

オゾン水で膜を洗浄する膜分離バイオリアクタの膜面曝気風量最適化

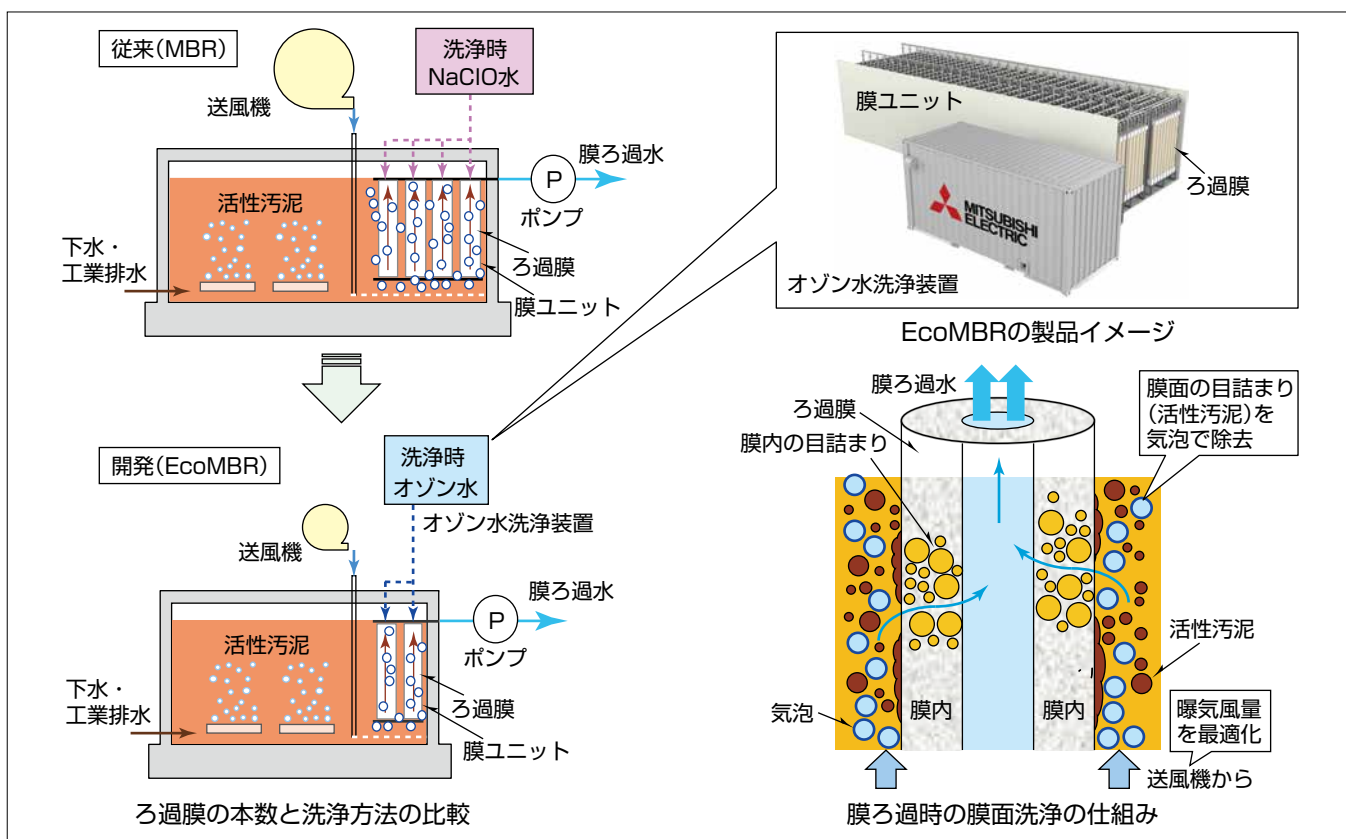
安永 望* 林 佳史***
後藤伸介**
今村英二***

Optimization of Membrane Scouring in Membrane Bioreactor with Cleaning Membranes by Ozonated Water
Nozomu Yasunaga, Shinsuke Goto, Eiji Imamura, Yoshifumi Hayashi

要 旨

水質規制の強化や再生水の需要増大によって、従来の標準活性汚泥法より処理水質が良好な膜分離バイオリアクタ (Membrane BioReactor : MBR) の下水・工業排水処理への適用が世界的に広がっている。しかし、MBRは膜面に付着する活性汚泥を剥離するために常時行う膜面曝気(ばっき)の消費エネルギーが大きく、省エネルギー化が課題である。さらに、下水・工業排水の流入負荷変動や生物処理の運転条件変更等で活性汚泥の性状が変化することによって、ろ過膜の目詰まりのしやすさ、すなわち膜ろ過性能も変化する。そのため、膜ろ過性能を最適化してMBRを省エネルギーかつ安定して運転するために、活性汚泥の性状に応じて最適な膜面曝気風量で供給することが重要である。

三菱電機の“EcoMBR”は、NaClO(次亜塩素酸ナトリウム)水の代わりにオゾン水(洗浄力の大きいオゾンガスを溶解させた水)を用いてろ過膜を洗浄することで、従来のMBRよりも2倍以上に膜ろ過速度を高め、ろ過膜の本数を低減して膜面洗浄用の曝気風量を削減する省エネルギー型水処理装置である。さらに、バイオリアクタ内の活性汚泥の性状に応じて膜面曝気風量を最適化するEcoMBRを開発中である。実排水を用いた小規模実験では膜面曝気風量を11%削減できることを検証した。今後はこの制御手法を搭載したEcoMBRを実用化し、豊かな水循環社会の実現に貢献していく。



EcoMBRの特長

EcoMBRは膜内洗浄剤として洗浄力の大きいオゾン水を使用するため、膜ろ過面積当たりの膜ろ過水の流量を大きくしても目詰まりを解消可能である。これによって、ろ過膜の本数を低減し、膜面の洗浄に必要な膜面曝気風量を削減することで省エネルギー、省スペース、及びメンテナンス性向上を実現する。さらに活性汚泥の性状に応じた膜面曝気風量制御の適用で省エネルギー性をさらに向上させる。

1. ま え が き

1.1 MBRとEcoMBR

膜分離バイオリアクタ(MBR)は、流入水中の有機物を微生物である活性汚泥で除去し、膜ユニットで処理すなわち膜ろ過水と活性汚泥を分離する水再利用装置である。従来の活性汚泥法と比較すると、膜で活性汚泥と膜ろ過水を分離することから、処理水に浮遊物質が含まれず、再利用に適した処理水が得られる。さらに活性汚泥法では最終沈殿池で時間をかけて活性汚泥を沈降させて処理水と分離するが、MBRではろ過膜で活性汚泥と処理水を分離するため最終沈殿池が不要となり、処理に必要な装置面積を低減できる。これらの利点から、現在は下水・工業排水の再利用処理に広く活用されている。

しかしMBRは膜処理のため、活性汚泥による膜面及び膜内の目詰まり対策が必要である。通常、膜面の目詰まりに対しては膜ユニット下部から送風機で曝気して除去する。そのため膜面は常時曝気されており、その消費電力量はポンプ等の他の機器の消費電力量よりも大きくなる傾向がある。一方、膜内の目詰まりはNaClO水等の洗浄水をろ過時と反対方向に注水することによって除去する。

当社は、NaClO水の代わりにそれよりも酸化力の強いオゾン水でろ過膜を洗浄するEcoMBRを実証実験中である。オゾン水を使用することで従来よりもろ過膜内の洗浄力が高められ、十分に膜内の目詰まりを解消できる。よって、膜1本当たりの膜ろ過水量を増大できるためにろ過膜

の本数が低減し、NaClO水での洗浄に比べて膜面曝気風量を削減したMBRの運転が可能になる⁽¹⁾。

1.2 EcoMBRのシステム構成

図1にEcoMBRのシステム構成を示す。EcoMBRは膜ろ過と膜面洗浄及び膜内洗浄を繰り返しながら運転する。次にこのシステムの動作フローについて述べる。

(1) 膜ろ過と膜面洗浄

膜ろ過を継続すると、徐々に膜面及び膜内が目詰まりするが、常時、膜面曝気(図1の①)することで膜面の活性汚泥を剥離して目詰まりを抑制できる。一方で活性汚泥中の有機物等が徐々に膜内に蓄積し、目詰まりが進行することによって膜内の目詰まりを示す指標である膜間差圧が上昇する。

(2) 膜内洗浄

膜間差圧が所定値に達すると、一旦膜ろ過を停止して、膜内洗浄に切り替える。オゾン水による膜内洗浄では、膜ろ過水の一部をオゾン水タンクに引き込み(図1の③)、オゾンガスをオゾン水タンクに注入して(図1の④)オゾン水を生成する。続いて、膜ろ過とは反対方向からオゾン水を膜装置に注入し(図1の⑤)、オゾン水で膜内の目詰まり物質を酸化させることで膜内を洗浄する。膜内の洗浄完了後、膜ろ過を再開し、これらを繰り返してEcoMBRの運転を継続する。

1.3 EcoMBRのユーザーメリット

EcoMBRはオゾン水でろ過膜を洗浄する省エネルギー型MBRであり、そのユーザーメリットは次の3点である⁽¹⁾。

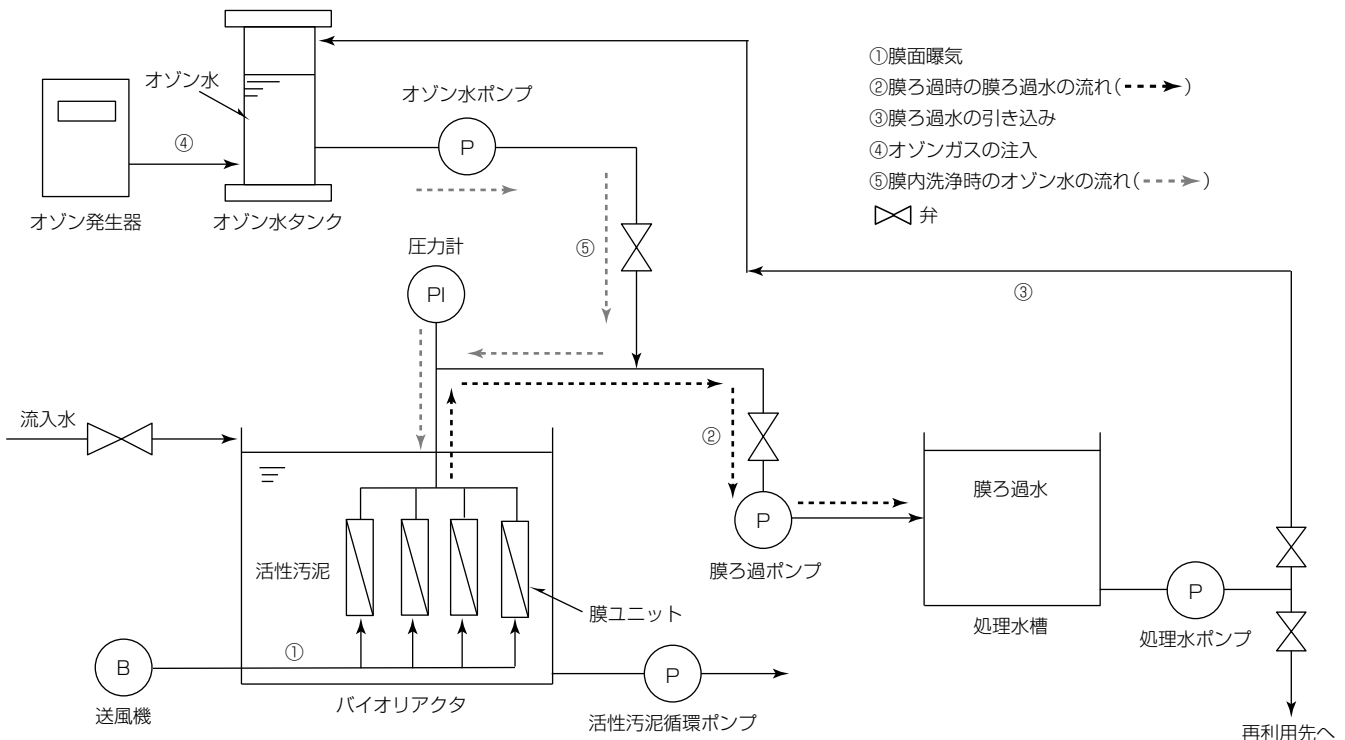


図1. EcoMBRのシステム構成

(1) 省エネルギー

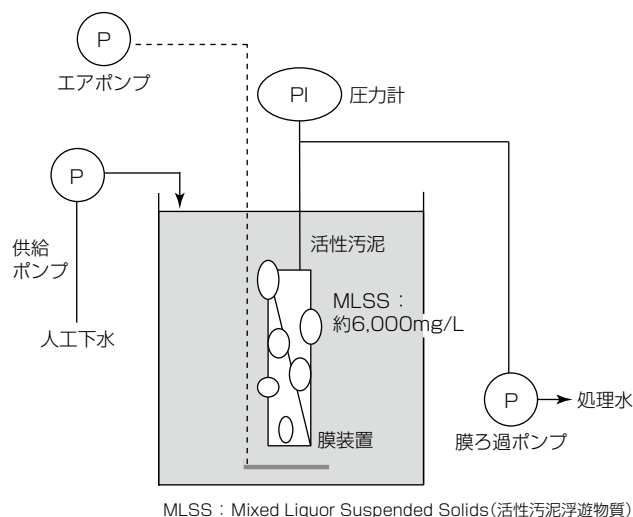
従来のMBRと比較して膜面曝気風量の削減による送風機電力の低減量が大きいため、オゾン水生成に必要な電力が増加するもののトータルで約25%省エネルギー化できる。

(2) 省スペース

高い洗浄力を持つオゾン水を使用することで膜1本当たりの膜ろ過水量を増大でき、その結果、膜本数を半分に削減することによって膜ユニットの設置面積を50%低減できる。

(3) メンテナンス性向上

高い洗浄力を持つオゾン水の使用による膜内洗浄時間短縮や、膜ユニット削減によるろ過膜の定期交換作業時間の削減が期待できる。



MLSS : Mixed Liquor Suspended Solids (活性汚泥浮遊物質)

図2. 試験装置の模式図

2. 膜面曝気風量の最適化

2.1 負荷変動に対応した膜面曝気風量制御

下水や工業排水の水質と水量は時々刻々と変動する。MBRはバイオリアクタ内の活性汚泥によって処理するため、水質や水量変動によって活性汚泥の性状が変化。その結果、膜ろ過性能(膜ろ過のしやすさ)の変動は避けられない。したがってMBRを安定して運転するためには、膜ろ過性能の変動に対応して膜面から常時、活性汚泥を剥離できる膜面曝気風量を適切に供給する必要がある。

当社はこの課題を解決するため、膜面洗浄用の曝気風量の最適化について検討した。先に述べたとおり、MBRの膜面曝気は常時行う必要があるため、消費電力量が大きい。そのため処理水質の悪化を想定し、過剰な膜面曝気風量で運転した場合、消費電力量が非常に大きくなる。一方、過少な膜面曝気風量で運転した場合、膜面から十分に活性汚泥を剥離できず、膜面が閉塞して膜ろ過を継続できなくなる。したがって、流入水の負荷変動によって変化する活性汚泥の性状に合わせて膜面曝気風量を適切に制御する必要がある。

当社は省エネルギー性を更に増大させるため、流入水の負荷変動等による活性汚泥の性状の変化に応じて膜面曝気風量を最適化する制御手法を開発中である。

2.2 膜面曝気風量の制御アルゴリズム

膜ろ過時は活性汚泥によって膜面が目詰まりしないよう、常時、膜面曝気を実施している。そこで、膜面曝気風量をパラメータとした場合の膜間差圧の変化を分析し、その結果から膜間差圧の上昇を抑制するために必要な膜面曝気風量を探索する制御アルゴリズムを開発した。

(1) 膜面曝気風量と膜間差圧上昇速度の関係

図2に示す試験装置を用いて膜面曝気風量と膜間差圧との関係を調査した。PVDF(ポリフッ化ビニリデン)製の小型中空糸ろ過膜(ろ過面積0.1m²)1本を用いて、流束(単位膜面積当たりのろ過流量)1.4m³/日で人工下水を流入水

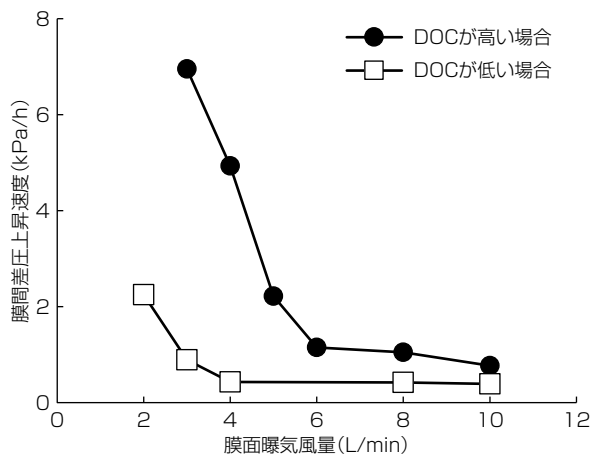


図3. 膜面曝気風量に対する膜間差圧上昇速度の変化

としてMBRを運転しながら膜面曝気風量を変化させて膜間差圧の変動を評価した。活性汚泥の性状の違いによる影響を確認するため、DOC(Dissolved Organic Carbon : 溶解性有機物)低(16mg/L)と高(35mg/L)の2条件で実施した。

膜面曝気風量と膜間差圧上昇速度の関係を図3に示す。膜面曝気風量を増加させると急速に膜間差圧上昇速度が減少し、DOCによらずある膜面曝気風量の値から膜間差圧上昇速度が一定となった。すなわち、膜間差圧上昇速度を低く保つために必要な最小膜面曝気風量が存在することを確認できた。さらに最小膜面曝気風量は、DOCが高い場合は6 L/min、DOCが低い場合は4 L/minとなり、DOCが高い方が最小曝気風量の値が大きかった。これは活性汚泥の性状が悪化、すなわちMBRの水処理性能が低下してDOCが高くなった場合、活性汚泥が膜面から曝気によって剥離しにくくなったためと推測される。

(2) 膜面曝気風量の制御アルゴリズム

(1)の検討結果から、曝気風量を低減すると膜間差圧が急上昇する曝気風量の値が存在することが分かった。これに

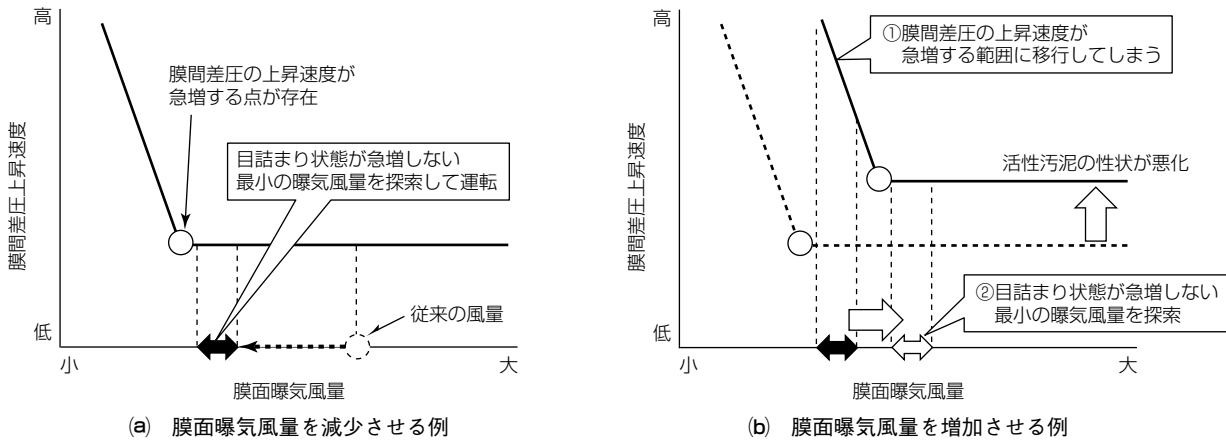


図4. 膜面曝気風量の制御方法

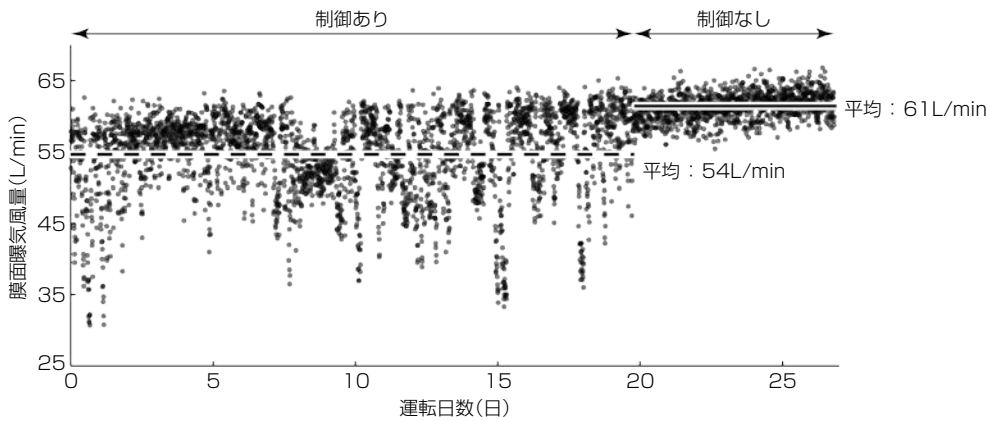


図5. 膜面曝気風量の経日変化

よって膜面曝気風量制御アルゴリズムとして、膜間差圧上昇速度を入力項目として最小膜面曝気風量を決定できると考えられた。

例えば図4(a)に示すように、膜間差圧上昇速度の変化を常時監視しながら現状の膜面曝気風量を逐次的に下げ、膜間差圧上昇速度が急上昇する膜面曝気風量の近傍を見つけることで、それよりも大きい風量を目詰まりしにくい最小の曝気風量として探し出すことができる。

膜間差圧上昇速度を監視していなかった場合、図4(b)に示すように活性汚泥の性状が悪化すると膜面曝気風量が不足する状態になり、膜間差圧上昇速度が急上昇する可能性がある(図4(b)の①)。そうなるとろ過膜が急速に目詰まりして膜ろ過処理を継続できず、MBRが処理不能に陥ってしまう。そこで、この制御アルゴリズムを使用することで目詰まり状態が急増しない最小の曝気風量を探索して運転することが可能になる(図4(b)の②)。

以上の制御アルゴリズムによって、膜間差圧上昇速度を常時監視しつつ、活性汚泥の性状に合わせて必要最小限の膜面曝気風量に制御することで省エネルギーかつ安定してMBRの運転ができる。

2.3 膜面曝気風量制御の実排水での検証

液晶ディスプレイ工場の有機排水を流入水としたMBR

の小規模実験で、先に述べた膜面曝気風量制御性能を検証した結果を図5に示す。この実験ではPVDF製の小型中空糸ろ過膜(膜ろ過面積0.5m²)5本を用いて、流束0.55m³/日で運転した。膜面曝気風量制御の実施有無の両条件で、膜間差圧の上昇傾向が等しくなるようMBRを運転した結果、膜面曝気風量を制御しなかった場合は55~67L/min(平均61L/min)であったのに対し、膜面曝気風量を制御した場合は30~65L/min(平均54L/min)と膜面曝気風量は活性汚泥の性状に追従して変動した。その結果、膜面曝気風量を制御することで、制御しなかった場合と比較して膜面曝気風量を平均値で11%低減できた。

3. む す び

流入水の負荷変動等による活性汚泥性状の変動に応じて膜面曝気風量を最適化する制御方法について述べた。今後は、実規模スケールの実証試験を実施してEcoMBRの実用化を目指す。

参 考 文 献

- (1) 安永 望, ほか: 下水・工業排水処理向け省エネルギー・省スペース型膜分離バイオリアクタ“EcoMBR”, 三菱電機技報, 91, No.9, 508~511 (2017)