

〈研究発表〉

含油廃水の膜処理における透過流束の予測

鈴木 祐喜¹⁾, 小林 琢也²⁾, 加納 一憲³⁾, 鈴木 利宏⁴⁾¹⁾水ing(株) 研究開発センター 開発二課
(〒251-8502 神奈川県藤沢市本藤沢4-2-1 E-mail: suzuki.yuki@swing-w.com)²⁾水ing(株) 研究開発センター 開発一課
(〒251-8502 神奈川県藤沢市本藤沢4-2-1 E-mail: kobayashi.takuya@swing-w.com)³⁾水ing(株) 用排水技術部 海外用排水技術課
(〒108-8470 東京都港区港南1-7-18 E-mail: kano.kazunori@swing-w.com)⁴⁾水ing(株) 用排水技術統括
(〒108-8470 東京都港区港南1-7-18 E-mail: suzuki.toshihiro@swing-w.com))

概要

企業の生産活動等により排出される含油廃水を処理する方法として、膜処理は有効な手段の一つである。含油廃水の濃縮処理における透過流束の予測手法を確立することを目的として、実際の製缶工場から排出された含油廃液を用いて試験を実施した。処理試験の結果より、膜間差圧に依存しない透過流束である限界透過流束は、原水の油分濃度および水温、循環流速のパラメーターを用いたモデル式で表現することができた。これは実処理設備に設置した各センサーの値を用いて、透過流束を予測可能であることを示唆している。

キーワード：含油廃水, 膜処理, 透過流束, 予測式
原稿受付 2018.7.3

EICA: 23(2・3) 60-63

1. はじめに

日本国内において、産業廃棄物の廃油は年間 2,953 千 t (2015 年度実績) 排出されている¹⁾。廃油は、減容や再利用の処理が有効な廃棄物の一つであるが、中でも含油廃水を処理する方法には、物理処理、化学処理、生物処理等様々ある。

含油廃水を濃縮・減容する方法として、膜処理は有効な手段の一つである。含油廃水を膜処理する際、その透過流束は廃水性状に大きく依存する。そのため、含油廃水を膜により濃縮・減容処理する場合、その透過流束は経時的に変化する廃水性状に応じて変化すると想定される。したがって、含油廃水の膜処理における設計条件を決定する際には、各工場における廃水性状に応じた運転条件を見出すことが重要である。

そこで本研究では、実際の製缶工場より排出された含油廃水を用いた処理試験を行い、含油廃水の濃縮処理における透過流束を決定するパラメーターについて検討した。また、その結果を用いて透過流束を予測するモデル式の作成および同式を用いた制御方法について検討したので報告する。

2. 実験方法

実験装置のフローを Fig. 1 に示す。分離膜にはモ

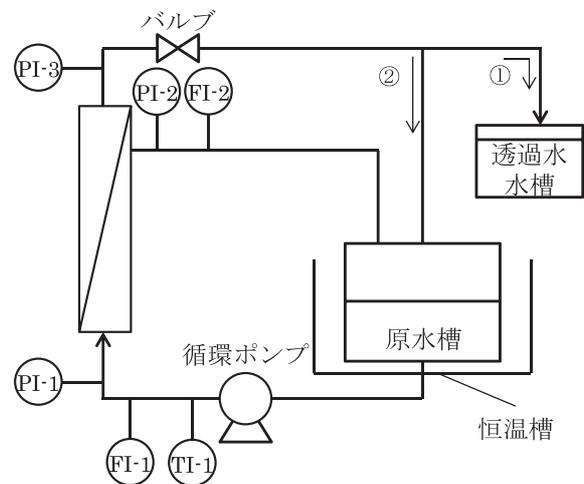


Fig. 1 Experimental flow

ノリス型セラミック膜 (分画分子量: 300 kDa, 膜面積: 0.35 m²) を、供試原水には製缶工場から排出された水溶性切削油剤廃液 (ヘキサン抽出物質濃度 C: 15800 mg/L) を用いた。処理試験は、透過水を装置系外に排出する濃縮処理 (Fig. 1, 透過水流路①) と、透過水を原水槽へ返送する全量循環処理 (Fig. 1, 透過水流路②) を行った。

濃縮処理では、原水の濃縮倍率が容量比で 1, 2, 5 倍となるまで濃縮した。また、全量循環処理では、前述の各濃縮倍率において、膜間差圧 ΔP : 100~450 kPa (50 kPa 間隔), 供給水水温 T: 30, 40, 50°C, 循

環流速 v : 2.0, 2.3, 2.5, 2.8, 3.0 m/s の各条件における透過流束を測定した。

3. 実験結果および考察

各 T , v , C における ΔP に対する透過流束 ($T=30^\circ\text{C}$) の相対値を Fig. 2 に示す。Fig. 2 より、透過流束は ΔP が比較的低い範囲では ΔP に依存して増加する一方、 ΔP がある値以上で定常となった。このことから、今回の試験条件における膜処理は、ゲル分極モデルで説明できることがわかった²⁾。この ΔP に依存しない透過流束は限界透過流束 J_{lim} とよばれる。以下では、透過流束と ΔP 以外のパラメーターの関係を解析するために、Fig. 2 で得られた J_{lim} と T , v , C との関係について整理・解析した。

J_{lim} は、膜面における物質収支より、透過水側へ溶質が流出しないとすると、式 (1) で表現できる。

$$J_{lim} = k \cdot \ln(C_g/C) \quad (1)$$

ここで、 k : 物質移道係数、 C_g : 膜面 (ゲル層) における溶質濃度を示す。

一方、膜面におけるゲル分極層の厚さは v に依存するため、

k は式 (2) で表すことができる。

$$k/k_0 = (v/v_0)^n \quad (2)$$

ここで、下付きの 0: 基準点、 n : 定数を示す。

$T=30^\circ\text{C}$ における J_{lim} と v の関係を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より、 J_{lim} は循環流速 v が増加するにつれて増加しており、実験値と式 (2) はよく一致していた。一方、 $T=30^\circ\text{C}$ における J_{lim} と C の関係を Fig. 4 に示す。Fig. 4 より、 J_{lim} は供給水の油分濃度 C が増加するにつれて減少しており、実験値と式 (1) はよく一致していた。しかし、式 (1) によると C_g は k に依存せず一定値となるが、本実験における C_g (Fig. 4 における横軸切片) は各 v で一定値に収束しなかった。Noble and Stein³⁾ は同様の結果を得ており、 k は層流や遷移流において v に依存するが、乱流では一定になると結論付けている。そのため、本実験に条件においても、乱流状態であったと推測される。

さらに、 J_{lim} は、ダルシー則と粘度の温度依存性より、

$$\ln(J_{lim}) \propto 1/T \quad (3)$$

と表せる。また、 k は温度に依存するため、式 (1) より

$$\ln(J_{lim}) \propto k \propto 1/T \quad (4)$$

と表せる。本研究における J_{lim} は、式 (3), (4) によ

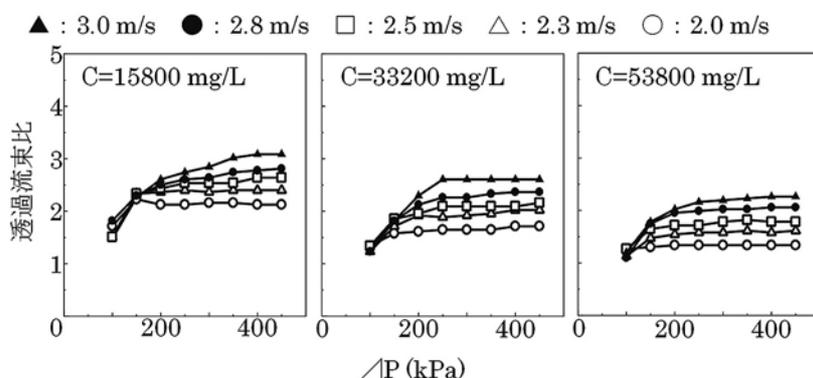


Fig. 2 The relationship between permeate flux and Oil concentration at 30°C

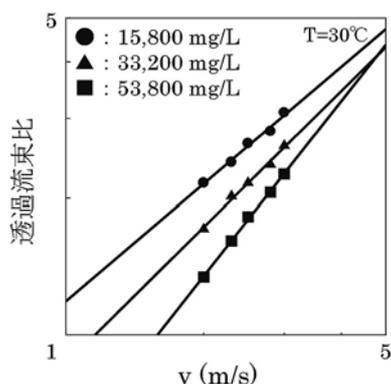


Fig. 3 The relationship between limiting permeate flux and cross flow velocity at 30°C

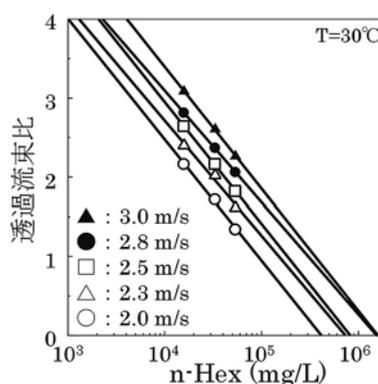


Fig. 4 The relationship between limiting permeate flux and oil concentration at 30°C

く一致した。

式 (1)~(4) を用いると, J_{lim} は式 (5) に示したように T , v , C の関数で表すことができる。

$$J_{lim} = f(T, v, C) \\ = J_{lim0} \times \ln(C_g/C) / \ln(C_g/C_0) \times \exp(E/T_0) \\ \times \exp(E/T) \times (v/v_0)^n \times \exp(-Q/T) / \\ \exp(-Q/T_0) \quad (5)$$

ここで J_{lim} : 限界透過流速, J_{lim0} : 基準点における限界透過流速, C_g : ゲル層における溶質濃度, C : 供給水の溶出濃度の実測値, C_0 : 基準点における供給水の溶出濃度, E , Q および n : 係数, T_0 : 基準点における被処理水の水温, T : 水温の実測値, v : 膜面流速の実測値, v_0 : 基準点における膜面流速の実測値を示す。

Fig. 5 には, 式 (5) より求めた J_{lim} の計算値および実測値を示した。ここで, 式 (5) における係数 n は $T=30^\circ\text{C}$ および濃縮倍率 1 倍 ($C=15,800 \text{ mg/L}$) のときの計 5 データ, E および Q は $v=2.0 \text{ m/s}$ のときの計 9 データを, それぞれ学習データとして算出した。そして, 同系数を用いて, 係数の算出に用いた以外の条件における J_{lim} の計算値および実測値を比較した。**Fig. 5** より, J_{lim} の計算値および実測値はよく一致した。これは, 実際の膜処理設備に設置した水温計, 油分濃度計, 流速計の指示値を用いて, 限界透過流束の予測および制御が可能であることを示唆している。

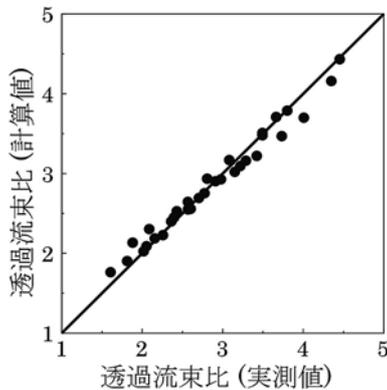
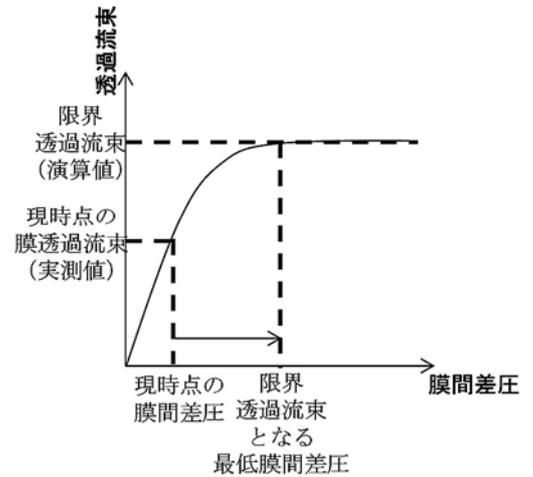


Fig. 5 The relationship between observed and calculated permeate flux

4. 膜処理条件の制御方法例

Fig. 6 には, J_{lim} を基準とした膜間差圧の制御方法の概念図を示した。実際の膜処理設備において式 (5) を適用する場合は, 係数 n , E , Q および基準点における J_{lim0} と T , v , C との関係を別途予備試験等で取得したデータを用いて算出し, また現時点における T , v , C の実測値を代入することで J_{lim} の予測値を求めることができる。同予測値を用いた制御方法の一例

理論値>実測値



理論値=実測値

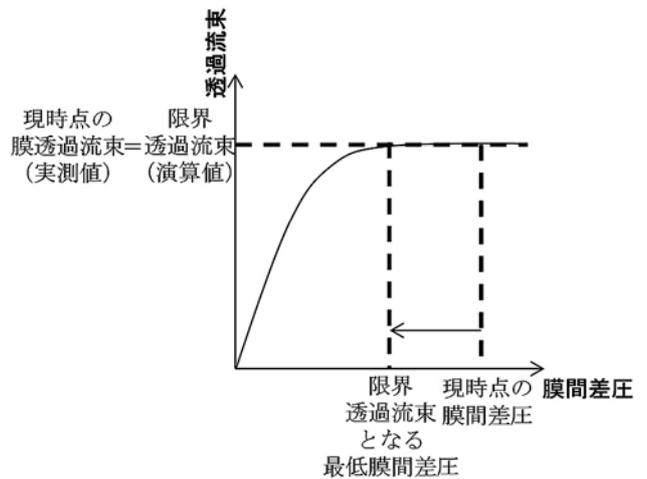


Fig. 6 The conceptual diagram of the method for controlling the transmembrane pressure

は以下の通りである。

(1) 現時点の透過流束が J_{lim} の演算値より小さい場合

J_{lim} の演算結果と現時点における透過流速の実測値を比較し, 実測値が演算値よりも小さい場合, 透過流速の差分に応じて, 演算値=実測値となるまで, ΔP を増加させるようにポンプの駆動もしくはバルブの開度を制御する。このように制御することで, 常に効率の高い膜処理を行うことができる。

(2) 現時点の透過流束と J_{lim} が同じである場合

J_{lim} の演算結果と現時点における透過流速の実測値を比較し, 演算値と実測値が同じ場合, 透過流速が所定の値, つまり限界透過流束に収束している場合がある。これは, 被処理水中の溶質が膜面近傍に留まることで, 膜表面にゲル層が生じ, ゲル層の抵抗が ΔP に比例して増加するためである。この場合, ΔP が余剰状態にあるといえるため, 一旦演算値より実測値が低くなるまで ΔP を下げ, その後再度演算値と実測値が

同等となるまで過不足なく ΔP を上昇させる。このように制御することで、過剰なエネルギーの浪費およびファウリングの進行を低減することが可能となると考えられる。

上記のように原水の性状変動に応じて、常に過不足のない膜間差圧で限界透過流束となるように制御することが可能である。

5. ま と め

製缶工場から排出された含油廃液を用いた膜処理試験の結果より、同廃水の膜ろ過特性はゲル分極モデルに従った。さらに、そのときの限界透過流束は T , v , C を用いたモデル式で表現することができたことから、

実際の膜処理設備において各センサーの指示値を用いて、限界透過流束の予測および制御が可能であることが示唆された。

参 考 文 献

- 1) 環境省, 産業廃棄物の排出及び処理状況等 (平成 27 年度実績) について, <https://www.env.go.jp/press/105043.html> (2018)
- 2) S. Kimura and S. Sourirajan: *AIChEJ*, 13, 497 (1964)
- 3) R. D. Noble and S. A. Stern: *Membrane Separations Technology: Principles and Applications*, Elsevier Science, Amsterdam (1995)