

氏名 佐野 利夫

#### 主論文審査の要旨

下水処理に代表される污水处理施設とその関連技術は、我々の生活を支える重要な社会基盤の一つであり、その殆どは標準活性汚泥法を基盤技術としている。しかし近年は、施設のコンパクト化、処理液の清澄化、運転管理の簡便化を実現できるメンブレンバイオリアクタ (MBR: Membrane Bio-reactor) が標準活性汚泥法の代替技術として実用化され、世界的に普及が進んでいる。一方、MBR では原理上、膜の目詰まり (ファウリング) が避けられないことから、その予防・低減が MBR のさらなる展開にあたって今なお重要な課題となっている。また、昨今のマイクロプラスチックによる水環境汚染問題に関して、MBR は下水や汚水に含まれる微小粒子の除去能力に優れる一方で、膜が脆弱な場合には、膜自体がマイクロプラスチックの発生源になる可能性がある。

以上の背景から、本論文はマイクロプラスチックを含む下水・污水处理への MBR の適用における、高分子膜の機械的な耐久性と低ファウリング性の両立を目的として研究を行い、それらの成果をまとめたものである。はじめに、マイクロプラスチックの除去において十分な耐久性を有した膜がどういったものかを明らかにし、次に MBR において耐ファウリング性をもたせるためにはどのような膜性能を有していればよいかを明らかにした上で、この両者を合わせ持つ膜の特性を明らかにした。本論文は、全 8 章から構成され、第 1 章は序論、第 8 章は総括である。

第 2 章では、膜材料と膜ファウリングの関係を、4 種類の膜材料の平膜を用いて実験室規模の MBR にて調査した。また、実験室規模の MBR の活性汚泥の特性を、実規模の廃水処理施設のサンプルと比較した。膜材料の違いに加え、膜の構造的な脆弱性はファウリングの発生に決定的な影響を与えることがわかった。また、実験室規模の MBR の活性汚泥の特性は、実規模のし尿処理施設および下水処理施設の曝気槽の活性汚泥の特性と同様であった。

第 3 章では、3 種類の膜を用いて機械的耐久性および耐ファウリング性を詳細に調査した。その結果、これら膜の中では、PES 膜の耐久性が最も低いと考えられ、マイクロプラスチックの発生が起り得ることを示した。一方、耐ファウリング性に関しては 3 種類の膜に顕著な差は認められなかった。

第 4 章では、CPVC 膜を用いて、膜の細孔径と膜ファウリングの関係を明らかにした。実験には、異なる高分子濃度の製膜溶液を用いて作製した 4 種類の異なる孔径の CPVC 製の平膜を用いた。さらに、本章では対称膜における膜ファウリングの機構も示した。膜の細孔内にファウラントが付着または堆積して発生する不可逆ファウリングは、膜の細孔内におけるタンパクの捕捉と密接に関係していることを実証した。その一方で、可逆ファウリングは、膜表面に形成されたゲル層およびケーキ層によって起こされていることがわかった。以上から、膜ファウリングを抑制するための最適な膜の細孔径の存在が実証された。

本研究成果はこれまでに知見が無く、世界初の報告と考えている。

第5章では、PTFE膜を用いて、膜表面の親疎水性と膜ファウリングの関係を明らかにした。ここでは、膜ファウリングに及ぼす膜の親疎水性のみの影響を明らかにすることができ実験の実施を目的とした。その結果、親水性と疎水性のPTFE膜の膜間差圧に顕著な差は見られず、膜表面の親疎水性は膜ファウリングにほとんど影響を与えないことが示唆された。また、三次元励起蛍光マトリックス分析の結果から細胞外高分子物質であるタンパクの細孔内への吸着がファウリングに影響していることが分かった。

第6章では、両親媒性のプルロニックブロック共重合体を膜に添加することによって膜特性を向上させる方法の開発に取り組んだ。ここでは、MBRでの使用に適したCPVC製の平膜を作製するために、プルロニックTR-702を添加することにより、膜特性を向上させる技術の確立に焦点を当てた。結果、プルロニックTR-702の濃度が50wt/wt%の場合、MBRにおける使用に適した孔径の膜を作製することに成功し、本手法が、MBR用途の膜の特性を向上させるための有用な方法であることが分かった。

第7章では、フッ素系高分子界面活性剤を膜に添加することによって膜の特性を向上させる方法を開発した。この手法は、MBR用途の高性能CPVC製平膜を作製することに貢献できる新しい技術と考えられる。

本研究の成果は査読付き英文論文4編（内、1編は印刷中）と査読付き国際学会Proceedings 1編にて発表されており、研究成果は当該講座の学位授与基準（学術論文誌の掲載論文が一編以上、国際会議論文誌への掲載論文を含む国際会議での口頭発表・質疑応答が可能な語学力）を満たしている。また、研究内容から、学位名称は博士（工学）が妥当であることを認める。

#### 最終試験の結果の要旨

審査委員会は学位申請者に対し、博士論文の内容および関連分野に関する口頭試問を実施した。その結果、学位申請者は広域環境保全工学、および化学工学を含む幅広い工学分野にわたる十分かつ高度な知識と理解力を有すると判断した。また、論文の全文を「iThenticate」にてチェックした結果、申請者の既発表論文内容との一致がみられた以外は、全て1%以下であり、剽窃は無いことを確認した。

以上から、学位申請者は博士（工学）の学位授与に値すると判断する。

なお、学位論文のインターネット公表については、一部の内容が学会誌の審査中であるものの、それ以外はすでに公表済みであり、権利関係等についても申請者と協議した結果、問題ないとの結論に至ったので、「全文」とする。

審査委員	工学専攻広域環境保全工学教育プログラム	教授	川越 保徳
審査委員	工学専攻物質生命化学教育プログラム	准教授	森村 茂
審査委員	工学専攻広域環境保全工学教育プログラム	助教	伊藤 紘晃
審査委員	工学専攻広域環境保全工学教育プログラム	教授	辻本 剛三