

膜分離活性汚泥法 (MBR) における電場利用型ファウリング防止技術に関する研究

Study on fouling suppression using electric field in membrane bioreactor (MBR)

工学院大学先進工学部環境化学科 准教授 赤松 憲樹

(研究計画ないし研究手法の概略)

膜分離活性汚泥法 (MBR; Membrane Bio-Reactor) は、標準活性汚泥法においては沈殿池で行う処理水と汚泥フロックの固液分離を、膜で行うものであり、省スペースで高度な処理水質を達成できる。しかし、MBRは標準活性汚泥法と比較してエネルギー消費が大きい。これは膜のファウリング (細孔の目詰まりなどの膜性能を低下させる現象) を防止するための曝気動力が非常に大きいためであり、標準活性汚泥法における下排水処理と同等のエネルギー消費を実現するためには、曝気動力を半分以上にすることが必要と指摘されている。本研究では、MBRにおいて、ファウリング防止のための曝気洗浄を行う必要がない、電場を利用した新しいファウリング防止技術の開発を目指した。汚泥やMBR槽内に存在する有機物のほとんどが負に帯電していることから、図1に示すように、膜面に電場を印加することで静電的な反撥力を作用させ膜面への堆積を抑制することができる。我々の試算によれば、この電場洗浄技術を採用することで、現状のMBRの所要動力を40%以上削減できる。MBRにおけるファウリング防止に電場を利用するという提案は極めて独創的であり、ほとんど研究例がない。我々は既に、汚泥ろ過に際し電場を利用することでファウリングが低減できることは示しているが、MBR中のファウリング候補物質は多岐にわたり、電場印加によるファウリング抑制メカニズムを理解するには至っていない。

そこで本研究では、濃縮した活性汚泥とその上澄み液、さらにファウリング候補物質としてタンパクである bovine serum albumin (BSA)、多糖であるアルギン酸、さらにフミン酸を用いてろ過試験を行い、さらに電場印加がファウリング抑制に与える影響を詳細に検討した。

図2に示す電場印加ろ過試験装置を自作し評価を行った。膜は細孔径 $0.25 \mu\text{m}$ の精密ろ過膜を用いた。ろ過は水頭差を与えてサイフォン方式で行った。汚泥は膜槽上部

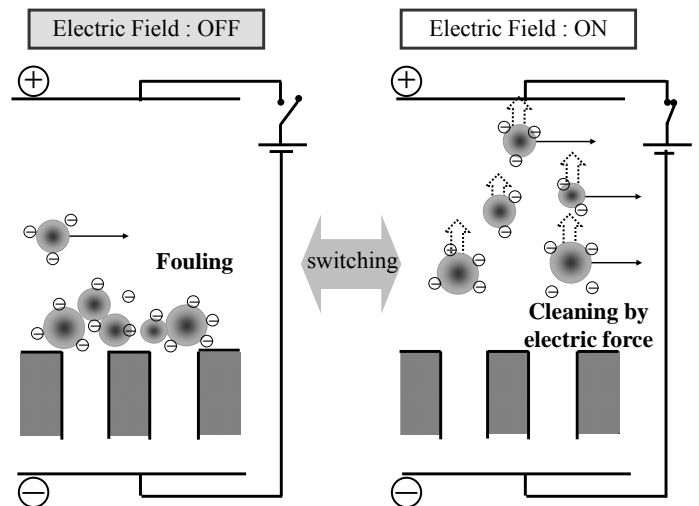


図1. 電場利用型ファウリング防止技術のコンセプト

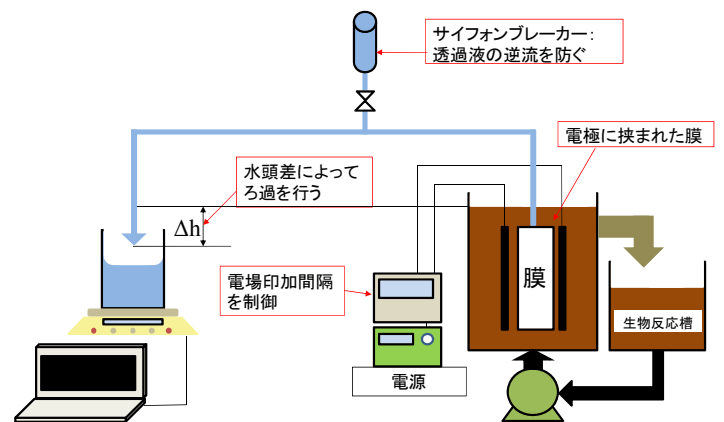


図2. 電場利用型ファウリング防止MBR評価装置

から生物反応槽へオーバーフローで循環し、マグネットポンプを用いて膜槽底部へ供給した。電場の印加は直流電源を用い、間欠的な電場の印加も可能とした。また水の電気分解が起これ試験途中でろ過ができなくなることを避けるため、サイフォンブレイカーを設置した。

(実験調査によって得られた新しい知見)

1. 濃縮汚泥および汚泥上澄み液を用いた電場印加ろ過試験

MLSS 6400の汚泥を濃縮しMLSS 11400とした濃縮汚泥と、この上澄み液を用いて電場印加ろ過試験を行った。初期フラックスが $2.0 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ となるように圧力を調整した。また電場印加モードは30分ON→30分OFF→1分ON-1分OFFの間欠印加を2時間→30分OFF→30分ONであり、電場強度は 10 V cm^{-1} とした。それぞれのフラックスの経時変化を図3に示す。濃縮汚泥の場合、電場を連続で印加している最初の条件でもフラックスは低下したが30分後には $5.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ でほぼ安定した。その後、電場印加を止めるとすぐにフラックスが低下し $3.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ で安定した。この後に1分間隔で電場のON-OFFを繰り返す間欠電場印加を行うと、電場がONのときにはフラックスはほぼ $5 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ で、電場がOFFのときにはフラックスはほぼ $3 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であり、これは連続電場印加のときの定常フラックスとほぼ同じであった。すなわち電場印加に対するフラックスの応答は非常に速いと言える。さらにその後に電場を印加しない状況ではフラックスは $1.7 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であり、電場を印加した条件ではフラックスは $4.1 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。これは間欠電場印加の前のそれぞれの条件における定常フラックスより少し小さな値となっており、電場では除去しにくい細孔内部のファウリングがわずかに進行したためであると推察される。

上澄み液を用いた場合のそれぞれの電場印加状態での定常フラックスは、濃縮汚泥を用いた場合と比べてわずかに高かったが、定常フラックスの挙動は、連続電場・間欠電場に対する応答も含めて、濃縮汚泥の場合のそれとほぼ同じであった。

それぞれのろ過試験後の膜表面の様子を図4に示す。濃縮汚泥を用いた場合は、汚泥が膜面に堆積している様子が確認される。一方で上澄み液を用いた場合は、膜面がわずかに汚れている

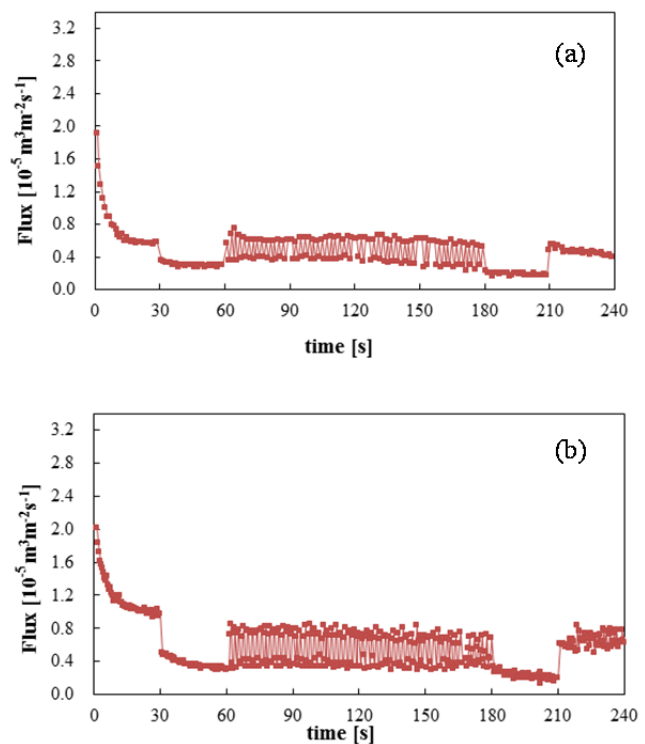


図3. 電場印加に対するフラックスの応答 (フィード：(a)濃縮汚泥, (b)汚泥上澄み液)

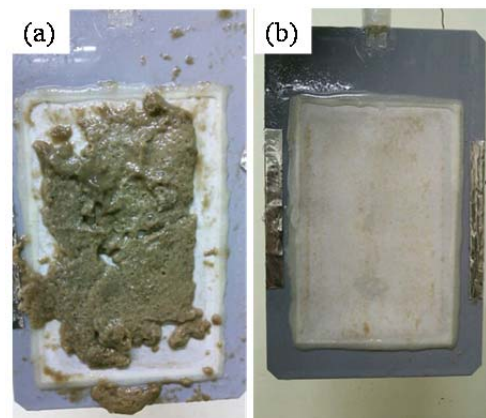


図4. ろ過試験後の膜表面の様子

(フィード：(a)濃縮汚泥, (b)汚泥上澄み液)

それぞれのろ過試験後の膜表面の様子を図4に示す。濃縮汚泥を用いた場合は、汚泥が膜面に堆積している様子が確認される。一方で上澄み液を用いた場合は、膜面がわずかに汚れている

様子が確認される。このように膜表面の様子は大きく異なるものの、図3に示すようにフラックスの挙動はほぼ同じであったことから、MBRのファウリングの主要な成分は、粒子状の汚泥自身ではなく、水溶性の高分子状の物質であることが推察される。すなわち、MBRのファウリングにおいては、高分子成分に対する対策を取るべき可能性が示唆された。

2. BSA・アルギン酸・フミン酸を用いた電場印加ろ過試験

フィードのBSA、アルギン酸、フミン酸の濃度はそれぞれ2500ppm、2000ppm、10ppmであり、電場強度と電場印加モードは上記実験と同じ条件でろ過試験を行った。それぞれのフラックスの経時変化を図5に示す。初期フラックスの調整が難しく少しフラックスが安定していないケースが見られるものの、全般的に電場を印加することでフラックスが回復していることが分かる。注目すべきはアルギン酸を用いた場合は電場を印加しないと著しくフラックスが低下する点である。これはアルギン酸の濃度や膜の素材、細孔径などさまざまな因子が関係すると考えられるが、今回の条件ではアルギン酸のファウリングが顕著に見られた。

アルギン酸2000ppmとフミン酸10ppmの混合液をフィードとし、同様のろ過実験を行った際のフラックスの経時変化を図6に示す。アルギン酸単独、あるいはフミン酸単独の場合と比較して、混合溶液を用いた場合は電場を印加した状態でも徐々にフラックスが低下する様子が認められた。このような負のシナジー効果はいくつか報告されており、これらに対し電場印加はファウリング抑制に一定の効果をもたらすが、完全にファウリング抑制を実現するには至っていない。今後は、これらの混合系に対する検討や、膜自体に耐ファウリング性を有する場合の電場印加の効果の検討を行う必要がある。

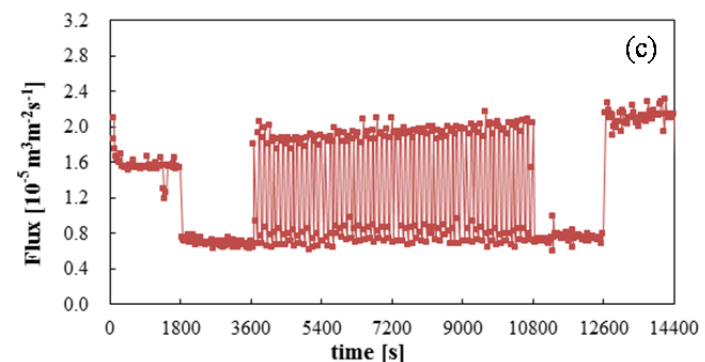
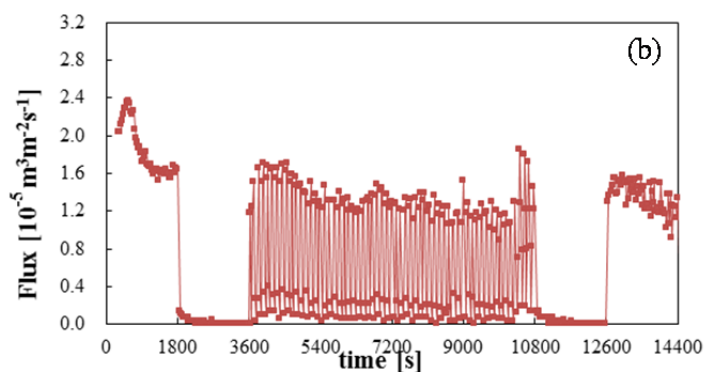
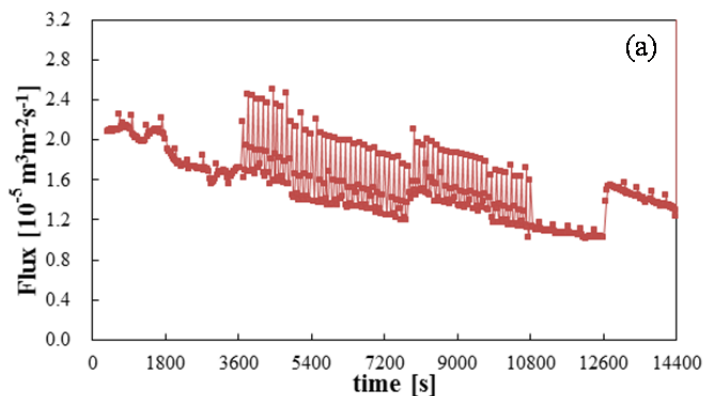


図5. 電場印加に対するフラックスの応答

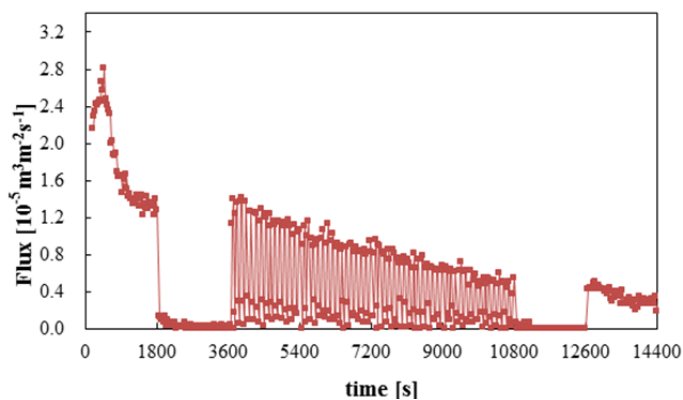


図6. アルギン酸とフミン酸を混合した溶液を用いたときの電場印加に対するフラックスの応答

(発 表 論 文)

1. 赤松憲樹, 水処理における膜技術とファウリング抑制(依頼講演), 第85回武蔵野地区高分子懇話会, 2016年11月, 東京
 2. 赤松憲樹, クロスフロー精密ろ過における粒子ファウリングの抑制(依頼講演), 膜ファウリング研究会, 2017年1月, 広島
- 現在, 学術論文1報を執筆計画中.