

VII-7

中空糸内圧型膜ろ過における膜破断のモデル解析とその評価

東北大学 学生員○大野 崇
東北大学 正会員 後藤光亀
東北大学 正会員 大村達夫

1. はじめに

現在、小規模水道を中心に膜処理が次第に普及しており、除去・運転実績を確実に上げている。近年問題とされているクリプトスポリジウムのような、少量の摂取でも感染を引き起こす病原微生物への対策としても膜処理は有効であるとされている。しかしながら膜破断に関しては、原水中の病原微生物による感染リスクや検出方法などに関する議論が十分なされていない。

そこで本研究では、中空糸内圧型クロスフロー式膜ろ過における膜破断時モデルを構築し、清水を用いた検証実験との比較検討を行った。また、実規模を想定した膜破断に適用することで、原水流出についての定量的な評価を行った。

2. 膜ろ過基礎式¹⁾

内圧型クロスフロー式中空糸膜において、膜長さ dx の間に減少する中空糸内流量は膜外部へ流出する透過水量であるので連続の式より次式を得る。

$$\frac{dv}{dx} = -\frac{4D\mu}{D^2}$$

ここに、 x ：膜始端からの距離(m)、 v ：距離 x における循環流速(m/s)、 u ：距離 x において膜を透過する流速($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}$)、 D ：中空糸内径(m)である。

中空糸内を通過する水の流れが層流である場合、次式が成立する。

$$\frac{dp}{dx} = -\left(\frac{32\mu v}{D^2} + \rho g \frac{dz}{dx}\right)$$

また、乱流の場合は次式となる。

$$\frac{dp}{\rho g} = -\left(f \frac{dx}{D} \frac{v^2}{2g} + dz\right)$$

ここに、 P ：距離 x における圧力(Pa)、 z ：鉛直方向の位置水頭(m)、 g ：重力加速度(m/s^2)、 ρ ：水の密度(kg/m^3)、 μ ：水の粘性係数($\text{Pa}\cdot\text{s}$)、 f ：摩擦損失係数(-)である。

膜を透過する流速は、ケーケろ過理論から次式で表される。

$$u = \frac{P}{\mu R}$$

ここに、 R ：膜抵抗($1/\text{m}$)である。

これらの基礎式を図-1 に示したような破断時の3つの流路に適用することで、膜破断時に原水がろ水側に流出する量を求めた。

モジュールから得られる全流量に占める破断面からの原水流出量の割合を次式の原水流出率によって表現し、破断の影響を評価した。

$$\alpha = \frac{Q_{\text{broken}}}{Q_{\text{f, total}}} \times 100$$

ここに、 α ：原水流出率(%), $Q_{\text{f, total}}$ ：全ろ過流量(m^3/s)、 Q_{broken} ：破断面からの流出流量(m^3/s)である。

3. 実験方法

実験に用いた膜は、旭化成工業(株)製ポリアクリルニトリル中空糸UF膜(分画分子量 13,000Da)のラボ用モジュールで、内径 0.8mm の中空糸が 400 本充填されており、膜ろ過面積は 0.2m^2 である。原水は、水道水を同膜モジュールで一度ろ過したものを使用し、恒温装置により水温を 20 度に保持した。図-2 に実験装置を示す。

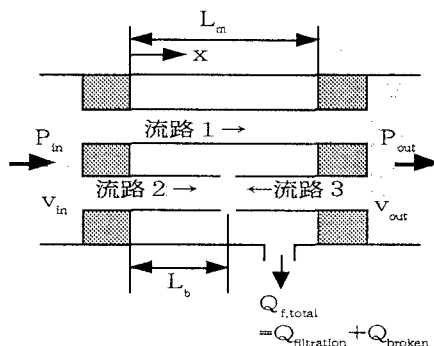


図-1 膜破断状況モデル図

P ：圧力(Pa)、 v ：循環流速(m/s)、 L_m ：モジュール長さ(m)、 L_b ：入口側の膜固定部から破断位置までの距離(m)、 $Q_{\text{f, total}}$ ：全膜ろ過流量(m^3/s)、 $Q_{\text{filtration}}$ ：膜透過流量(m^3/s)、 Q_{broken} ：破断面からの流出流量(m^3/s)

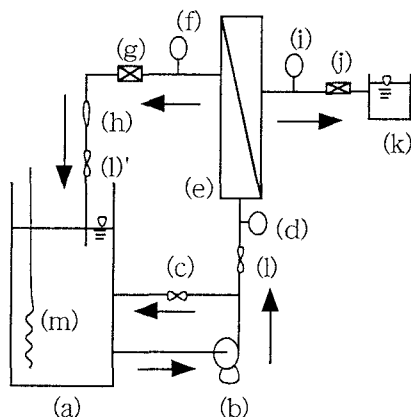


図-2 実験装置図：(a)原水タンク、(b)加圧ポンプ、(c)バイパス弁、(d)入口圧力計、(e)膜モジュール、(f)出口圧力計、(g)循環流速計、(h)定流量弁、(i)ろ液側圧力計、(j)透過流量計、(k)ろ液タンク、(l)制御弁、(m)恒温装置

バイパス弁を調節することで数段階の定量ろ過を行い、入口・出口圧力と循環流量をパソコンにより連続的に計測した。

膜の破断はモジュール側面に設けられている通水口よりカッターを用いて行い、中空糸1本を固定部から1cmの地点で完全に切断した。実験装置へのモジュール装着方向を変えることで、モジュール入口破断及び出口破断を表現し、膜破断時の計測を行った。

4. モデルの検証

透過流束を変化させた場合のモジュール入口・出口圧力について、計算値と理論値を比較したものを図-3に示す。

入口圧力に関しては透過流束が大きい場合に、出口圧力に関しては透過流束の小さい場合に、入口破断・出口破断ともに計算値と理論値の差が見られた。今回の測定範囲に置いてはその差が最大5kPaであった。しかしながら、浄水で多く用いられる1m/d付近に置いては圧力計の精度を考慮すると許容できる範囲であると考え、このモデルは膜ろ過における膜破断を十分表現していると判断した。

5. 流出率の定量的評価

今回の膜ろ過における膜破断時モデルを、原水にクリプトスポリジウムを含むような浄水膜ろ過施設での膜破断に適用して数値計算を行い、原水流出を定量的に評価した。以下にその計算条件を示す

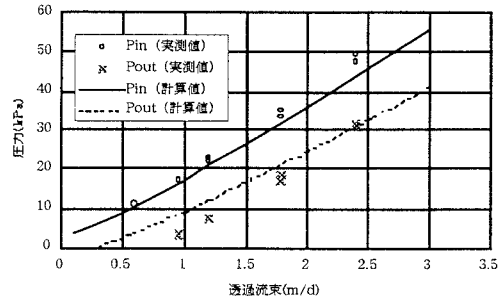
- ・人口千人程度に給水を行っている小規模水道で、日量300m³の水を膜ろ過によって処理する
- ・膜は分画分子量13,000DaのUF膜で、内径1mm、長さ1mの中空糸が1万本充填されているモジュールを10連（膜ろ過面積は約300m²）使用する
- ・透過流束は1m/dの定量ろ過を行う

日本の河川においてもクリプトスポリジウムのオーシストが検出されており、下水処理水や畜産排水を受容する河川においては3～4,500個/100lのオーダーで確認されている²⁾。このような原水を直接膜ろ過によって処理した場合、膜破断によって流出するクリプトスポリジウムオーシストの濃度を計算した。表-1にその結果を示す。

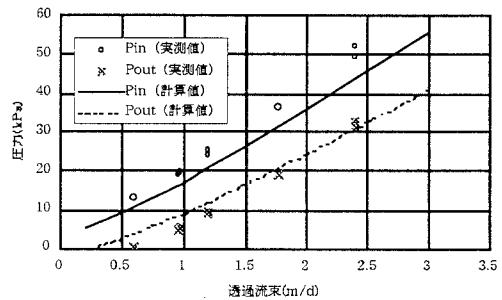
1万本に1本という破断割合の場合、原水流出率は $5.2 \times 10^{-2}\%$ である。

急速ろ過法によるクリプトスポリジウム相当径粒子の除去率は、運転管理が正常に行われた場合 $2 \sim 3 \log_{10}$ であるといわれている。一方、膜モジュールによる除去率は $5 \sim 6 \log_{10}$ であるとされているが、今回の計算によって10万本に1本という割合で膜が破断した場合には除去率が $3 \sim 4 \log_{10}$ 程度まで低下してしまうことが見込まれた。

クリプトスポリジウムの水道水中の許容濃度は、感染リスクを 10^{-4} /年、水摂取量を1日2lとしたときに 1.0×10^{-1} 個/100lであると試算される²⁾。10万本に1本という破断割合の場合、原水濃度が1000個/100lを越えると許容水質が得られない。そのため、この様な微少な原水流出を検知しうる検出技術や膜ろ過システムの設計が必要である。



(a) 入口破断



(b) 出口破断

図-3 透過流束と入口・出口圧力の関係

表-1 ろ液へのクリプトスポリジウム流出濃度(個/100l)

原水濃度	破断膜		未破断膜
	1万本に10本	1万本に1本	除去率 $6 \log_{10}$
1	5.2×10^{-3}	5.2×10^{-4}	1×10^{-5}
10	5.2×10^{-2}	5.2×10^{-3}	1×10^{-5}
100	5.2×10^{-1}	5.2×10^{-2}	1×10^{-4}
1000	5.2×10^0	5.2×10^{-1}	1×10^{-3}

6. おわりに

今回構築したモデルによって膜破断によるリスク評価につながる定量的な議論が可能となった。今後は原水濁度の流出等にも適用し、膜破断の検出方法の可能性や膜処理システムの検出装置の設計のあり方について検討していく予定である。

(参考文献)

- 1) 大野他：中空糸内圧型膜ろ過における膜破断のモデル解析，平成9年度東北支部技術研究発表会講演概要，pp728-729，(1998)
- 2) 橋本他：相模川水系におけるクリプトスポリジウム及びジアルジアの汚染レベル，水環境学会誌，vol.21，No.2，pp119-122，(1998)