚泥と大きく異なっていた一方で、成熟したバイオフィルムは活性汚泥細菌叢と類似していた。初期バイオフィルムには、*Neisseriaceae*科に属する細菌の他に、寄生性および門レベル未培養細菌群が優占して存在しており、これらの優占種がマイクロコロニー形成に重要な役割を果たしていると考えられた。

第5章では、低有機物負荷MBRの膜ファウリング発生における温度の影響を明らかにするために、異なる季節にそれぞれ3種類のMBRを運転した。結果として、低温下において極めて高い再現性を伴って膜ファウリングが発生した一方で、高温下においては、膜ファウリングを発生する系と発生しない系が確認された。水質パラメーターを比較した結果、膜透過流出水の溶解性有機炭素（DOC）に大きな違い観察された。膜ファウリングが緩和された高温MBRでは、活性汚泥内にDOCは蓄積せず膜を透過しており、活性汚泥中のDOCの膜透過性が膜ファウリングの発生に影響を与えていることが示唆された。細菌叢解析の結果、低温・低負荷では、活性汚泥細菌群は活性を維持できず、発生したDOCは分解されなかった。一方で、高温・高負荷では、活性汚泥細菌群は運転期間中に大きく変動しており、膜ファウリングが緩和した系では、細菌多様性が維持されることが明らかとなった。以上の結果は、細菌多様性が膜ファウリングを発生させるDOCの分解に寄与しており、細菌多様性を維持することが膜ファウリングの制御に重要であることが明らかとなった。

第6章では、本論文で得られた各章の結果を総括した。

以上のように、本論文は、MBRを低有機物負荷で運転することで、急速なバイオフィルム形成を伴い発生する膜ファウリングを詳細に解析し、バイオフィルム形成を担う細菌および膜ファウリング発生機構を理解する上で重要な知見を提供し、MBRの膜ファウリング制御に向けた運転の確立に貢献するものと考えられる。