

II-514 平膜クロスフロー濾過へのゲル層モデルの適用

東京大学大学院 学生員 浦瀬太郎
東京大学工学部 正会員 山本和夫

1. はじめに 沈澱法そのほかの代替として、膜分離による固液分離が注目を集めている。現在、ビル廃水処理などで用いられている膜分離装置は、200[kPa]程度の濾過圧力と2[m/sec]程度の膜面流速で運転されていることが多い。膜分離プロセスをより省エネルギー的なものにしていく意味で、今後ますます低圧で低流速領域での適用が進んでいくものと考えられる。したがって、そのような条件下での濾過特性を調べることは重要である。本研究は、平膜クロスフローの濾過特性を調べる目的でアクリル粒子を用いて濾過特性試験を行ない逆拡散を考慮したゲル層モデルの適用を試みたものである。

2. 実験装置と実験方法 実験装置の概略を図1に示す。フィードタンクとモジュールの間を懸濁液が加圧循環する。透過液はメスシリンダーで測った。膜分離モジュールは、三井石油化学㈱製の平膜薄層流タイプ(流路:厚1.4mm×幅80mm×長150mm)であって、有効膜面積は100cm²である。使用した膜は、ポリフッ化ビニリデンでできた孔径0.1μmの精密濾過膜である。使用した粒子は、Poly-Methyl-MetaAcrylate(PMMA)粒子で平均粒径が0.15μm、0.45μm、0.8μmの3種類である。濃度は、1(g/l)で、温度は25℃に設定した。

3. ゲル層モデルの定式化 活性汚泥など高濃度懸濁液の精密濾過に対してのモデルとしてゲル層モデルが考えられる。

$$J = \Delta P / R \quad (1)$$

$$R = R_m + R_p + R_c \quad (2)$$

(J:フラックス ΔP:操作圧力 R:抵抗)

R_mは、膜自身の濾過抵抗で膜の種類を変えなければ一定値を取る。R_pは、膜の穴内部の濾過抵抗であるが今回の実験では短時間の濾過であるためこれも一定値とした。R_cは、膜面に蓄積するケーキ層部分の濾過抵抗である(図2)。ケーキ層の消長からR_cは次式のように記述できる。ただしR_c≥0である。

$$dR_c/dt = k_1 \cdot (CB \cdot J - k_2) \quad (3)$$

CBは、バルク(主流側)の粒子濃度、tは、時間である。k₁は、膜面堆積量と抵抗の換算値で、フラックスの減少速度を決めるパラメーターであり、k₁をKozeny-Carmanの式から(4)式で与えたものと、実験結果から求めたk₁と比較することによって、空隙率を推定することが出来る。

$$k_1 = 180 \cdot \eta \cdot (1 - \varepsilon) / (\varepsilon^3 \rho_p d_p^2) \quad \varepsilon: \text{空隙率} \quad \rho_p: \text{粒子の比重} \quad d_p: \text{粒子径} \quad (4)$$

k₂はクロスフロー効果により膜面に堆積したケーキがバルクへ逆拡散していく量であって(3)式=0と置くと明らかなように定常状態でのフラックスを決定するパラメーターで膜面流速とバルク濃度の関数になることが予想される。パラメーターk₁、k₂および(1)-(3)式を用いてフラックスの時間変化を予測できる。

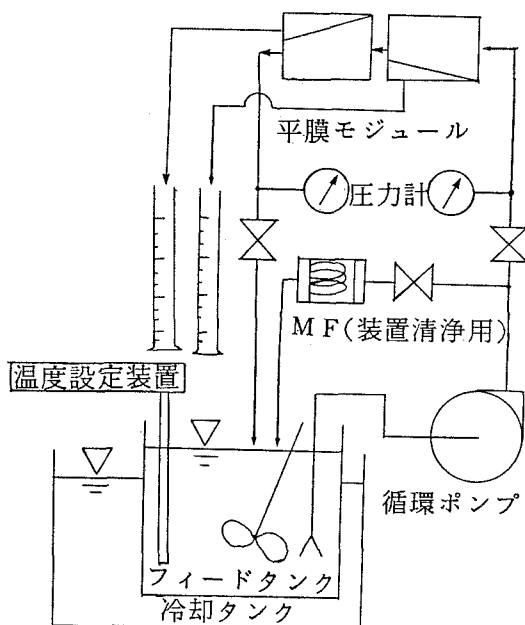


図1 実験装置

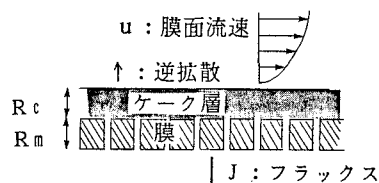


図2 ゲル層モデル概念図

4. 実験データへのモデルのあてはめ

操作圧力、膜面流速などの操作条件を変えて実験を行い、それぞれのRUNについて、 k_1 、 k_2 を最小2乗法によるカーブフィティングにより求めた。膜面流速を変えて行なった実験結果を図3に示す。 k_1 、 k_2 をうまく選んでやることによって、実測値に(1)-(3)式を用いたモデル計算値を合わせることができる。 k_1 と k_2 の変化を表1に示す。膜面流速を変えた実験では、 k_1 の推定値に差が無いのに比べ k_2 は膜面流速の増加とともに大きくなっている。使用粒子径を変えた実験では粒子径を小さくすると k_1 が大きくなっている。(4)式から空隙率を推定すると表2のように最密充填($\varepsilon = 0.33$)よりかなり大きい。操作圧力を変えた実験では、圧力の増加に対して k_1 が増加していることから、圧力の増加とともにケーキ層の圧密化がみられる。操作圧力とフラックスの関係を図4に整理した。この図からかなり低い圧力でこれ以上フラックスが伸びない状態、すなわち限界フラックスに達していることがわかる。また、使用後の膜を水で洗浄して濾過抵抗を測ることによって、 R_p を求め、 R_c 、 R_m とともに図5に図示した。 R_c の増大が低圧で限界フラックスに達している理由であることがわかる。またRUN4-9における k_2 のばらつきは、バルク濃度が実験中ばらついたことにもよるが粒子径や操作圧力の k_2 への影響に関しては今後も検討を要すると思われる。

表1 膜面流速、粒子径、圧力のパラメーター k_1 、 k_2 への影響

RUN No.	膜面流速 (m/sec)	粒子径 (μm)	操作圧力 (kPa)	k_1 の推定値 (1/sec)	k_2 の推定値 ($\text{kg}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)
1	1.4			5.4×10^9	7.6×10^{-5}
2	1.0	0.15	60	5.0×10^9	4.6×10^{-5}
3	0.9			6.0×10^9	3.3×10^{-5}
4		0.15		7.4×10^9	4.2×10^{-5}
5	1.0	0.45	70	3.6×10^9	2.9×10^{-5}
6		0.8		1.6×10^9	3.2×10^{-5}
7			40	6.4×10^9	4.5×10^{-5}
8	1.0	0.15	70	7.4×10^9	4.2×10^{-5}
9			100	8.6×10^9	3.7×10^{-5}

5. 結論

- (1) 逆拡散を加味したゲル層モデルでアクリル粒子の平膜クロスフローのフラックスの変化過程を説明できた。
- (2) 本実験条件下では、現象の大部分を膜自身ではなく膜面のケーキ層が支配する。よって、操作圧力よりも膜面での乱流強度を決定する膜面流速が透過フラックスを支配する。また被濾過物質の粒径やケーキ層の空隙率がフラックス減少速度を決める。

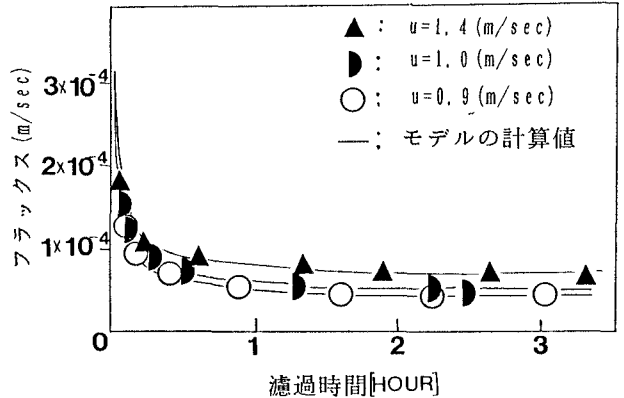


図3 膜面流速とフラックスの経時変化

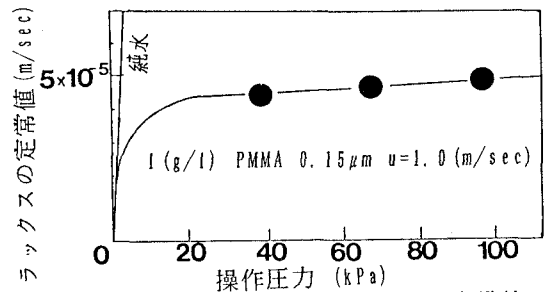


図4 操作圧力とフラックスの定常値

表2 ケーク層の空隙率の推定

RUN No.	粒子径 (μm)	ε の推定値 (-)
4	0.15	0.65
5	0.45	0.46
6	0.8	0.42

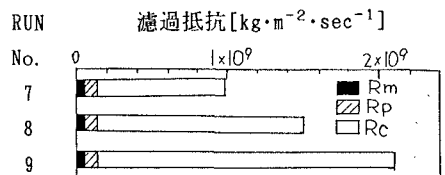


図5 各条件下で定常状態での R_c