

## 〈論文〉

## MBRの消費電力低減を目的とした曝気風量制御

小原卓巳<sup>1)</sup>, 山中 理<sup>1)</sup>, 志宮篤政<sup>2)</sup>  
永江信也<sup>3)</sup>, 都築佑子<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(株)東芝

(〒183-8511 東京都府中市東芝町1 E-mail: takumi.obara@toshiba.co.jp)

<sup>2)</sup>東芝インフラシステムズ(株)

(〒212-8585 川崎市幸区堀川町72-34 E-mail: atsumasa.shimiya@toshiba.co.jp)

<sup>3)</sup>(株)クボタ

(〒661-8567 兵庫県尼崎市浜1-1-1 E-mail: shinya.nagae@kubota.com)

## 概要

本稿では、MBR (Membrane Bio-Reactor: 膜分離活性汚泥法) の消費電力低減を目的とした洗浄風量制御を提案し、実規模のMBR施設にてその効果を評価した結果を示す。筆者らは、膜ろ過抵抗モデルに線形回帰モデルを組合せた膜差圧予測モデルを構築し、その予測値に基づき洗浄風量を制御する手法を開発した。本稿では、開発した洗浄風量制御をMBR実施設に適用し、その風量削減効果に関し、実証評価を行った結果について報告する。

キーワード: MBR, 曝気風量制御, 省エネルギー, 下水処理, 膜ファウリング

原稿受付 2018. 5. 31 原稿受理 2018. 8. 28

EICA: 23(2・3) 30-39

## 1. はじめに

MBR (Membrane Bio-Reactor) は、下水や有機排水の処理を微生物の集合体である活性汚泥により行い、活性汚泥と処理水の固液分離を膜ろ過により行うことで処理水を得る水処理方式である。固液分離を従来の沈澱池に替え、膜ろ過により行うことで、①省スペースで設置可能である、②清澄で良好な水質が得られる、③汚泥流出の懸念がなく維持管理が容易である、といったメリットがあることから下水処理施設への導入が進みつつある。一方、消費電力が従来の処理方式に比べて高いことが、MBRの更なる普及への大きな技術課題となっている<sup>1,2)</sup>。MBRでは、運転管理上、膜の目詰まり(膜ファウリング)の抑制が重要であり、そのために膜面を気泡流で洗浄する洗浄曝気が必要となることから、従来の処理方式に比べ消費電力が高くなる。また、膜の洗浄曝気に加え、活性汚泥中の微生物が下水中の有機物やアンモニアを酸化分解するために必要な空気の供給を目的とした曝気(以下、補助散気)も必要となる。MBRにおいては、この2つの曝気にかかるブロワの消費電力がMBR全体の消費電力の大半(例えば、文献3)のシステムでは90%以上)を占めており、曝気風量の削減が求められている。

このような背景のもと、筆者らは、MBRの消費電

力低減を図ることを目的とした曝気風量制御技術を開発し、MBRの実施設に導入し、その制御効果の実証評価を実施してきた<sup>4-6)</sup>。開発した技術は、膜ファウリング指標である膜差圧(TMP: Trans-Membrane Pressure)を予測モデルにより予測し、その予測値に基づき洗浄風量を制御する洗浄風量制御と、処理水のアンモニア性窒素(NH<sub>4</sub>-N)濃度をオンライン計測し、その計測値に基づき補助散気量を制御するNH<sub>4</sub>-N/DO制御<sup>7-9)</sup>で構成される。

補助散気制御に適用したNH<sub>4</sub>-N/DO制御は従来の下水処理方式である標準活性汚泥法の処理施設においてDO(Dissolved Oxygen)一定制御比10~15%の曝気風量低減効果を実証済みの制御技術であり、既にその内容と検証結果を報告済みのため<sup>7-9)</sup>、本論文では新たに開発した洗浄風量制御に焦点を絞って報告を行う。

洗浄風量の制御に関しては、洗浄風量を間欠的に運転・停止を行う<sup>10)</sup>、またはパルス状に変化させる<sup>11)</sup>等、洗浄風量の制御パターンを変更することで風量削減を図った研究事例が報告されている。一方、膜のファウリング指標であるTMPを予測する技術として、MBRの運転データに基づき、統計モデルを用いる方法<sup>12,13)</sup>が報告されている。このような予測技術を用いて、MBRの運用状況に応じて洗浄風量の自動制御を行うことで、MBRを安定的に運用しながら風量削減を行うことができると考えられる。

筆者らは、膜ろ過抵抗の理論モデルをベースに統計モデルを組み合わせた TMP 予測モデルを構築し、洗浄風量の自動制御を行う独自の制御方式を考案した。理論モデルをベースにモデル構築を行うことで実際の TMP の非線形な上昇挙動を表現できるモデル構造とし、そこに MBR 運用データを入力とする統計モデルを組み合わせるにより MBR の運用状況の変化を表現できるようにした。同時に、洗浄風量制御の制御目標の生成にも理論モデルのモデル構造を利用し、TMP の予測値と制御目標に基づき洗浄風量を制御することで洗浄風量の適正化を図るようにした。

本論文では、まず、2章に開発した制御システムの全体概要を示し、新たに考案した洗浄風量制御と TMP 予測モデルの考え方について示す。続いて、3章に開発制御の導入効果を実証するために構築した MBR 実証施設の概要を示し、4章に構築した実証施設を利用して、予測モデルの予測精度、ならびに制御効果を評価する方法を示す。5章にその評価結果を示し、6章に本論文の結論を述べ、開発した制御技術が MBR の技術課題である曝気風量の削減に寄与できる技術であることを示す。

## 2. 開発した曝気風量制御システム

### 2.1 曝気風量制御システムの全体構成

筆者らが開発した MBR 対応の曝気風量制御システムを Fig. 1 に示す。開発方式は、MBR の各種オンラインセンサの計測値 (MLSS (Mixed Liquor Suspended Solids), DO, フラックス, 洗浄風量等) を入力とし、1日~数日先の TMP を予測する TMP 予測モデルと、その出力である TMP 予測値に基づき洗浄風量目標値を演算する洗浄風量制御と処理水の NH<sub>4</sub>-N 計の計測値に基づき生物反応槽内の DO 目標値を算出し、補助散気量を制御する NH<sub>4</sub>-N/DO 制御で構成される。本報ではこのうち前者の洗浄風量制御について報告を行う。

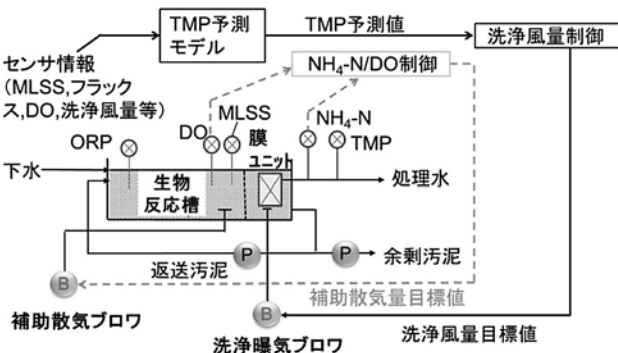


Fig. 1 Control flow diagram of aeration control for MBR

### 2.2 TMP 予測に基づく洗浄風量制御

開発した洗浄風量制御の概念図を Fig. 2 に示す。Fig. 2 に示す薬液洗浄とは、膜の処理水側から次亜塩素酸ナトリウム溶液を供給し、膜の内部に所定時間保持し、排出するインライン洗浄を指し、薬液洗浄間隔 (L) とは、このインライン洗浄の間隔を示す。この薬液洗浄に関しては、薬液洗浄中は膜ろ過ができなくなる、使用する薬液の準備・手配にはリードタイムがある、ことから次の薬液洗浄日を計画的に設定することができれば、MBR の維持管理性が向上すると考えた。このような背景から、Fig. 2 のシステムは、目標とする薬液洗浄間隔を確保しながら洗浄風量の削減を図ることを狙いとして考案した制御方式である。

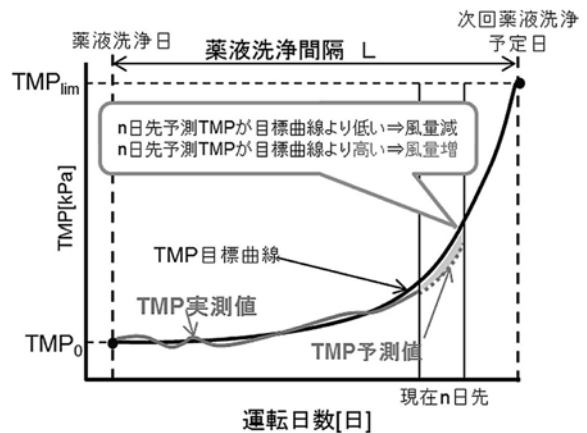


Fig. 2 Control scheme of membrane scour aeration

本制御方式においては、制御開始時 (薬液洗浄直後) の TMP 初期値 (TMP<sub>0</sub>) を取得し、薬液洗浄実施を判定する TMP 上限値 (TMP<sub>lim</sub>) と薬液洗浄間隔 (L) を設定することにより、次の薬液洗浄予定日までの TMP の制御目標を生成し、実際の TMP がその制御目標に沿うように洗浄風量を制御する。この際、洗浄風量等の各種条件が現状のままであると仮定した場合の TMP を予測し、予測値が制御目標を下回る場合には風量を低減させ、上回る場合には風量を増加させるよう制御する。

開発方式は、大きく分けて ① TMP 予測部、② TMP 制御目標生成部、③ 予測フィードバック制御部の 3 要素で構成される。以降、構成要素別にその詳細を説明する。

#### 【① TMP 予測部】

(1) 式, (2) 式に示す膜ろ過抵抗モデルと閉塞モデルの一般式のモデル構造<sup>14)</sup>を利用することで、予測モデルを構築した。

ろ過抵抗モデル:

$$TMP_m(t) = \mu(t) \times J(t) \times R(t) \dots\dots\dots (1)$$

閉塞モデル：

$$dR(t)/dt=f(t) \times R(t)^{k_0} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $TMP_m(t)$  は  $TMP$  [kPa]、 $\mu(t)$  は粘性係数 [kPa・日]、 $J(t)$  はフラックス [m/日]、 $R(t)$  はろ過抵抗 [1/m] の時刻  $t$  におけるそれぞれの値であり、 $k_0$  は閉塞パラメータである。この  $k_0$  は、ケーキろ過、中間閉塞、標準閉塞、完全閉塞の膜の閉塞形態に対応し、それぞれ 0, 1.0, 1.5, 2.0 の値をとることが知られている<sup>16)</sup>。実際の膜の閉塞はこの4つの閉塞状態の混在した状況で進行するため、閉塞理論に基づき  $k_0$  を一意に決定することはできない。このため、実データの  $TMP$  変化に最も適合するようパラメータフィッティングにより  $k_0$  を求め、予測モデルに適用した。

また、MBRの運用状況の変化に対する膜ろ過抵抗の上昇速度の変化を表現できるよう  $f(t)$  を (3) 式の線形回帰モデルで表現した。

$$f(t)=a_1 \times X_1(t)+a_2 \times X_2(t)+\dots+a_n \times X_5(t)+b \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $X_i(t)$  と  $a_i(i=1, \dots, 5)$  は、各要因変数とその係数パラメータであり、 $b$  はバイアス項である。 $X_i(t)$  は MBR 施設における各種オンライン計測データならびに計測データから演算される合成変数（例えば、洗浄空気倍率＝洗浄風量÷処理水量）であり、今回のモデル構築にあたっては、56の変数について  $TMP$  との関係の相関分析を MBR 施設の運転実績データを用いて実施し、その結果から相関の高い変数として、 $X_1$ : 洗浄空気倍率 [-]、 $X_2$ : 水温 [°C]、 $X_3$ : フラックス [m/d]、 $X_4$ : DO [mg/L]、 $X_5$ : MLSS 負荷量 (=フラックス×MLSS 濃度) [kg/日] の5変数を要因変数として選択した。

(1)～(3) 式に対して  $\mu(t)$  の時間変化を無視できるとする仮定に基づき、(2) 式を時間  $\Delta t$  で離散化すると、中間変数  $Y(t)$  を介して、(4)～(7) 式の予測モデルが得られる。

$$Y(t+\Delta t)=Y(t)+A(t) \times Y(t)^{k_0} \dots\dots\dots (4)$$

$$A(t)=a_1' \times X_1(t)+\dots+a_5' \times X_5(t)+b' \dots\dots\dots (5)$$

$$Y(t)=TMP_m(t)/J(t) \dots\dots\dots (6)$$

$$TMP(t)=TMP_m(t) \times J_r/J(t) \dots\dots\dots (7)$$

ここで、(7) 式における  $J_r$  は、膜ユニット固有の定格フラックス（今回使用した膜ユニットでは、0.48 m/日）、 $TMP(t)$  は定格換算  $TMP$  [kPa] である。定格換算  $TMP$  とは、 $TMP$  の測定値 ( $TMP_m(t)$ ) を定格フラックスで正規化した膜ろ過抵抗に相当するものであり、本稿の **Fig. 2** ならびに以降の記述で示す  $TMP$ 、 $TMP(t)$ 、 $TMP_0$ 、 $TMP_{lim}$  は、(7) 式に基づき定格換算された  $TMP$  値のことを指す。また、(5) 式の係数パラメータ  $a_i'(i=1, \dots, 5)$  に関しては、

MBR 施設の運転実績データに多変量解析の一種である部分最小2乗法 (PLS)<sup>15)</sup> を適用して同定した。PLS は、予測モデルの入力変数間で強い相関を持つ場合の問題、いわゆる多重共線性の問題を回避するために有効なパラメータ同定手法として知られている。各種プラントの運用データは一般に互いに相関を持つことが多いことから、係数パラメータの同定に PLS を適用した。

#### 【TMP 制御目標生成部】

TMP 制御目標生成部では、以下に示す (8)～(10) 式により  $TMP$  の制御目標を連続曲線として生成する。制御目標に関して、(10) 式に示す膜ろ過抵抗の理論モデルのモデル構造を採用することで、制御開始時の  $TMP$  初期値 ( $TMP_0$ )、薬液洗浄実施を判定する  $TMP$  上限値 ( $TMP_{lim}$ )、薬液洗浄間隔 ( $L$ )、および制御目標の閉塞パラメータ設定値 ( $k$ ) の値を決めることで、連続曲線を一意に求めることができるようにした。

$k=1$  の場合、

$$A=\log\left(\frac{TMPlim}{TMP_0}\right) \div L \dots\dots\dots (8)$$

$k \neq 1$  の場合、

$$A=\frac{1}{1-k}(TMP_{lim}^{(1-k)}-TMP_0^{(1-k)})/L \dots\dots\dots (9)$$

$$dTMP_{ref}(t)/dt=A \times TMP_{ref}(t)^k \dots\dots\dots (10)$$

なお、(8) 式、(9) 式から算出される  $A$ :  $TMP$  上昇速度係数 (1/日) は、(1) 式、(2) 式における  $\mu(t)$ 、 $f(t)$  が一定値であると仮定した際の (10) 式の解析解である。

ここで、制御目標の閉塞パラメータ  $k$  は、予測モデルの閉塞パラメータ  $k_0$  と同じ値にすることが自然であるが、筆者らは制御動作を調整するための可調整パラメータとして扱う評価も試みた。一般に閉塞パラメータ  $k$  の値は **Fig. 3** に示すように値を大きくするほど、最終段階で急激に上昇する曲線形状とすることができる。この特徴を活かすことで、制御動作を **Fig. 4** に示すように調節することができる。**Fig. 4** の左図に示すように  $k$  の値を小さく設定した場合、前半の方で制御目標値 ( $TMP_{ref}(t)$ ) が予測値 ( $TMP(t)$ ) よりも大きくなりやすいため、前半で洗浄風量を削減する前半削減型の制御動作となる。一方、右図に示すように  $k$  の値を大きくすると、後半削減型の制御動作となる。言い換えると、前者は風量削減効果を重視した設定、後者は薬液洗浄間隔の確保を重視した設定と言える。本研究ではこの制御目標の設定の違いが風量削減率と薬液洗浄間隔 ( $L$ ) に与える影響に関しても、後述する実証試験により評価を行った。

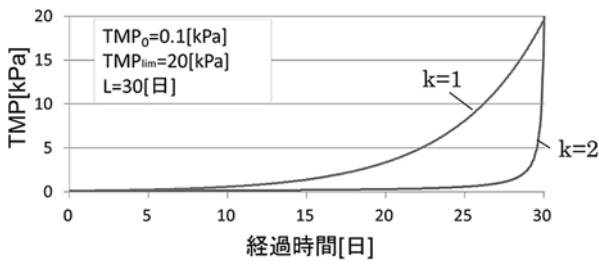


Fig. 3 Relationship between TMP reference and set value of k

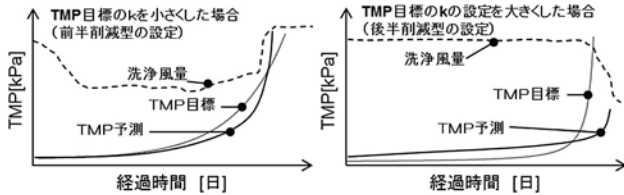


Fig. 4 Control action of air volume in changing set value of k

【③予測フィードバック制御部】

予測フィードバック制御部では、(1)～(7)式から得られる TMP(t) の予測値と (8)～(10)式から得られる目標値  $TMP_{ref}(t)$  の予測誤差を小さくするように、(11)式で示す予測 PI (比例-積分) 制御式により、洗浄風量  $Q_b(t)$  を算出する。

$$Q_b(t) = K_p \times (e(t) + T_{pre}) + 1/T_I \int_t^{t+T_{pre}} e(t) dt \dots\dots\dots(11)$$

ここで  $e(t) = TMP(t) - TMP_{ref}(t)$ ,  $T_{pre}$  は予測期間,  $K_p$  と  $T_I$  はそれぞれ比例ゲイン, 積分時間である。

すなわち、この制御は TMP(t) が  $TMP_{ref}(t)$  に近づくように洗浄風量を調整するものであり、これにより、従来、目標とする薬液洗浄間隔 L に近づけながら、風量削減を図ることを目的としている。

3. 実証施設の概要

名古屋市守山水処理センターの嫌気-無酸素-好気(膜分離)の3槽からなるUCT<sup>17)</sup>法のMBR施設(日平均水量4000 m<sup>3</sup>/日)の好気(膜分離)槽を Fig. 5 に示すように改造し、実証施設を構築した。当該施設の好気(膜分離)槽には、合計12台の有機平膜ユニットが設置されている。そのうちの2台について、それぞれ専用の洗浄曝気ブロウと膜ろ過ポンプを設置し、洗浄風量制御の実証が可能なよう改造した。

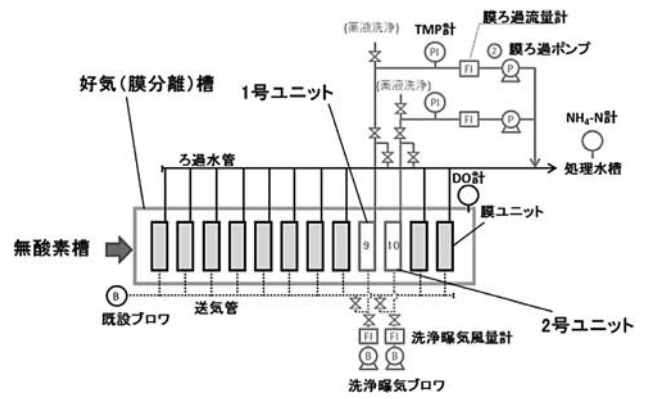


Fig. 5 Overview of demonstration plant

4. 実証方法

4.1 実証施設の運転条件

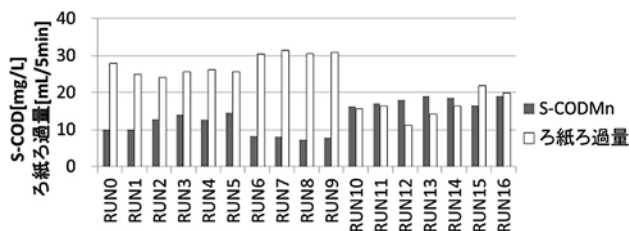
Table 1 に洗浄風量制御の評価期間と運転条件を示す。評価期間中に各種工事、既設 MBR の維持管理上の都合等により実証データが取得できない期間があったため、それら期間を除いて評価期間を定義した。表中の制御モード欄の「定格 (2.8)」は、1ユニット当たりの洗浄風量を使用した膜ユニットの仕様値である 2.8 m<sup>3</sup>/min の一定で設定を行い運用したことを示す。「予測 PI」は開発制御により運用したことを示し、制御に使用する TMP 予測値は1日先の値とした。なお、予測 PI における洗浄風量の制御範囲については、下限風量はブロウの仕様上の制約風量、上限風量は定格風量とし 1.8~2.8 m<sup>3</sup>/min とした。予測 PI における「(前半)」, 「(後半)」はそれぞれ制御目標を前半削減型、後半削減型で設定したことを示し、前半削減型とは閉塞パラメータ k の設定を 1.0 とした場合であり、後半削減型とは k の設定を 1.5 以上とした場合を指す。本検証における予測モデルの閉塞パラメータ  $k_0$  は、次節に説明するように 1.0 を基本設定としたことから、前半削減型は  $k=k_0$  の設定、後半削減型は  $k>k_0$  の設定である。一部の期間において、両ユニットとも予測 PI としたが基本的には、片側ユニットを対照ユニットとし定格風量一定で運転し、もう一方を実証ユニットとし予測 PI にて運用した。

また、フラックス等の洗浄風量以外の条件は2ユニットで同一の条件となるよう運用した。目標薬液洗浄間隔の設定は、RUN1~RUN9 については 21 日を設定し評価を行ったが、RUN10 以降については、後述の Fig. 7 に示すように被処理水のろ過性が悪化したため、洗浄曝気ブロウの最大風量(定格風量)一定で運転した場合においても 21 日の洗浄間隔の確保が難しいと判断し、既設 MBR の薬液洗浄のタイミング、各種設備の年次点検等の維持管理上の都合を考慮して、都度設定を変更する形で運用した。

**Table 1** Evaluation period and operating condition for performance evaluation of score aeration control

RUN名	期間	1号			2号		
		制御モード	目標薬液洗浄間隔	フラックス	制御モード	目標薬液洗浄間隔	フラックス
RUN0	H28年11月11日~11月21日	予測PI(前半)	21	0.60	定格(2.8)	—	0.60
RUN1	H28年12月2日~12月10日	予測PI(後半)	21	0.60	定格(2.8)	—	0.60
RUN2	H28年12月16日~12月27日	予測PI(後半)	21	0.40	定格(2.8)	—	0.40
RUN3	H28年12月28日~1月19日	予測PI(後半)	21	0.40	定格(2.8)	—	0.40
RUN4	H29年1月20日~2月9日	予測PI(後半)	21	0.45	定格(2.8)	—	0.45
RUN5	H29年2月9日~2月22日	予測PI(後半)	21	0.45	定格(2.8)	—	0.45
RUN6	H29年8月23日~9月13日	予測PI(後半)	21	0.40	定格(2.8)	—	0.40
RUN7	H29年9月15日~9月26日	定格(2.8)	—	0.40	予測PI(前半)	21	0.40
RUN8	H29年10月4日~10月26日	予測PI(後半)	21	0.40	予測PI(前半)	21	0.40
RUN9	H29年10月27日~11月7日	予測PI(後半)	21	0.48	予測PI(前半)	21	0.48
RUN10	H29年12月20日~12月27日	定格(2.8)	—	0.48	予測PI(前半)	7	0.48
RUN11	H29年12月29日~1月7日	定格(2.8)	—	0.48	予測PI(前半)	10	0.48
RUN12	H30年1月10日~1月16日	定格(2.8)	—	0.48	予測PI(前半)	14	0.48
RUN13	H30年1月17日~1月24日	定格(2.8)	—	0.48	予測PI(前半)	14	0.48
RUN14	H30年1月25日~1月30日	定格(2.8)	—	0.48	予測PI(前半)	7	0.48
RUN15	H30年2月5日~2月14日	定格(2.8)	—	0.48	予測PI(前半)	10	0.48
RUN16	H30年2月16日~2月28日	定格(2.8)	—	0.40	予測PI(前半)	12	0.40

評価期間中、被処理水のろ過性を把握するために、好気（膜分離）槽の活性汚泥を採水し、週1回の頻度でS-CODMn（1 $\mu$ mのろ紙（5種C）によるろ過により得られるろ液のCODMn）を測定し、週3回の頻度でろ紙ろ過量（汚泥50mLを1 $\mu$ mのろ紙（5種C）で5分間ろ過した時に得られるろ液量）を測定した。Fig. 6にこれら測定値のRUN別平均を示す。Fig. 6に示すようにRUN10以降、好気（膜分離）槽のS-CODMnが高くなり、ろ紙ろ過量が低下しており、被処理水のろ過性が悪化していることがわかる。このようになった要因の詳細は解明できていないが、冬季の低水温期であったことから微生物の活性の低下、ならびに汚泥性状の悪化、があったことが影響してい

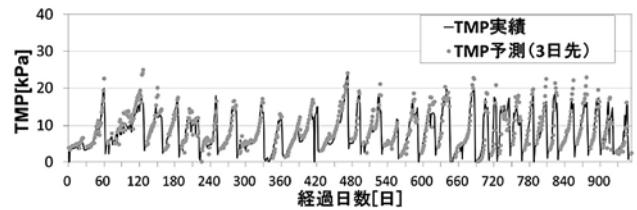
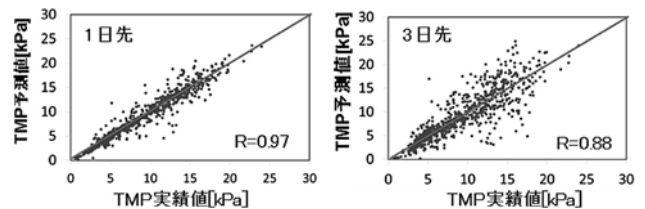
**Fig. 6** Average value of soluble CODMn and volume of filtrate filtered by filter paper (NO. 5C) in each RUN

ると考えている。

## 4.2 TMP予測モデルの評価

### 【初期パラメータの算出】

実証試験で使用する膜ユニットと同一仕様の膜ユニットのMBRの2年半分の運転データを用いて、PLSにより(5)式の $a_1'$ ~ $a_5'$ の係数パラメータを算出し、予測モデルの初期パラメータ（以降、標準パラメータと呼ぶ。）とした。なお、予測モデルの閉塞パラメータ $k_0$ に関しては、同MBRのTMPデータに最もフィットする $k_0=1.0$ とし、PLSを適用した。

**Fig. 7** Three days ahead TMP prediction result**Fig. 8** Scatter plot of actual TMP and prediction TMP

構築した予測モデルによる3日先TMP予測値と実績値をFig. 7、予測値と実績値の散布図をFig. 8に示す。Fig. 7より構築した予測モデルはTMPの挙動をよく表現できていることがわかる。また、Fig. 8より実績値と予測値の相関係数が1日先予測0.97、3日先予測0.88と高い精度で予測ができていていることがわかる。

なお、PLSによるパラメータの同定においては、各要因変数の係数パラメータの符号が実際の物理現象と整合するかについて留意した。例えば、フラックスについては高いほどTMPの上昇が速いため符号は正、洗浄空気倍率については低いほどTMPの上昇が速いため符号は負でなくては整合がとれない。全ての係数パラメータについて符号が正しく表現されていることを確認した上で、実証施設の予測モデルとして適用した。このように符号を正しく同定するためには、①一般的な同定手法である最小2乗法（OLS）では実現が困難であること、②PLSによる同定に用いるデータとして、MBRが安定運用されている6か月以上の時系列データが必要となること、を確認している。

### 【予測モデルのパラメータ調整】

実証施設に標準パラメータを適用し予測を実施したところ、(1)洗浄風量の変化に対するTMP予測値の

上昇速度の感度が実績に比べ低いこと、(2) 実際のTMP上昇速度がPLSを適用した期間の運転データに比べ速く、予測モデルで計算されるTMP予測値の上昇が実績に比べ遅れる傾向にあること、がわかった。このため、予測モデルのパラメータ調整が必要と判断し、以下に示す調整を実施した。

まず、(1)の改善のためにRUN0~RUN5のデータを用いた感度解析により、洗浄空気倍率の係数パラメータ $a_1'$ の調整を実施した。今回の実証においては、2つの膜ユニットの洗浄風量以外の条件は同一としたことから、2つのユニットのTMP上昇速度の差は洗浄空気倍率の違いにより生じているものと仮定し、(12)式に示す式により $a_{1j}'$ (RUNjにおける洗浄空気倍率の感度)を算出した。

$$a_{1j}' = (A_{1j} - A_{2j}) / (u_{1j} - u_{2j}) \quad (j=0 \sim 5) \dots\dots\dots (12)$$

ここで $A_{ij}$ 、 $u_{ij}$ は、それぞれRUNjにおけるi号ユニットのTMP上昇速度係数、空気倍率平均値を示す。 $A_{ij}$ については、各ユニットのRUNj開始時の初期TMP、RUNj終了時のTMP値、RUN開始~終了までの期間をそれぞれ、 $TMP_{0j}$ 、 $TMP_{imj}$ 、 $L_j$ として、(8)式に代入することで算出した。

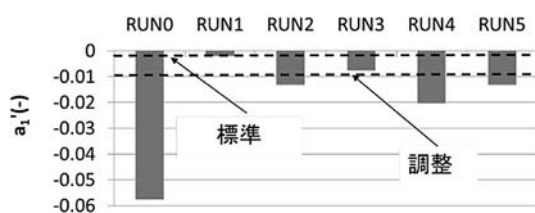


Fig. 9 Result of sensitivity analysis (parameter  $a_1'$ )

感度解析の結果をFig. 9に示す。PLSで算出した $a_1'$ の値は図中の標準で示す値(-0.003)であったが、この値は(12)式で求めた実際の感度に比べ低いことがわかる。特異的に感度が高いRUN0を除いた平均値を算出した結果、-0.010となったため、調整後のパラメータではこの値を $a_1'$ のパラメータ値とした。

次に他の要因変数の感度はPLSで求めたものと同等と仮定し、バイアス項 $b'$ の値を直近のRUNのTMP上昇速度係数に適合するよう調整した。このバイアス項の調整はRUN10の直前にRUN9のデータ、RUN12の直前にRUN11のデータを用いて実施した。この調整は、上述の(2)で示したTMP予測値の遅れの改善をねらったものである。これら(1)、(2)の調整を実施したパラメータを調整パラメータと定義する。

なお、上記で示す調整方法とは別に、実証試験データを使ってPLSによるパラメータの再同定を行う方法も試みたが、係数パラメータの符号と物理現象の関係の整合が取れなかった。この理由としては、PLS

の入力とするデータの質に問題があったと考えており、実証期間中、汚泥性状の変化等のオンライン計測している以外の因子がTMPの変化に与える影響が大きかったためにPLSによる再同定がうまくいかなかったものと考えている。

**【TMP予測モデルの評価】**

予測精度の評価を行うためにTMP実績値と予測値のRMSE(平方2乗誤差)により予測誤差の評価を行う。ただし、RMSEの評価については、TMP実績値が10kPa以下の期間のデータを用いて評価を行う。この理由は、TMP値が10kPaを超えた状態では洗浄風量の増加によるTMPの上昇抑制効果がほとんどなく、洗浄風量制御に適用する観点からは10kPa以下のTMPの予測精度が重要と考えるためである。

また、RUN0~9については標準パラメータ、RUN10以降については調整パラメータを適用し予測を実施したが、RUN10以降については標準パラメータを仮に適用していた場合の予測を事後に求め、標準と調整の両パラメータに関し、予測精度の比較評価を実施した。

**4.3 洗浄風量制御の評価**

定性評価として、制御結果を時系列グラフで可視化し、制御動作の確認を行う。加えて、制御目標設定の違いの影響を風量削減、ならびに薬液洗浄間隔の観点から評価を行う。また、定量評価として、各RUNの平均風量を算出することで定格風量(2.8m<sup>3</sup>/min)に対する洗浄風量削減率を評価する。削減率の評価は、前半削減型、後半削減型の制御目標設定別にも行う。

**5. 実証結果**

**5.1 TMP予測モデルの評価**

1日先TMPの予測誤差(RMSE)のRUN別平均値をFig. 10に示す。

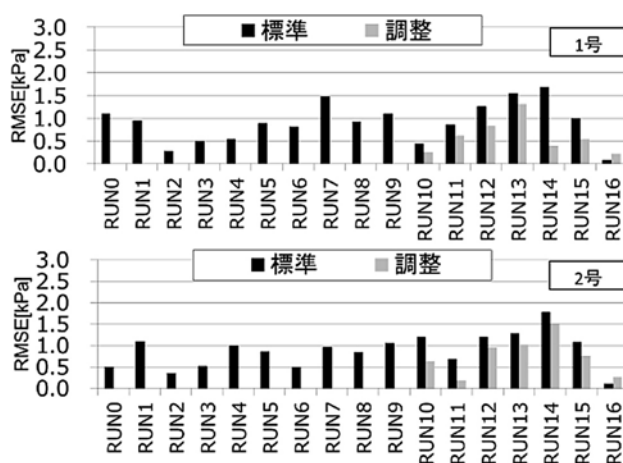


Fig. 10 RMSE of TMP prediction (1day ahead)

1号, 2号ユニット共に標準パラメータで概ね1.0 kPaの予測誤差で予測できているが, 予測誤差が1.5 kPa程度のRUNもあることがわかる。また, RUN10以降の結果において, 標準パラメータに比べ改良パラメータの予測誤差が小さい傾向にあり, 予測精度を改善できていることがわかる。

パラメータ調整により予測精度の改善ができた理由を考察するための一例として, RUN11の2号ユニットのTMP予測結果をFig. 11に示す。標準パラメータでは予測値の予測先日数が大きくなるほどTMP予測値の上昇が実績値に比べて遅れているのに対し, 調整パラメータでは, その遅れが改善し, 1日先, 3日先予測ともに実績値との乖離が小さくなり, 予測精度を改善できている。標準パラメータにおいて予測値の遅れが生じる要因は, TMPの上昇速度が標準パラメータをPLSにて算出した過去の期間に比べ実証期間中(特に後半期間)の方が, その速度が速かったためと考えられる。今回採用したパラメータ調整方法は, TMP上昇速度が直近のRUN実績に適合するよう調整を行うことから, 調整パラメータでは予測精度が改善できたと考えられる。

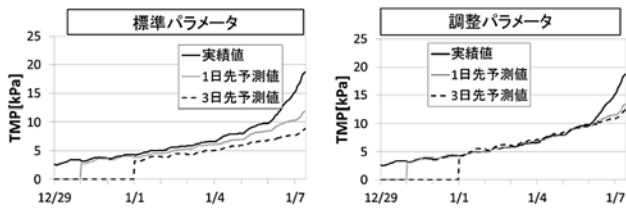


Fig. 11 TMP prediction result (RUN11, UNIT 2)

次に1日先, 及び3日先のTMP予測におけるRMSE平均値の評価結果をFig. 12に示す。左図に示す全RUN平均において, 標準パラメータの予測精度は1日先予測0.9 kPa, 3日先予測1.7 kPaであった。右図のRUN10以降については, 標準パラメータの予測精度は, 1日先予測1.0 kPa, 3日先予測2.1 kPaと全RUN平均に比べると高くなったが, 調整パラメータではそれぞれ0.6 kPa, 1.7 kPaの予測精度に改善でき, 開発したパラメータ調整方法が予測精度の改善に有効であることがわかった。今回の実証においては, パラメータ調整により予測精度の改善を実施したが,

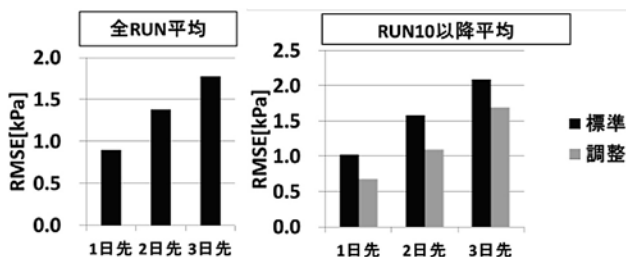


Fig. 12 Evaluation results of average RMSE

他の要因変数を追加することで予測精度の改善が見込める可能性も考えており, 今後, 検討していきたい。

## 5.2 洗浄風量制御の評価

### (1) 制御動作の評価

洗浄風量制御の制御動作を確認するために, 制御結果を時系列グラフで可視化した。薬液洗浄間隔の実績(以降, 実績La)と目標(以降, 目標L)の関係から3パターンの典型例に分類し, Fig. 13~Fig. 15に示す。

パターン1 (Fig. 13)は, TMP予測値と目標値の大小関係に応じて, 洗浄風量を増減しながら, 薬液洗浄間隔の実績Laが目標Lとほぼ一致するようTMPを制御できたケースであり想定通りの制御を実現できたケースといえる。

パターン2 (Fig. 14)は, 実績Laが目標Lに対して長かったケースである。このケースにおいては, 洗浄曝気ブロワの下限風量制約により, 目標洗浄間隔に一致させることはできていないが, 対照ユニットに比べるとTMPの上昇は速く, 目標に近づけることができていることから, 更なる削減ポテンシャルはあるものの, 目標の薬液洗浄間隔を確保しつつ風量削減ができたケースである。

パターン3 (Fig. 15)は, 実績Laが目標Lに対して短かったケースである。ただし, 定格風量で制御した対照ユニットもほぼ同様にTMPが上昇しており,

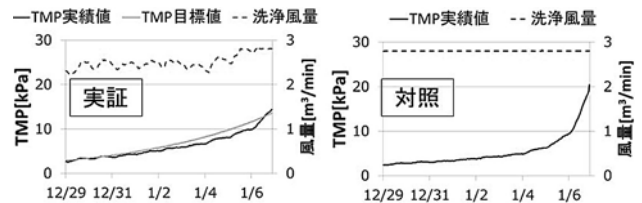


Fig. 13 Representative result of Pattern1 (RUN11) (Chemical cleaning span (Actual=Target))

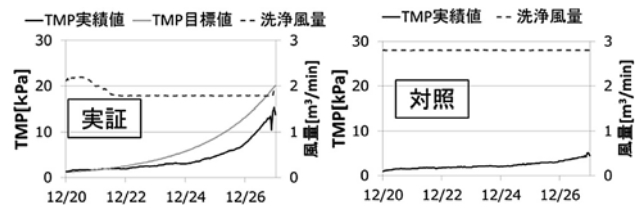


Fig. 14 Representative result of Pattern2 (RUN10) (Chemical cleaning span (Actual>Target))

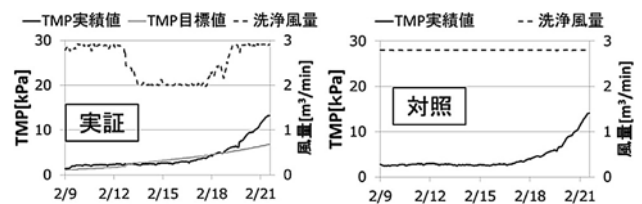


Fig. 15 Representative result of Pattern3 (RUN5) (Chemical cleaning span ((Actual<Target))

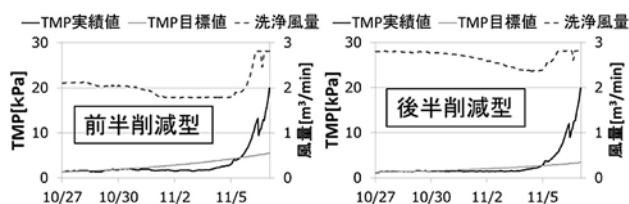


Fig. 16 Evaluation result of difference between control target (RUN9)

このケースにおいては、目標Lの設定値がこのときの膜処理状況に対して長すぎて適切でなかったことから、今回の洗浄風量の制御範囲ではどのような制御を実施していても目標Lを達成できなかつたと考えられる。

(2) 制御目標設定に関する評価

1号ユニットを前半削減型、2号ユニットを後半削減型の制御にて運用した場合の制御結果を Fig. 16 に示す。前半削減型の方がRUNの前半から積極的に風量を削減しており、風量削減については前半削減型の方が優位である一方で、両ユニットともに11/5のあたりからTMPの制御目標に対しTMPの実績値が先に上昇するパターン3の動きとなっており、TMPが20 kPaに到達するまでの期間についてもほぼ変わらないことがわかる。この例に示すように今回の実証においては薬液洗浄間隔の確保を重視した後半削減型の設定とすることにより薬液洗浄間隔を延長する顕著な効果は認められなかった。このため、制御目標の設定については、前半削減型の設定を基本設定とすることが望ましいと判断している。

(3) 風量削減率の評価

洗浄風量削減率の評価結果を Fig. 17 に示す。全期間の平均削減率は14.2%であり、制御目標の設定に関しては、後半削減型に比べ前半削減型の削減率が高いことがわかる。前半削減型の設定の場合、目標とする薬液洗浄間隔の制約を守ることができたパターン1、2の平均削減率に関しては全期間14.0%、前半削減型21.3%、後半削減型6.7%であった。

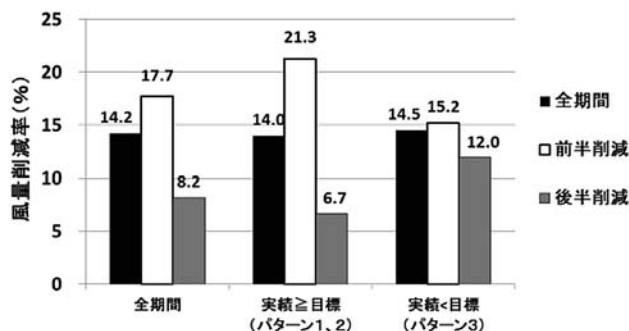


Fig. 17 Evaluation result of reduction ratio of air volume for membrane scouring

(4) 考察

実証試験の結果、提案手法による風量削減効果は認められたものの適切な薬液洗浄間隔(目標L)の設定に関しては、課題が残った。Fig. 18は目標Lの設定範囲に関する概念を示した図である。提案手法において目標Lの設定は、最大風量時に実現できる洗浄間隔L2よりも小さい値に設定する必要があるが、今回の実証においては、RUN9以前とRUN10以降でL2が大きく変化した様に、実際にL2の値は、MBRの状態に応じて大きく変化する可能性がある。また、最大風量時のL2と最小風量時のL1の幅は、TMP上昇速度に対する洗浄風量の感度に依存し、洗浄風量の感度が低いと目標Lの設定は困難になる。今後は、L1やL2が変化する要因や洗浄風量に対するTMP上昇速度の感度の詳細分析を進め、適切な目標Lの設定方法の確立を図っていく。また、予測モデルに入力する要因変数の追加等によるTMP予測精度の更なる向上についても併せて検討を行い、開発した制御技術の性能向上を図っていききたい。

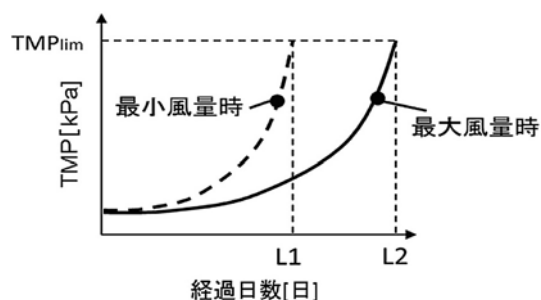


Fig. 18 Conceptual diagram for setting range of Target L

6. ま と め

本論文では、MBRにおけるブロウ消費電力の低減を図ることを目的とした曝気風量制御技術、および実規模のMBR施設で実施した実証試験について述べた。実証試験を通じて、開発技術がMBRの消費電力低減に寄与できる技術であることを実証した。

実証により得た結果を(1)~(3)に示す。

(1) 膜ろ過抵抗モデルに線形回帰モデルを組み合わせたTMP予測モデルを構築した。パラメータ調整を実施することにより、予測精度の改善を行うことができ、1日先のTMPの予測誤差(TMP実測値10 kPa以下の範囲におけるRMSE)の平均値として、0.6 kPaの予測精度が得られた。

(2) 洗浄風量制御により、平均14.2%、前半削減型17.7%、後半削減型8.2%の風量削減効果が得られた。

(3) 薬液洗浄間隔の目標を達成できたRUNの洗浄風量削減率は平均14.0%であり、前半削減型21.3%、後半削減型6.7%の風量削減効果が得られた。



(4) 薬液洗浄間隔Lの目標設定に課題が残った。予測モデルの更なる予測精度の向上と併せて、適切なLの設定方法について、今後検討していく。

## 謝 辞

本研究は、名古屋市上下水道局との共同研究にて実施した。関係者各位に感謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 下水道膜処理技術会議：下水道への膜処理技術導入ガイドライン [第2版] (2011)
- 2) 長岡裕：膜分離活性汚泥法の将来展望，膜，vol. 36, No. 5, pp. 217-221 (2011)
- 3) 松井正樹，白崎亮，吉田泰之，小野田吉恭，柳瀬仁志，矢次壮一郎：MBRを用いた高度処理化に関する実証的研究，下水道協会誌，vol. 49, No. 593, pp. 89-97 (2012)
- 4) 山中理，小原卓巳，小峰英明，永江信也，都築佑子：MBR運用データを用いた多変量解析による洗浄曝気風量制御のための膜差圧予測，第53回下水道研究発表会予稿集，pp. 214-216 (2016)
- 5) 山中理，小原卓巳，小峰英明，永江信也，都築佑子：MBRプロセスの膜差圧予測を用いた洗浄曝気風量制御の実証，第54回下水道研究発表会予稿集，pp. 197-199 (2017)
- 6) 山中理，小原卓巳，志宮篤政，永江信也，都築佑子：MBRプロセスの省エネルギー運用を目的とした曝気風量制御技術の実証，第55回下水道研究発表会予稿集，(2018)
- 7) 山中理，小原卓巳，川本直樹，山本浩嗣，萩原大揮，江口義樹：風量削減と窒素除去の両立を図る曝気風量制御の実プロセスへの適用，環境システム計測制御学会誌，18(2-3)，pp. 14-22 (2013)
- 8) 小原卓巳，山中理，難波諒，平岡由紀夫，橋本敏一，糸川浩紀，井上英男，矢野洋一郎，板倉舞：リモート診断機能を付加したNH<sub>4</sub>-N/DO制御による省エネ風量制御技術の実証，第53回下水道研究発表会講演集，pp. 854-856 (2016)
- 9) 国土交通省国土技術政策総合研究所：B-DASHプロジェクトNo. 15 (ICTを活用したプロセス制御とリモート診断による効率的な水処理運転管理技術導入ガイドライン (案))，国土技術政策総合研究所資料第939号 (2016)
- 10) 花本陽介，森田穰，後藤正広，佐々木暁：膜分離活性汚泥法における間欠散気制御が膜面洗浄に及ぼす影響に関する研究，第52回下水道研究発表会講演集，pp. 200-202 (2015)
- 11) 打林真梨絵，新井喜明，豊岡和宏，宮崎好弘，佐野勇，山下喬子，橋本敏一：セラミック平膜を用いたMBRの雨天時流量変動対応と省エネ化の検討，第52回下水道研究発表会講演集，pp. 212-214 (2015)
- 12) 金子弘昌，船津公人：Membrane Bioreactorにおける膜差圧予測モデル構築手法の開発，Journal of Computer Aided Chemistry, Vol. 10, No. 4, pp. 131-140 (2011)
- 13) 成敬模，金子弘昌，船津公人，膜分離活性汚泥法における長期的膜差圧予測モデルの構築，Journal of Computer Aided Chemistry, Vol. 13, pp. 10-19 (2012)
- 14) 角屋正人：閉塞理論の解説とろ過結果への適用，Spring Pall news, Vol. 117, pp. 10-15 (2013)
- 15) Agnar Höskuldsson: PLS regression methods, J. chemometrics, 2, pp. 211-228 (1988)
- 16) 入谷英司：粒子・液体系分離における膜濾過工学の展開，膜 (Membrane), Vol. 36, No. 5, pp. 211-216 (2011)
- 17) G. A. Ekama, I. P. Siebritz, and G. v. R. Maris: Considerations in the process design of nutrient removal activated sludge processes, Water Sci. Technol., 15(3/4), pp. 283-318(1983)

# Aeration Control System for Reduction of Power Consumption in MBR Process

Takumi Obara<sup>1)†</sup>, Osamu Yamanaka<sup>1)</sup>, Atsumasa Shimiya<sup>2)</sup>,  
Shinya Nagae<sup>3)</sup>, and Yuko Tsuzuki<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Toshiba Corporation

<sup>2)</sup> Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corporation

<sup>3)</sup> Kubota Corporation

† Correspondence should be addressed to Takumi Obara :

(1 Toshiba-cho, Fuchu-shi, Tokyo 183-8511 Japan

E-mail : takumi.obara@toshiba.co.jp)

## Abstract

This paper proposes a novel aeration control scheme for reducing power consumption in MBR process and shows the demonstration results of the proposed control scheme at a full-scale MBR plant. The control system performs membrane air scour control based on the prediction of transmembrane pressure (TMP). For scouring aeration control, we developed a TMP prediction model which combined membrane filtration model with linear regression model to associate MBR operation condition and the aeration control scheme based on the prediction. An experiment was carried out with a full-scale membrane unit, and the results indicate that the control scheme could reduce the air volume for scouring aeration.

**Key words:** membrane bio-reactor, aeration control, energy saving, wastewater treatment, membrane fouling