

## 〈研究発表〉

### セラミック平膜を用いた膜分離活性汚泥法の運転条件最適化

打林 真梨絵<sup>1)</sup>, 豊岡 和宏<sup>1)</sup>, 新井 喜明<sup>1)</sup>, 宮崎 好弘<sup>2)</sup>  
佐野 勇<sup>2)</sup>, 山下 喬子<sup>3)</sup>, 橋本 敏一<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> ㈱明電舎 (〒141-8616 東京都品川区大崎 5-5-5 E-mail: uchibayashi-m@mb.meidensha.co.jp)

<sup>2)</sup> 飯能市 (〒375-8501 埼玉県飯能市大字双柳 1-1)

<sup>3)</sup> 日本下水道事業団 (〒113-0034 東京都文京区湯島 2-31-27 湯島台ビル)

#### 概要

膜分離活性汚泥法の導入促進を図る上で、中大規模の合流式下水道への適用と省エネが課題となっている。これらの課題解決に向けて、2012年度より飯能市と㈱明電舎は日本下水道事業団との共同研究を実施している。本研究では合流式下水道施設への適応手法の確立と、処理水量1 m<sup>3</sup>あたりの消費電力量0.4 kWh以下の達成を目標としている。2014年度より、雨天時合流下水の流量増大を模擬した処理流量変動実験による膜差圧の挙動評価と、膜洗浄風量削減などによる省エネ化の検討を行ってきた。本稿ではこれまでに得られた知見を報告する。

キーワード：セラミック平膜、膜分離活性汚泥法 (MBR)、合流式下水道、省エネ  
原稿受付 2015.7.3

EICA: 20(2・3) 36-39

## 1. はじめに

膜分離活性汚泥法 (以下、MBR: Membrane Bioreactor) は、活性汚泥法による生物処理に膜ろ過を組み合わせた排水処理である。MBRは、固液分離を膜ろ過で行うため、固形分の流出の懸念がなくなり活性汚泥の管理が容易である。また、反応タンクの高 MLSS 運転が可能であること、最終沈殿池が不要で省スペース化できること、処理水に大腸菌がほとんど検出されないなどの利点を持つ。しかし、更なる MBR の導入促進を図る上で、消費エネルギーの削減や中・大規模の下水処理場に多い合流式下水道への適応が課題となっている。これらの課題解決にむけて、著者らは2012年度より共同研究「膜分離活性汚泥法の導入促進に向けた技術開発——セラミック平膜を用いた浸漬型 MBR の省エネルギー化・合流対応の検討——」を実施している<sup>1)</sup>。本研究では、セラミック平膜を用いた浸漬型 MBR について、処理水量1 m<sup>3</sup>あたりの消費電力0.4 kWh以下を目指した省エネルギー化ならびに合流式下水道への適用手法の確立を目的としている。

本稿では、上記目標に向けて MBR の運転条件の基礎的研究を行った結果を報告する。省エネルギー化については、消費エネルギーに寄与の大きい膜洗浄風量の低減時の MBR 運転の安定性を、合流式下水道への適用については、フラックスの増大時の MBR 運転の安定性を検証した。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験プラント仕様

一部合流式下水道施設である飯能市浄化センター (埼玉県) 内にセラミック平膜を用いた MBR の実験プラントを設置した。Fig. 1 に実験プラントのフローを、Table 1 に実験プラントの仕様を示す。

#### (1) 概要

プラントの処理水量は30 m<sup>3</sup>/日である。反応タンクは無酸素タンクと好気タンクに分かれており、循環式硝化脱窒法を採用している。膜ろ過ユニットは好気タンクに2ユニット浸漬させている。また、実験には実下水を使用している。

#### (2) 基本条件

本実験プラントでは、飯能市浄化センターの日間変動を模擬し、基本フラックス (変動比=1) を0.54 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>・日) として Fig. 2 のようにフラックスを変動させた。

連続運転中の膜洗浄方法には「曝気洗浄」と「逆圧洗浄 (逆洗)」の2つがある。

「曝気洗浄」はろ過処理中に膜ユニット下方から粗大気泡を供給し、気泡を膜表面に接触させながら浮上させることで膜表面へのファウリング物質付着の抑制を図るもので、MBR では一般的に用いられている方法である。このため、膜洗浄には酸素の溶解・供給を目的とした曝気ブロウとは独立したブロウを用いる。

「逆圧洗浄」とは、ろ過水を一時的に逆流させるこ

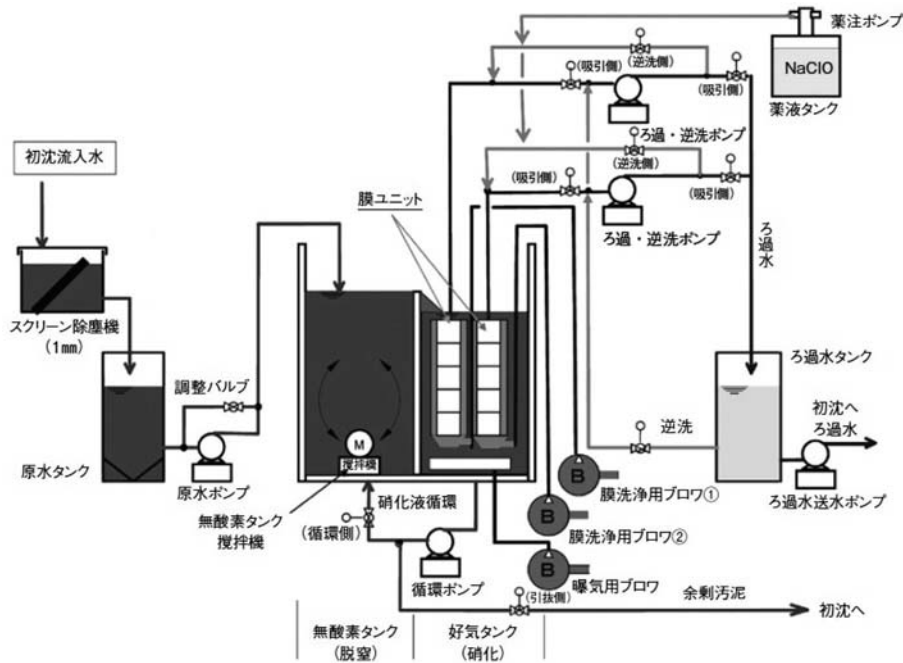


Fig. 1 プラントフロー

Table 1 実験プラント仕様

プラント原水		最初沈殿池流出水
生物処理方法		循環式硝化脱窒法
運転条件 (基本条件)	フラックス	0.54 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ・日)
	MLSS 濃度	8,000 mg/L
	膜洗浄風量	4 NL/(min・m <sup>2</sup> -膜面積)
	インライン洗浄	1 回/週
	循環比	3
膜仕様	種類	精密ろ過膜 (MF 膜)
	素材	セラミックス
	形状	平膜
	公称孔径	0.1 μm

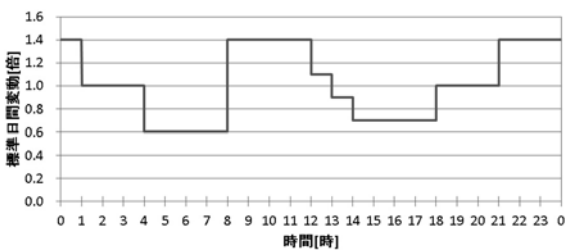


Fig. 2 日間流量変動パターン

とにより膜面の付着物質を除去する方法であり、ろ過膜の閉塞および狭窄の回復を図る。これは、セラミック膜の物理的な強度を活かした洗浄方法である。

また、膜のファウリング防止・洗浄のため、これら2つの洗浄方法に加え、1週間に1回 1,000 mg/L の次亜塩素酸ナトリウム水溶液でインラインでの薬液洗浄を行っている。

実験プラントの運転膜差圧の限界値は、実験プラントの装置の運転限界値を考慮して運転膜差圧の限界値

を 30 kPa とし、これを超えた際は強制的にインライン洗浄を行った。膜差圧上昇速度に関しては、フラックスの日間変動において、基本フラックスに対する変動比が最大の 1.4 倍 (0.76 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>・日)) となった際の膜差圧がインライン洗浄直後に 10 kPa であること、運転限界値が 30 kPa であること、インライン洗浄の頻度 (1 回/週) より 2.8 kPa/日 を限界値と定めた。

### (3) 膜仕様

使用しているセラミック平膜は透過性のよいセラミック支持体の表面にアルミナを主成分とするろ過膜を厚さ数十 μm で積層させた二層構造で、外周表面がすべてろ過膜として機能している。内部にチューブ状の空洞があり、これが集水路として機能する。このセラミック平膜全体を活性汚泥中に浸漬し、集水路に集水管をつないで取水口を取り付け、ポンプで吸引ろ過する。膜の孔径は、一般の細菌 (1~2 μm) より小さい 0.1 μm で、ろ過水の性状は浮遊物質が 1 mg/L (検出限界) 未満、大腸菌群数は不検出と安定した水質が得られている<sup>2)</sup>。

さらに、セラミック平膜は膜表面が滑らかで汚泥が付着しにくく、はがれやすい。また、セラミック平膜およびユニットの構造が堅固なため、膜洗浄気泡のせん断力をセラミック膜面に効率よく伝えることができる。したがって、比較的低風量できょう雑物や汚泥の付着の防止と付着物の除去ができる。このため、省エネルギー効果が期待できる。

次に、物理的に堅ろうで有機膜と比べて膜の破損が少なく、化学的に安定しており、膜洗浄処理に伴う薬液の接触を繰り返しても強度劣化が少ないため、膜エ

レメントは長寿命である。また、保存に特殊な配慮（保存液への浸漬など）が不要であり、乾燥状態での長期保存が可能である。

## 2.2 実験条件

### (1) 膜洗浄風量最低化の検討実験

消費エネルギーに最も寄与の大きい膜洗浄風量の低減を目的とした運転条件の検討を行った。膜洗浄風量以外の運転条件は基本条件とし、膜洗浄風量を基本条件の75% ( $3 \text{ NL}/(\text{min} \cdot \text{m}^2 - \text{膜面積})$ ) に削減する「膜洗浄風量削減実験」と、10分間の内8分間を基本条件の75% ( $3 \text{ NL}/(\text{min} \cdot \text{m}^2 - \text{膜面積})$ ) に削減し、残り2分間を基本条件の125% ( $5 \text{ NL}/(\text{min} \cdot \text{m}^2 - \text{膜面積})$ ) とする「断続膜洗浄実験」を行った。断続膜洗浄の際、平均風量は基本条件の85% ( $3.4 \text{ NL}/(\text{min} \cdot \text{m}^2 - \text{膜面積})$ ) に削減できる。

実験中の膜差圧の変化率、ならびに実験後のインライン薬液洗浄による膜差圧の回復状況を確認した。なお、各実験前にはインライン薬液洗浄を行い、初期条件を合わせた。

### (2) 処理流量増大運転実験

長時間の降雨を想定したフラックス2倍で24時間の連続運転を行うパターン1と、フラックスを基本条件の3倍とし、4時間の連続運転を週2回（火、金曜）行うパターン2を行った。また、処理流量増大時の生物処理機能への影響を確認するため、パターン1では実験直前・実験開始2時間後・実験終了2時間前・実験終了1時間後、パターン2では実験直前・実験開始2時間後（実験中）・実験終了1時間後（実験後）の好気タンク内汚泥およびろ過水質を分析した。ろ過性能の指標としてはろ紙ろ過量（50 mLの活性汚泥をろ紙（5種C(JIS P 3801)）でろ過し、5分間で得られるろ液量）、 $\Delta\text{TOC}$  ( $\Delta\text{TOC} = \text{好気タンク内S-TOC} - \text{ろ過水TOC}$ ) の測定を行った。また、実験期間中の膜差圧の変化率、ならびに実験後のインライン薬液洗浄による膜差圧の回復状況を確認した。なお、本実験においては膜差圧が30 kPaを超過しても運転を継続した。

## 3. 実験結果

### 3.1 膜洗浄風量最低化の検討実験

Fig. 3 に膜洗浄風量削減実験、Fig. 4 に断続膜洗浄実験における膜差圧の変動の例を示す。膜洗浄風量削減時の膜差圧上昇速度は0.14 kPa/日であったのに対し、基本条件に戻すと0.28 kPa/日となった。一方、断続膜洗浄実験では、断続膜洗浄時は0.15 kPa/日であったのに対し、基本条件に戻すと0.17 kPa/日となった（通常の基本運転時は年間通じて0.00 kPa~1.82/kPa、

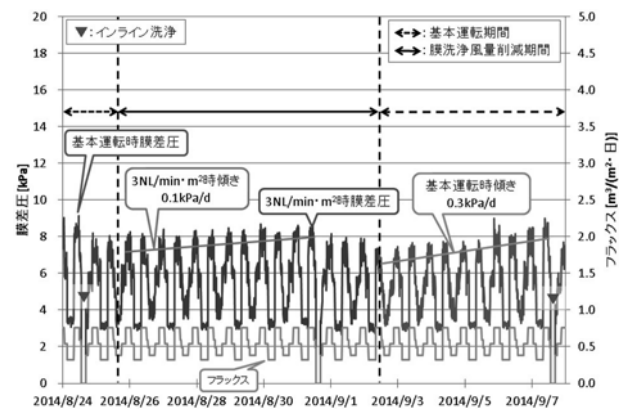


Fig. 3 膜洗浄風量削減実験における膜差圧の変動の例

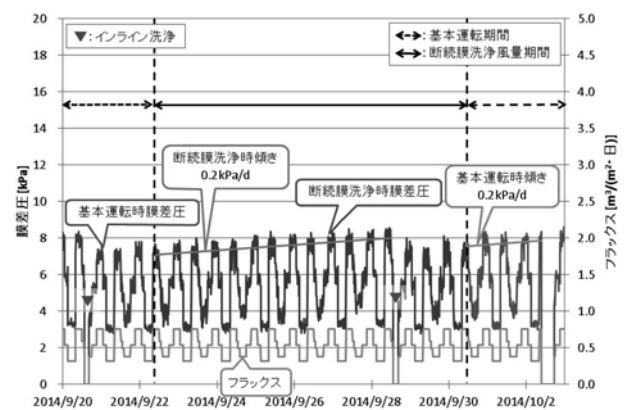


Fig. 4 断続膜洗浄実験における膜差圧の変動の例

平均値は0.48 kPa/日である)。いずれの実験においても、膜差圧上昇速度は基本運転と大きく変わらず、膜洗浄風量を削減しても安定運転が可能であることが示唆された。

### 3.2 処理流量増大運転実験

Fig. 5 にパターン1、Fig. 6 にパターン2における膜差圧の変動の例を示す。パターン1においては実験中を含むインライン洗浄までの期間、膜差圧は安定運転の目安である30 kPaを超えることなく運転を行えた。パターン2において実験中は膜差圧が上昇し30

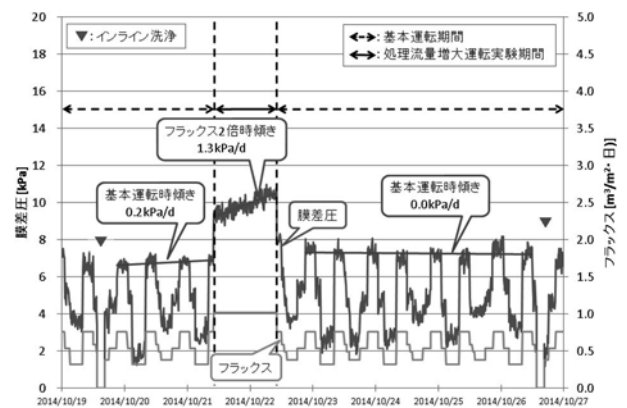


Fig. 5 パターン1における膜差圧の変動の例

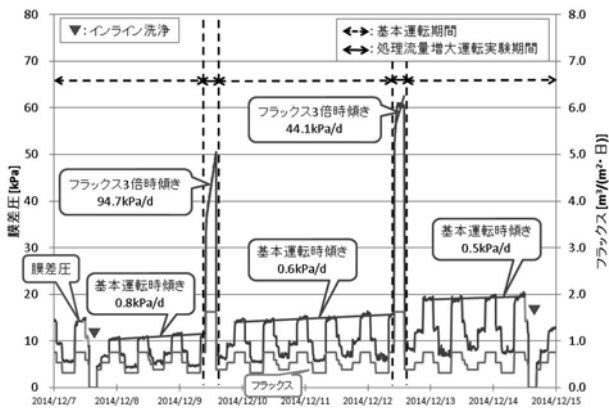


Fig. 6 パターン 2 における膜差圧の変動の例

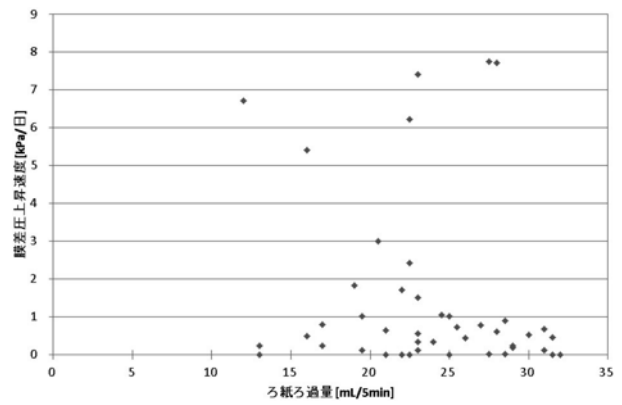


Fig. 7 膜差圧上昇速度とろ紙ろ過量の関係

kPa を超えたが、実験終了後は回復しインライン洗浄までに 30 kPa を超えることはなかった。また、基本条件に戻した後の膜差圧上昇速度は、パターン 1 では 0.00 kPa/日、パターン 2 では 0.63 kPa/日、0.38 kPa/日と上昇幅は小さく、安定運転を継続することができた。

Table 2 にそれぞれのろ過水の水質分析結果の例を示す。実験前後の好気タンクおよびろ過水の水質は安定しており、水処理機能への影響は認められなかった。また、ΔTOC については、実験中・実験後に増大したが、ろ紙ろ過量は全期間において本研究の基準とした 10 mL/5 min を超えており、汚泥のろ過性能は低下しなかったものと考えられる。

### 3.2 MBR 運転管理指標

2014 年 6 月～2015 年 6 月のろ紙ろ過量と膜差圧上昇速度を整理した。Fig. 7 にろ紙ろ過量と膜差圧上昇速度との関係を示す。この 2 指標間に相関は見られなかった。

## 4. ま と め

膜洗浄風量最低化の検討実験において、消費エネルギーに最も寄与の大きい膜洗浄風量を基本条件の 75% に削減、もしくは断続洗浄により 85% に削減し

ても、プラントの安定運転が可能であることが示唆された。これにより、プラント全体の使用電力量の 5% が削減できる見込みである。

処理流量増大実験において、フラックスを基本条件の 2 倍にして 24 時間の連続運転を行っても膜差圧が 30 kPa を超えることはなく、膜ろ過性能と水処理性能への影響はなかった。また、フラックスを基本条件の 3 倍にして 1 日 4 時間の運転を週 2 回行っても、実験中を除きインライン洗浄までに膜差圧が 30 kPa を超えることはなく、膜ろ過性能と水処理性能への影響はなかった。

一方、MBR の運転管理指標については現在のところ、ろ紙ろ過量と膜差圧上昇速度は相関が見られないことがわかった。今後は他の指標についても整理し、汚泥のろ過特性を評価・管理できる指標を検討する予定である。

### 参 考 文 献

- 1) 新井喜明, 打林真梨絵, 豊岡和宏, 宮崎好弘, 町田鉄男, 山下喬子, 橋本敏一: セラミック平膜を用いた浸漬型 MBR の省エネルギー化・合流対応の研究, 第 51 回下水道研究発表会講演集 pp.271-273 (2014)
- 2) 財)下水道新技術推進機構: セラミック平膜を用いた循環式硝化脱窒膜分離活性汚泥法技術資料 (2012.3)

Table 2 処理流量増大実験における水質分析結果の例

		パターン 1 (2014/10/21~22)				パターン 2 (2014/12/9)		
		実験前	実験開始後 2 時間	実験終了 2 時間前	実験終了 1 時間後	実験前	実験中	実験後
ろ過水質	BOD [mg/L]	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
	SS [mg/L]	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
	NH <sub>4</sub> -N [mg/L]	0.01	0.08	0.07	0.03	0.28	2.77	0.32
	大腸菌 [MPN/100 mL]	<1.8	<1.8	<1.8	<1.8	<1.8	<1.8	<1.8
好気タンク	水温	22℃				18℃		
	ろ紙ろ過量 [mL/5 min]	28.0	30.0	26.5	25.0	25.0	25.5	25.0
好気タンクろ過水	ΔTOC [mg/L]	1.7	2.8	2.8	2.4	0.2	8.6	3.8