

II-393

限外ろ過膜のウイルス透過率に関する数値シミュレーション

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
 東京大学工学部 正会員 大垣眞一郎

1. はじめに 本研究では、廃水処理で広く使われている限外ろ過膜についてそのウイルス透過率を実験で求め、細孔分布を仮定した数値シミュレーションの結果との整合性を調べた。

2. 実験 被ろ過試料として、大腸菌RNAファージの一種であるQ β (25nm程度の粒子径を持つ)をウイルス粒子のトレーサーとして加えた7mMリン酸緩衝液pH=7をもちいた。活性汚泥懸濁液などを供試した場合に比べ、膜面堆積層によるろ過効果や懸濁物質への吸着効果が期待できないため、ウイルスは、膜をリークしやすい状態にあると考えられる。ろ過は、クロスフロー方式で、操作条件に多少ばらつきがあるが、圧力 $\Delta P=50\sim 20$ kPa, 膜面流速0.8~1.2m/secで1時間装置を運転した。使用した膜、膜モジュールタイプ、および実験結果を図1に示した。ウイルス透過率は、 C_p/C_b で評価した。全ての膜でウイルスのリークが認められた。

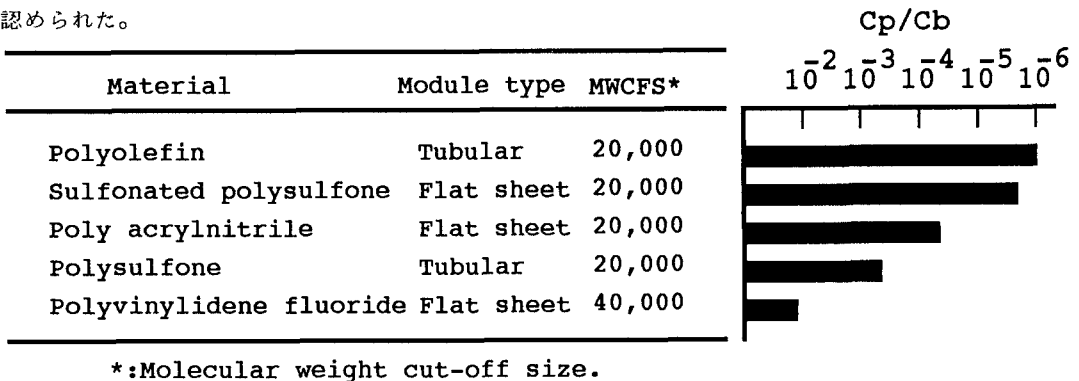


図-1 使用した膜の種類と実験で求めた各膜のウイルス透過率

3. 数値シミュレーション 本実験においては、バルク液中RNA断片による感染の成立やモジュールパッキンからのリークはないと判断されるため、膜そのものの細孔径のパラッキによってウイルスのリークを説明する。小原らがサーモポロメトリにより分画分子量 200,000の限外ろ過膜の細孔分布を測定したところ、細孔径毎の細孔面積が、対数正規分布をし、(1)式のような分布関数上で $\sigma=0.4$, $r_o=25$ nm程度であるという¹⁾。本研究で用いた分画分子量20,000程度の膜の細孔面積分布として、 $\sigma=0.4$, $r_o=5$ nmの対数正規分布を仮定し、細孔モデル (2)式を用いて、細

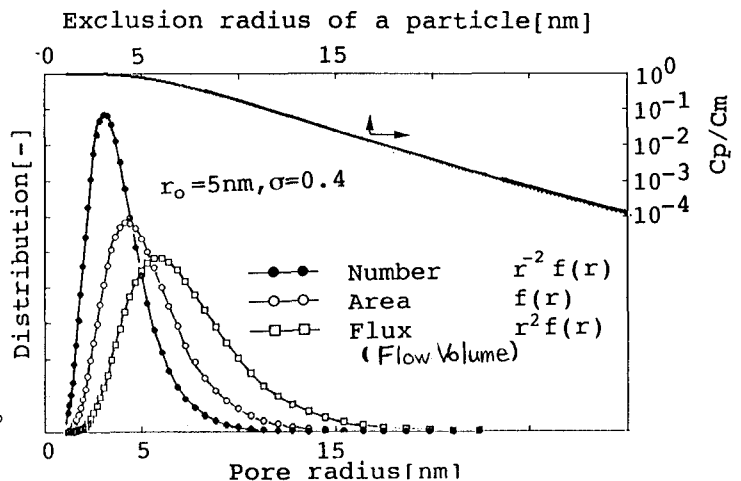


図-2 細孔面積分布を仮定した場合の細孔数分布とフラックス分布、および排除半径 r_e の粒子の膜透過率

孔径毎の細孔数分布とフラックスを計算した結果を図2に示す。たとえ、細孔数の上からは、鋭い分布形を持っていても、流量（フラックス）分布では大きな細孔の影響が無視し得ないことがわかる。透過流量のうち $r > r_e$ の細孔を通過する流量の割合から、排除半径 r_e を持つ粒子の透過率は(3)式で与えられる。 C_m は、広い意味での濃度分極現象により、 C_b より1桁程度大きいと考えられる。図2の上部に r_e の透過率への影響を示す。排除半径の大きい粒子ほど膜をリークする量が少なくなることがわかる。

4. パラメーターの感度解析

r_o を変えた場合の C_p/C_m への影響を図3に、 σ を変えた場合を図4に示す。実験で用いた $Q\beta$ は25nmの粒子径を持つので、 $r_e=12.5$ nmを(3)式に代入すれば、 $Q\beta$ の膜透過率が求まると考えられるが、実際には、膜と $Q\beta$ の相互作用により、ちょうどきっちりの細孔を $Q\beta$ は通過しえないと考えられる。よって、 $r_e=15$ nmとしたときの C_p/C_m を図中の表に記した。特に、 σ を変化させるとウイルス透過率は大きく変化した。本研究での分布関数の仮定には、議論の余地があるが、 $\sigma=0.4$ 程度の細孔のばらつきを仮定すれば、本研究で用いた膜のウイルスのリークを十分説明することが可能であった。

5. まとめ 種々の限外ろ過膜のウイルス透過率を大腸菌ファージ $Q\beta$ を用いて調べた。細孔径の分布関数を仮定することによって、ウイルスのリークを数値計算で説明することが可能であった。

参考文献 (1)小原知海, 中尾真一, 木村尚史(1991), 化学工学秋季大会講演集

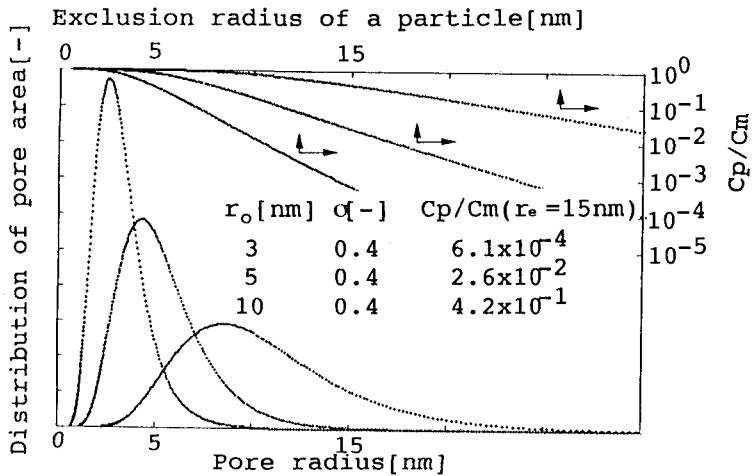


図-3 中心細孔半径 r_o の粒子透過率への影響

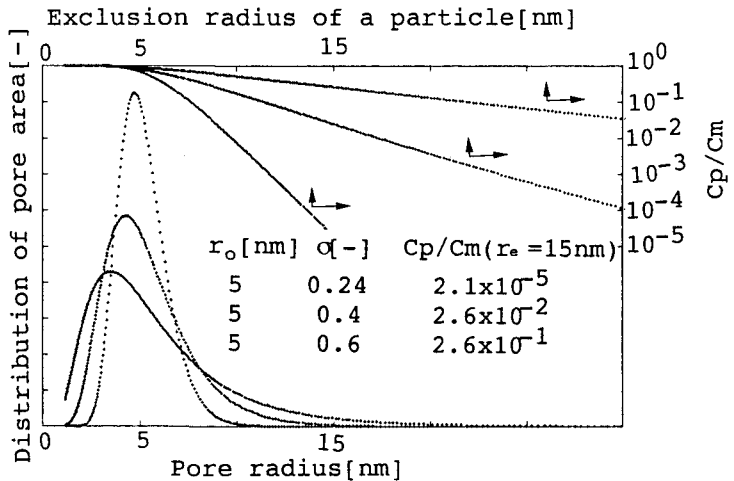


図-4 細孔ばらつき σ の粒子透過率への影響

$$f(r_p) = \frac{1}{r_p \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(r_p/r_o))^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1) \quad J_v = \frac{A \cdot \Delta P \cdot r_p^2}{8\eta \cdot \Delta y} \quad (2)$$

$$\frac{C_p}{C_m} = \frac{\int r^2 f(r) dr [\text{積分区間} | r=r_e \text{ から } r=\infty \text{ まで}]}{\int r^2 f(r) dr [\text{積分区間} | r=0 \text{ から } r=\infty \text{ まで}]} \quad (3)$$

$A (=n\pi r_p^2)$: 単位膜面積当りの細孔面積, C_b は: バルク中の $Q\beta$ 濃度, C_m : 膜面での $Q\beta$ の濃度, C_p : 膜透過液中の $Q\beta$ の濃度, ΔP : 圧力, r_e : 粒子の排除粒径, r_o : 中心細孔半径, r_p : 細孔半径, Δy : 活性スキン層厚さ, η : 粘性, σ : 細孔ばらつき