

〈研究発表〉

数値流体解析を用いた浸漬型正浸透膜エレメントの構造最適化

源 田 泰 士¹⁾, 寺 嶋 光 春¹⁾, アルイサウイ アルミリアニ ムハンマド アルアミン¹⁾
 安 井 英 齊¹⁾, 田 中 伸 一²⁾, 高 橋 惇 太³⁾, 松 林 未 理³⁾
 岩 本 拓 也³⁾, 山 本 志 野 歩⁴⁾, 大 熊 那 夫 紀⁴⁾

¹⁾北九州市立大学 国際環境工学部
 (〒 808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの 1-1 E-mail:m-terashima@kitakyu-u.ac.jp)

²⁾九州技研
 (〒 806-0063 福岡県北九州市八幡西区市瀬 3-2-29 E-mail:k-giken@abeam.ocn.ne.jp)

³⁾水 ing(株)
 (〒 105-0021 東京都港区東新橋 1-9-2 E-mail:takahashi.junta@swing-w.com)

⁴⁾(一財)造水促進センター
 (〒 103-0003 東京都中央区日本橋横山町 4-5 E-mail:ohkuma@wrpc.jp)

概 要

下水を省エネルギーで濃縮するための前処理が不要な浸漬型正浸透膜エレメントを開発することを目的とした。小型セルで流路高さと駆動液の循環流量を変化させることにより膜面剪断応力を変化させ、膜面剪断応力と膜面透過流束の関係を求めた。この関係と浸漬型正浸透膜エレメントの内部の数値流体力学解析による膜面剪断応力分布を組み合わせ、エレメントの総合的な透過流束を算出した。エネルギー消費と膜コストの総合的な観点からエレメント構造および駆動液循環流量を検討した。

キーワード：下水濃縮，シミュレーション，モデリング，FO 膜，CFD

原稿受付 2023.6.30

EICA: 28(2・3) 70-73

1. は じ め に

下水処理場では多大な電力を消費して曝気による酸素供給により流入下水中の大部分の有機物を酸化分解している。近年、流入下水を直接メタン発酵し、下水中有機物を省エネルギーで処理し、さらにメタンガスとしてエネルギーを回収するという検討もされているが、本手法は有機物濃度が低いためあまりメタンガスとして回収できず大部分のメタンガスが処理水放流先で大気中に放散してしまうという問題がある。希薄な下水中有機物を濃縮する方法として、日本の下水処理場¹⁾は、処理場数としては 1,898 処理場のうち 683 処理場が、また、処理水量としては処理場全体 5,061 万 $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ のうち 2,280 万 $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ が臨海部（最寄りの海岸から距離 2 km 以内）に位置しているという地理的な条件から、海水を駆動液（DS）として活用して正浸透（FO）膜を用いる方法が研究されている²⁻⁴⁾。

既存の FO 膜エレメントとして、スパイラル膜エレメントと中空糸膜エレメントが市販されているが、スパイラル膜エレメントは極めて狭い流路構造を持ち、また、中空糸膜エレメントは微細な中空糸膜が高密度に詰め込まれているため、膜の使用には前処理として懸濁物質を完全に除去することが必要であり、これに

多くのコストを要するため、下水を濃縮する用途への適用は困難であった。これを解決する、前処理が不要な新しい膜エレメント構造として、平膜状 FO 膜を袋状にして濃縮槽の中に浸漬して使用する浸漬型エレメント構造が考案されている⁵⁾。

FO 膜では膜表面の剪断応力が十分ないと濃度分極が発生して水の透過流束が低下するなど膜面剪断応力が処理性能に影響を与える。浸漬型 FO 膜エレメントでは、エレメント内部の剪断応力分布は DS 循環の流量に影響を受け、循環流量と圧力損失がエネルギー消費に影響するため、この最適化が重要であると考えられる。

そこで本研究では、まず、市販の FO 膜平膜について机上実験により膜面剪断応力と水透過流束の関係を明らかにした。次に、浸漬型 FO 膜エレメント内部の CFD 計算を実施して剪断応力分布を求めた上で膜面剪断応力と水透過流束の関係式と組み合わせることによってエレメント全体の総括的な水透過流束を算出した。さらに、様々な構造や運転条件について DS 循環のエネルギーと総括的な水透過流束の関係を求め合計コストの観点から構造や設計条件の最適化を試みた。

2. 実験方法

2.1 剪断応力と水透過流束の関係の測定

小型セル (有効膜面積 30 cm²) に、活性層が供給液側になるように FO 膜 (Fluid Technology Solutions Inc, Albany, USA) を設置した。供給液 (FS) として純水、駆動液 (DS) として NaCl 35 g L⁻¹ 溶液を用いた。FS 側膜面剪断応力が十分大きい条件下で、DS 側流路高さ d を 1, 2, 3 および 4 mm と変化させ、小形セル DS 循環流量 Q_c を変化させて水透過流束 J_w を測定し、DS 側膜面剪断応力 τ と水透過流束 J_w の関係を求めた。

2.2 浸漬型 FO 膜エレメントの構造と流体解析構造

浸漬型エレメントは 600 mm × 600 mm × 10 mm の枠体の 600 mm × 600 mm の面の両面に FO 膜を貼り付けてある。枠の片側に入口および出口を有し、エレメント内部に DS を循環 (供給および排出) させる。対称性から計算構造は実際のエレメントの 2 分の 1 の構造とし、片面は膜面を想定して滑りなし壁、もう片面は対称面とした。エレメント内に仕切りを設置し、入口から出口に至る経路として、エレメント内を 1 往復、2 往復、3 往復および 4 往復する構造を作成した。それぞれ、構造 1、構造 2、構造 3 および構造 4 とする。流体解析を実施した構造を Fig. 1 に示す。

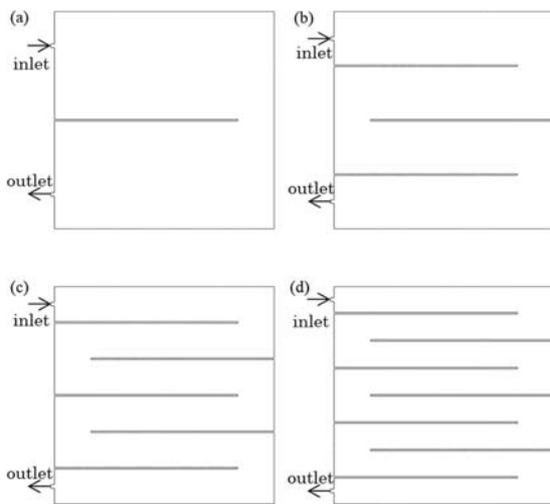


Fig. 1 Configurations for the CFD simulations, (a): conf. 1, (b): conf. 2, (c): conf. 3 and (d): conf. 4

2.3 流体解析方法

流体解析には ANSYS CFX2023R1 (ANSYS Inc., Canonsburg, USA) を用いた。流体は水とし、乱流モデルとして SST 乱流モデルを用いた。構造 1、構造 2、構造 3 および構造 4 において、それぞれ DS 循環流量 Q_{DS} を変化させて解析を実行した。十分に収束した解

析結果から、膜面剪断応力 τ の分布を得て、これと小型セルで求めた膜面剪断応力と膜利用効率の関係を組み合わせることで、局所的な膜利用効率 η_i を計算し、それを膜面全体の面積加重平均することで、総括膜利用効率 H_c を算出した。また、 τ の分布から膜エレメントを通過における圧力損失 P を計算した。

2.4 構造最適化検討

FO 膜装置の運転費は、FO 膜交換費用および DS を循環するための動力費の合計とした。FO 膜交換費用は、膜単価 20,000 円 m⁻²、膜の耐用年数 5 年間として計算した。DS を循環するための動力費は、ポンプ揚程 30 kPa、ポンプ効率 0.5、電力単価は kWh あたり 20 円として計算した。これら 5 年間での合計費用を 5 年間での膜透過水量で除し膜透過水量あたり合計コスト Y_T を算出した。

3. 結果および考察

3.1 剪断速度と水透過流束の関係

小形セルで d と Q_c を変化させたときの τ と J_w の関係を Fig. 2 に示す。 $\tau =$ 約 0.2 Pa 以上では J_w は最大値 $J_{w-MAX} = 10.4 \text{ L m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ で一定になった。これより低い範囲では $J_w = 12.8 \tau^{0.130}$ と近似された。 τ が一定以上高いと J_w が τ に影響しないのは外部濃度勾配が十分に小さいためであり、 τ が低い範囲で J_w が τ に影響するのは外部濃度勾配が生じているためであると考えられる。以上の結果から、 τ と J_w の関係は式 (1) で表すことができた。また、膜利用効率 η を式 (2) で定義した。

$$J_w = \min(12.8 \tau^{0.130}, J_{w-MAX}) \quad (1)$$

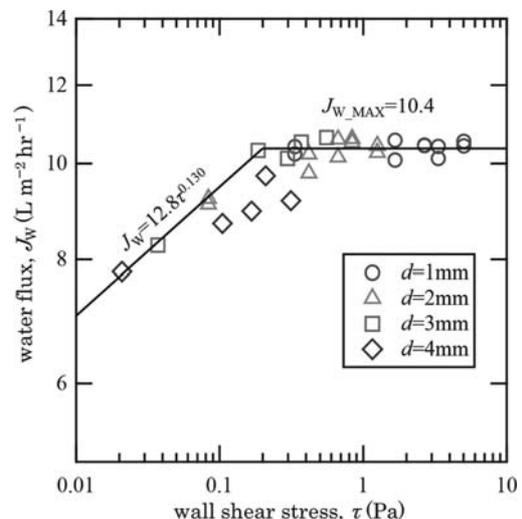


Fig. 2 Relationship between wall shear stress and water flux

$$\eta = \frac{J_w}{J_{w-\text{MAX}}} = \min(1.23 \tau^{0.130}, 1) \quad (2)$$

ここで、 J_w : 水透過流束 ($\text{L m}^{-2} \text{hr}^{-1}$), τ : 壁面剪断応力 (Pa), $J_{w-\text{MAX}}$: 最大水透過流束 ($=10.4 \text{ L m}^{-2} \text{hr}^{-1}$), η : 膜利用効率 (-) である。

3.2 流体解析結果

流体解析の結果の一例として、DS 循環流量 $Q_{\text{DS}}=1 \text{ L min}^{-1}$ のときの、構造 1-4 の、対称面における流速分布を Fig. 3(a) に、膜面における壁面剪断応力の分布を Fig. 3(b) に示す。折り返し回数が少ない構造では流速や壁面剪断応力の大きな箇所や小さな箇所の両方が顕著に存在した。往復回数が多く、すなわち流路幅が狭い構造では、流速や壁面剪断応力の大きさの分布があまりなく全体的に大きな値となっていた。Fig. 3(b) の剪断応力分布と式(2) から局所的な膜利用効率 η_i を計算し、膜面全体の面積加重平均することで、式(3) で定義する総括膜利用効率 H_c を算出した。

$$H_c = \frac{\sum \eta_i A_i}{\sum A_i} \quad (3)$$

ここで、 H_c : 総括膜利用効率 (-), A_i : 局所的な膜面積 (m^2) である。

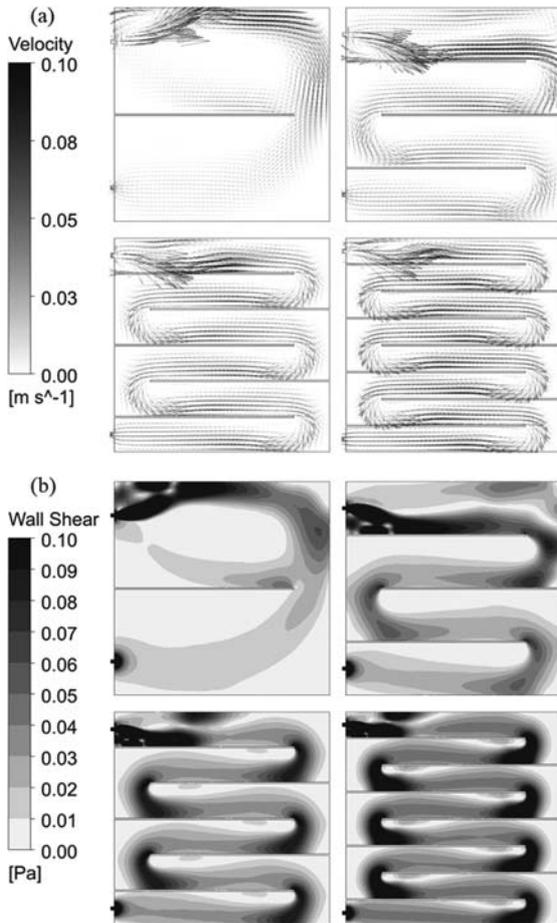


Fig. 3 Results of CFD simulation ($Q_{\text{DS}}=1 \text{ L min}^{-1}$), (a): vector plots profile and (b): wall shear stress profile for each configuration

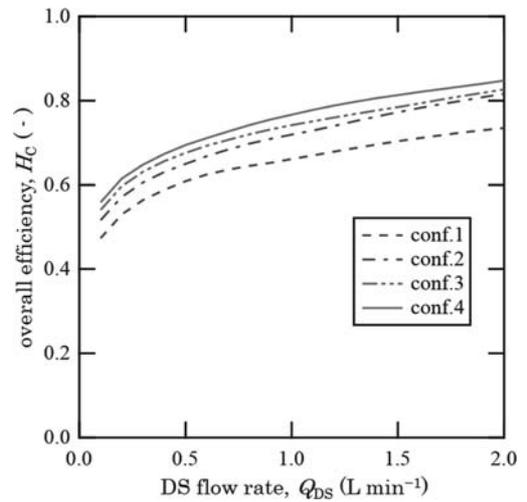


Fig. 4 Sensitivity plot of the overall efficiency H_c towards DS flowrate Q_{DS}

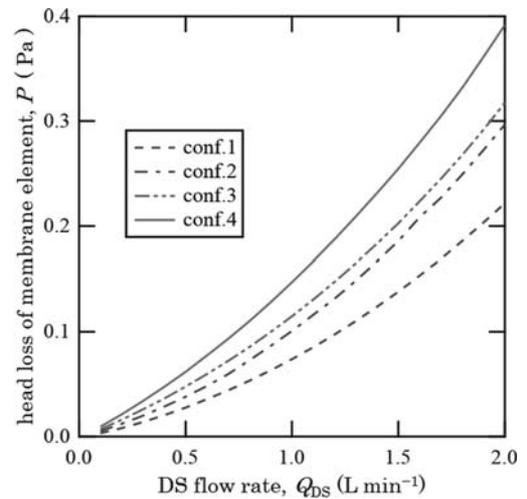


Fig. 5 Effect of DS flow rate Q_{DS} on the head loss of membrane element P

DS 循環流量 Q_{DS} と総括膜利用効率 H_c の関係を Fig. 4 に示す。 Q_{DS} の増加に伴い H_c は単調に増加したが、その増加幅は Q_{DS} が大きいほど小さくなった。また、折り返し回数が大きい構造ほど H_c は大きくなった。DS 循環流量 Q_{DS} と膜エレメント通過の圧損 P の関係を Fig. 5 に示す。 Q_{DS} の増加に伴い P は加速度的に増加した。また、折り返し回数が大きい構造ほど P が大きくなった。しかしながら、膜エレメント通過の圧損 P は今回の試算条件の中の最大でも 0.4 Pa 程度以下であり、循環のためのポンプ揚程として想定している 30 kPa に比べて十分に小さい (1% 程度以下である) ことから、次の最適化検討における DS 循環のための動力費用では循環のための全体的なポンプ揚程を考慮することとし、膜エレメント通過の圧損 P の影響は考慮しなかった。

3.3 構造最適化検討

DS 循環流量を膜面積で除した膜面当り DS 循環流

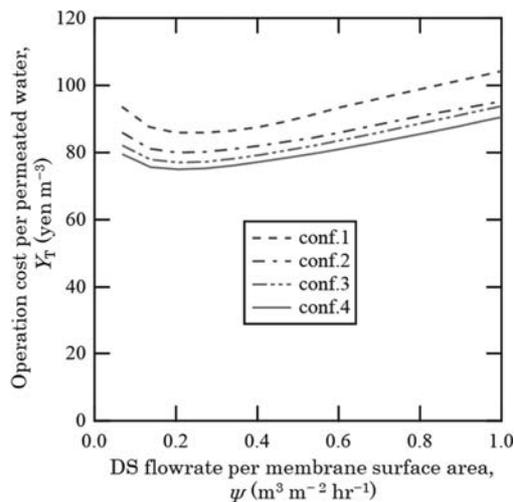


Fig. 6 Relationship between DS flowrate per membrane surface area Ψ and operation cost per permeated water

量 Ψ と膜透過水量あたり合計コスト Y_T の関係を Fig. 6 に示す。往復回数が多いほど、総括膜利用効率 H_C が大きいので、全体コストが小さくなった。膜面当り循環流量 Ψ がとても小さい条件では、総括的な膜利用効率が大きく減少するために FO 膜費用が大きくなり透過流量当たりの全体コストが増大した。膜面当り循環流量 Ψ が大きい条件では総括的な膜利用効率の増加がわずかであるにもかかわらず DS 循環のための動力費用が増加するため透過流量当たりの全体コストが増大した。以上のことから、膜面積当たり循環流量の最適値が存在し、今回の構造や試算条件では、構造 4 で $\Psi=0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ のときに費用は最小となり、このとき、膜交換費用 61 円 m^{-3} 、DS 循環動力費 15 円 m^{-3} 、合計 76 円 m^{-3} となった。

4. ま と め

本論文では、下水を省エネルギーで濃縮するための前処理が不要な浸漬型正浸透膜エレメントを開発する

ことを目的として、CFD 解析およびその結果を使用したコスト試算、最適化を実施した。小型セルで流路高さと駆動液の循環流量を変化させて膜面剪断応力を変化させて、膜面剪断応力と膜面透過流束の関係を求め、この関係と浸漬型正浸透膜エレメントの内部の数値流体力学解析による膜面剪断応力分布を組み合わせ、エレメントの総合的な透過流束を算出した。本方法により、エネルギー消費と膜コストの総合的な観点からエレメント構造および駆動液循環流量を検討してこれらを最適化することができると考えられた。

謝 辞

本研究の一部は令和 4 年度北九州市環境未来技術開発助成により実施された。

参 考 文 献

- 1) 公共投資ジャーナル社：下水処理場ガイド 2017, 公共投資ジャーナル社 (2017)
- 2) Fujioka Takahiro, Tra Ngo My Thi, Mochochoko Tanki, Boivin Sandrine, Ohkuma Naoki, Yasui Hidenari, Terashima Mitsuharu: Biofouling control of a forward osmosis membrane during single-pass pre-concentration of wastewater, *Chemosphere*, Vol. 257, No. 127263, pp. 1-9 (2020)
- 3) Fujioka Takahiro, Nguyen Kha, Hoang Anh, Ueyama Tetsuro, Yasui Hidenari, Terashima Mitsuharu, Nghiem Long: Biofouling Mitigation by Chloramination during Forward Osmosis Filtration of Wastewater, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 15, No. 10, pp. 2124-2135 (2018)
- 4) 高橋惇太, 松林未理, 島村和彰, 石川英之, 寺嶋光春, 安井英斉, 藤岡貴浩, 河内隆秀, 寺地裕康, 大熊那夫紀, 山本志野歩: FO 膜を用いた超省エネ型下水処理システム —— 要素技術の実証と省エネ効果試算 ——, 第 59 回下水道研究発表会講演要旨集, pp. 802-804 (2022)
- 5) 源田泰士, 寺嶋光春, 辰巳新一, 安井英斉, 田中伸一, 高橋惇太, 松林未理, 岩本拓也, 山本志野歩, 大熊那夫紀: 下水濃縮のための浸漬型正浸透 (FO) 膜エレメントの研究, 第 57 回日本水環境学会年会講演集, p. 609 (2023)