

飢餓状態により誘発される A/O-MBR における膜ファウリングの発生とその原因微生物の推定

長岡技術科学大学 学生会員 ○滝本祐也、石田孝弥、正会員 幡本将史 正会員 山口隆司

1. はじめに

膜分離活性汚泥法 (Membrane bioreactor: MBR) は従来の活性汚泥法と膜分離を組み合わせた排水処理方法の一つであり、高濃度の汚泥をリアクター内に保持できることから、高い処理性能を有していることが特徴である。単一槽で生物学的処理と完全な固液分離が可能のため、活性汚泥法の代替排水処理プロセスとして適用が進められている¹⁾。汚泥滞留時間 (solid retention time: SRT) は MBR において重要な運転パラメーターである。MBR の SRT は他の排水処理方法と比較して長時間に設定されているため、リアクターの保持汚泥濃度 (mixed liquor suspended solid: MLSS) を高く保つことが可能である。しかしながら、長い SRT は MBR 好気槽内の保持汚泥の微生物の自己溶解をもたらすことが報告されており^{2,3)}、深刻な膜の目詰まり (膜ファウリング) を誘発する可能性がある。極めて高濃度の MLSS は、結果的にリアクター内で低い feed/microorganisms (F/M) 比の環境となり飢餓状態に陥るため、溶菌が発生すると考えられる。したがって、溶菌は膜ファウリングの発生に甚大な影響を及ぼすことが考えられる。また、溶菌の発生による MBR の処理性能および微生物群集構造への影響に関する知見は限られている。そこで、本研究では MBR 反応槽内において、溶菌を誘発するために極めて低い有機物負荷で運転し、飢餓状態を再現した。さらに、再現性を得るために本研究では 2 系で同様の実験を行い、低有機物負荷運転開始後の MBR における処理性能と微生物群集構造の変化およびバイオフィーム内の微生物について調査した。

2. 実験方法

本研究では、2つの無酸素/好気 (anoxic/oxic: A/O) -MBR を用いた。装置は有効容積 6 L の無酸素槽と 6 L の好気槽から構成され、好気槽中に平膜 (平均孔径 0.2 μm の塩素化ポリエチレン製平膜) を浸漬させた (図 1)。流入水には都市下水の最初沈殿池越流水を用いた。2つの A/O-MBR は SRT60 日、水理的滞留時間 (hydraulic retention time: HRT) 8 時間で運転を開始し、有機物負荷 (organic loading rate: OLR) は $0.42 \text{ kg-COD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$ とした。MBR の運転が安定した後、膜透過水を無酸素槽に再供給し、低負荷条件 (OLR: $0.002 \text{ kg-COD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$) として運転を開始した。処理性能の評価として、サンプルの化学的酸素要求量 (COD)、全有機炭素 (TOC)、タンパク質・糖、全窒素 (TN)、全リン (TP)、硝酸性窒素 (NO_3^- -N)、アンモニア性窒素 (NH_4^+ -N)、MLSS、膜間差圧 (trans-membrane pressure: TMP)、30 分膜透過流量を測定した。微生物群集構造解析には、好気槽内汚泥 (AS) およびバイオフィームを用いて 16S rRNA 遺伝子を対象に V4 領域を含む 515F および 806R のユニバーサルプライマーを用いて PCR を行い、MiSeq にて解析を行った。本研究では、膜ファウリング発生後に膜に付着した汚泥ケーキ層 (MS) の下層に存在する、強く膜に付着した層をバイオフィーム (BF) と定義した。

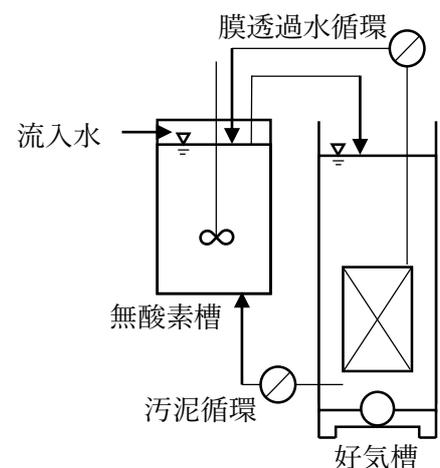


図 1 装置概要図

キーワード：低有機物負荷運転、溶菌、バイオフィーム、16S rRNA 遺伝子解析

連絡先：〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1 長岡技術科学大学 水圏土壌環境研究室 TEL: 0258-47-9612

3. 実験結果および考察

A/O-MBR の膜ファウリング進行度は、経時変化における TMP とフラックスで評価した (図 2)。各リアクターで低負荷運転開始から TMP が徐々に上昇し、flux の低下が確認された。運転開始 16 日目に膜上にバイオフィルムの生成が確認され、21 日目には TMP は 90 MPa に到達した。TN および TP はリアクター内に蓄積しており、同時に MLSS 濃度は減少し続けたため、極めて低負荷の運転に伴う溶菌に由来するものであると考えられた。さらに、各リアクター内のタンパク質および糖 (LB-EPS; loose bond-EPS) 濃度は低負荷運転開始時の 17.8 および 15.3 mg/L から 40.1 および 43.1 mg/L にそれぞれ上昇した。タンパク質および糖はバイオフィルムの主要な構成物質であり、膜への付着による膜ファウリングの原因物質とされる⁴⁾。したがって、溶菌に伴う好気槽内の EPS の蓄積によって、早期のバイオフィルム形成および重度の膜ファウリングを引き起こす可能性が示唆された。好気槽内の微生物群集構造解析では、初期 AS に比べ最終 AS で細菌の多様性が減少し、Bacteroidetes 門の存在割合が減少する傾向にあった (図 3)。細菌叢が飢餓の影響を受け、特に Bacteroidetes 門に属する細菌が死滅したことが示唆された。一方で膜ファウリングに関与する微生物として報告されている Gammaproteobacteria 綱の存在割合が最終 AS で増加する傾向にあった。また、最終 BF における細菌の多様性は最終 AS よりも低く、BF 中の OD1 門および TM6 門細菌の存在割合は増加する傾向にあった。BF の上層に位置する MS サンプルでは Firmicutes 門の存在割合が増加する一方で BF と比較して OD1 門細菌の存在割合が減少していた。従って、BF 中で優占した OD1 門細菌はバイオフィルムを形成するうえで重要な役割を担う細菌種である可能性が示唆された。

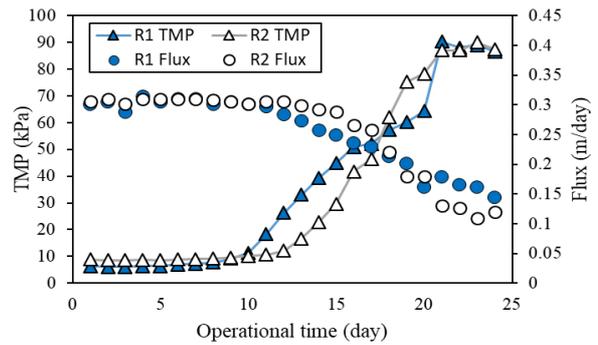


図 2 各リアクターの TMP および flux の経時変化

また、最終 BF における細菌の多様性は最終 AS よりも低く、BF 中の OD1 門および TM6 門細菌の存在割合は増加する傾向にあった。BF の上層に位置する MS サンプルでは Firmicutes 門の存在割合が増加する一方で BF と比較して OD1 門細菌の存在割合が減少していた。従って、BF 中で優占した OD1 門細菌はバイオフィルムを形成するうえで重要な役割を担う細菌種である可能性が示唆された。

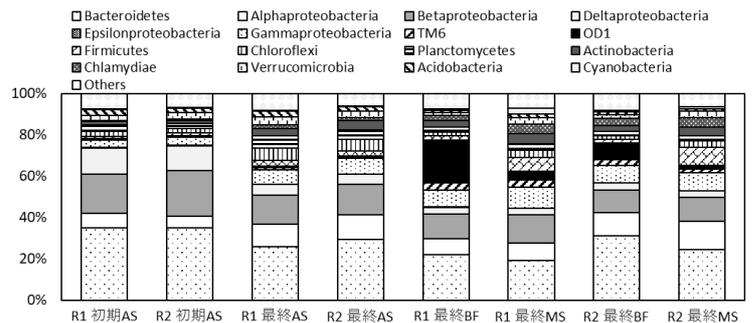


図 3 MBR 好気槽汚泥 (AS)、汚泥ケーキ層 (MS) および膜面バイオフィルム (BF) の微生物解析結果

4. まとめ

A/O-MBR の極めて低負荷の運転によって溶菌の発生が確認され、非常に早期の膜ファウリング発生に寄与したことが示唆された。また、膜ファウリングの原因物質である可能性の高い EPS の濃度が好気槽内汚泥において増加することがわかった。飢餓状態によって、好気槽内汚泥中の細菌の多様性は減少し、Bacteroidetes 門をはじめとする細菌種が溶菌したことが示唆された。一方で、OD1 門細菌の存在割合はバイオフィルム中で増加し、強固なバイオフィルム形成に寄与したのではないかと考えられた。

参考文献

1) Meng et al., 2017. *Water research*, 114, 151-180.; 2) Wu et al., 2011. *Bioresource technology*, 102(3), 2511-2516.; 3) Wu et al., 2011. *Bioresource technology*, 102(9), 5375-5380.; 4) Lawrence et al., 2003. *Applied and environmental microbiology*, 69(9), 5543-5554.

謝辞 本研究の実施にあたって、長岡中央下水処理場には研究実施場所を提供頂いた。ここに感謝の意を記す。