

(13) 膜分離活性汚泥法における限外ろ過膜の分離特性

SEPARATION PROPERTIES OF MEMBRANE ULTRA FILTER IN ACTIVATED SLUDGE PROCESS

深川勝之*, 原田利男*, 竹内正美*, 村上定瞭*, 中西 弘**
Masayuki FUKAGAWA*, Toshio HARADA*, Masami TAKEUCHI*,
Sadaaki MURAKAMI*, Hiroshi NAKANISHI**

ABSTRACT; Ultrafiltration membrane have been studied of its application to activated sludge process, regarding the filtration rates as functions of membrane pore size, pressure difference, liquid velocity of direction along membrane surface, mixed liquor viscosity, and MLSS concentration. The membrane module investigated was of plate type.

Under high MLSS concentration, the activated sludge accumulates on the membrane surface and depressed the filtration rate, because of the increase in mixed liquor viscosity. The behavior of viscosity of the mixed liquor was found to be formulated similarly to the high polymer solution.

The Ruth equation can be applied to the filtration rate for the membrane pore size of 50000 molecular weight and under, while for pore size of 10,000 and more it needs modification in term of pore clogging. The optimum pore size for the activated sludge system was found to be of 50,000.

KEYWORDS; activated sludge, ultrafiltration, nightsoil, viscosity, cross flow

1. はじめに

近年、クロスフローろ過を応用した膜分離の技術開発は急速に進み、多くの分野に及んでいる。生物学的排水処理においても限外ろ過膜を組み込んだ生物処理システムが開発され、稼働しつつある。さらに、現在技術的に高負荷処理が可能となっている、し尿処理システムの固液分離工程に膜を組み込むことに対する議論が活発となってきている。し尿処理システムの固液分離工程に膜を組み込む場合、高負荷処理および汚泥管理が極めて容易になるという利点を持つ。また下水、工場排水などの生物処理システムに適用できるなど限外ろ過膜による固液分離の新しい展開が期待されている。しかるに、一方では次のような課題も指摘されている。(1)使用するポアサイズ以上の分子量を持つ溶解性高分子は阻止されるが、それが反応槽内でどのような影響があるのか。(2)膜表面への汚泥およびゲルの蓄積は透過フラックスにどのような影響を与えるか。(3)活性汚泥粒子およびゲルを考慮した上で使用する限外ろ過膜のポアサイズはどれ位が適当か。(4)汚泥の高濃度化にともなう活性度は変化するのがあるいはしないのか、などである。これらの問題は主として実証試験を通して明らかにされつつあるとはいえ、未解決の問題も多い。また、活性汚泥分離のために使用されている膜の多くはポアサイズ(分画分子量)1~2万の膜であるが最適ポアサイズについては未だ明確にされていない。これは一つには活性汚泥溶液の固液分離についてはファウリングの問題が十分には追求されていないためと考えられる。

固液分離のみを対象とする場合には限外ろ過膜を使用しなければならない必然性はなく、むしろ限外ろ過膜は溶解性高分子をも阻止するため、有機物蓄積という問題を含む。この意味から固液分離のみを目的とする場合には、精密ろ過膜をも考慮すべきであるとも言える。この点、湧上らは0.1 μ m程度の精密ろ過膜で

* 宇部工業高等専門学校 Ube Technical College

** 山口大学工学部 Faculty of Engineering, Yamaguchi University

も安定したフラックスが得られるとしている¹⁾。また、し尿処理などの排水処理への限外ろ過膜適用の研究は始まったばかりであり、設計の指針ははっきりしていない。生物処理システムに膜分離工程を導入するに当たって、透過フラックスに対する圧力、平行流速、活性汚泥濃度などの影響を知らなければならない。

本研究では活性汚泥溶液のファウリングおよび流動特性についての検討、あるいは種々のポアサイズの限外ろ過膜について Ruth 式の適否を考察し、最適膜についての知見を得ようとしたものである。

2. 活性汚泥溶液によるファウリング

高分子分離膜の性能が低下する原因には劣化とファウリングとがあり、それぞれ次のような理由によるものである²⁾。

(1) 劣化

- 1) 物理的要因；圧力で膜がつぶされて密になる。膜が乾燥する。
- 2) 化学的要因；膜の加水分解、酸化による劣化。
- 3) 生物的要因；微生物による膜の質化。代謝産物による化学的劣化。

これらはいずれも膜の寿命に関するものである。膜の圧密化は2～3気圧程度で操作する場合は問題ないと考えられる。膜の乾燥は注意することで十分である。膜の加水分解や質化による劣化は中性付近で操作されること、質化されにくい膜を使うことなどにより防止することが可能であり、活性汚泥法では問題ないと考えられる。酸化による劣化は溶存酸素の存在もあり可能性があると考えられる。代謝産物による化学的劣化も活性汚泥のような複雑な系では可能性があると考えるべきであろう。物理的劣化はポアサイズを小さくし、化学的、生物的劣化はポアサイズを大きくする。したがって次に述べるファウリングと重なる場合は現象的には見分けが困難となるが、劣化は急激に膜がつぶされること以外は長時間に渡る連続運転により生じるものである。

(2) ファウリング

- 1) 膜表面への付着；ケークの蓄積、ゲルの蓄積、吸着による透過フラックスの減少。
- 2) 膜の目詰まり；立体的目詰まり、吸着、析出。

限外ろ過膜をし尿処理活性汚泥法に導入する場合、もっとも問題となるのはファウリングであると思われる。したがってファウリングを生じさせる原因から見た場合、活性汚泥の固液分離における限外ろ過膜適用の特徴は

- 1) 固液分離が主たる目的で溶解性高分子阻止が目的ではない。したがって十分な透過フラックスが得られることが必要である。
- 2) 多種多様の分子量を持つ溶解性高分子物質（ゲル）が存在するため透過フラックスにマイナスの影響を与える。
- 3) 色素が存在するため膜表面への物理的、化学的吸着が起り易く、透過フラックスにマイナスの影響を与える。

などである。このように活性汚泥溶液を固液分離する場合、系が複雑であるため、ファウリングの問題を一つ一つ解明する必要があると考えられる。ファウリングは透過フラックスを減少させるが、劣化と異なり、清浄水や化学薬品による洗浄で回復可能なものが多い。また操作条件を適切に選択することにより、汚泥やゲルの蓄積などはある程度あらかじめ回避できるものである。

活性汚泥混合液の構成は限外ろ過膜の透過性能を変化させる要因別に①粒子性の物質、②ゲル性物質、③官能基を持つ物質（膜と親和性を持つ物質、例えば色素など）、④その他（膜を容易に透過する物質）の4種類に分類することができる。以下透過フラックスに最も影響を与えると思われる①および②について検討した。

3. 活性汚泥溶液の粘度と汚泥ケーキの蓄積

3.1 活性汚泥ケーキの蓄積

限外ろ過膜モジュールは平板膜、チューブラー膜、中空糸膜などがある。ファウリングはどの型でも共通に生じる限外ろ過膜の課題であるが、ケーキの蓄積は構造的に平板膜に起こりやすくチューブラー膜では比較的起こりにくい。

平板膜を用いた場合の汚泥ケーキ生成と成長について平行流速、汚泥濃度を变化させて目視によって観察した。使用した活性汚泥は下水処理場汚泥を種汚泥として合成し尿で培養したものであり、4.1に示す培養条件で得たものである。活性汚泥粒子の大部分は限外ろ過膜のポアサイズより十分に大きく、ポアサイズ3,000,000でも清澄水が得られ、限外ろ過膜では活性汚泥粒子は十分に阻止された。

限外ろ過膜でのクロスフロー過においては、循環流路閉塞が生じたり、ケーキによるろ過抵抗が無視できないほど大きくなる場合には、ケーキ蓄積が問題となる。市販されている膜モジュールは正圧をかけることにより狭い流路を速い速度で通過させる方法を用いている。本実験で用いた東ソー社の平板膜モジュール(UF-Labo)の平面図をFig. 1に示す。この方法では、ケーキの蓄積はまず流路が変更されるところで生じ、ついで流路の側壁に蓄積され徐々に成長する。その結果、循環流量が減少し透過フラックスが低下する。Fig. 9に示すような攪拌翼で平行流速を得る場合はまず円周部でケーキの蓄積が始まり、徐々に成長する。これらは流路が変わるところ、流路壁あるいは流路の周辺部では流速が遅く滞留するためである。一度ケーキが蓄積すると圧密化され、粘濁性とあいまって圧力や流速を变化させることによって回復は困難となる。条件によっては流路を閉塞することになる。ケーキ蓄積を防止するためには十分なせん断力を与えることが必要である。

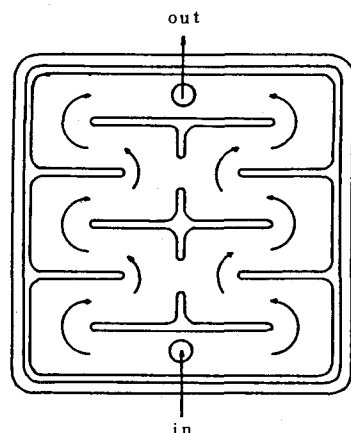


Fig. 1. An example of UF module

Fig. 2 はMLSS濃度が約10,000mg/Lの場合で新品の膜の性能変化を経時的にみた例である。実験装置はFig. 9を用いた。ポアサイズ200,000の膜ではケーキ、ゲルの蓄積、あるいは目詰まりなどにより、フラックスは低下する。しかし、水道水で洗浄するとフラックスは回復する。長期間の使用に対しては水道水のみでの洗浄ではフラックスは十分には回復しないため、同一条件で実験を行うためにはすくなくとも1日以内で行うことが望ましい。これに対しポアサイズ10,000の膜はフラックスが小さいこともあり、変化は小さいが、やはり短時間で洗浄を行うことが望ましい。

3.2 活性汚泥溶液の粘度

流動特性を表現する代表的な指標は粘度である。活性汚泥の粘度についての知見は少ないため、粘度を測定し粘度と汚泥濃度および温度の関係を調べた。粘度測定にはビスメトン粘度計(VG4-L型)を用いた。汚泥濃度と粘度の関係をFigs. 3, 4に示す。使用した活性汚泥は4.1に示す培養条件で得たものである。活性汚泥の流動特性は濃度の小さいところではニュートン流体とみなせるが、濃度の増大とともに高分子流体特有の擬塑性流体としての性格が認められる。MLSS濃度が3,000mg/L以上では直線で近似でき、金山の結果とはほぼ一致している³⁾。この関係は

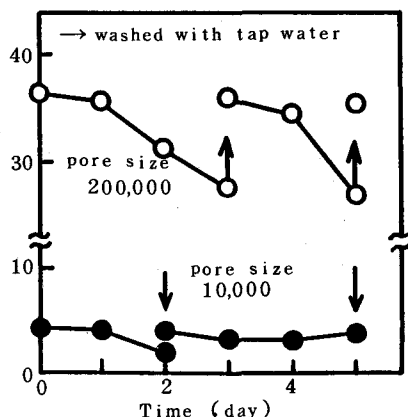


Fig. 2. Changes of filtrated flux with UF
MLSS : 10,000mg/L

次式で表せる。

$$\mu_x = K_x \cdot X^n \quad (1)$$

ここで μ_x は活性汚泥溶液の粘度 ($\text{g/m}\cdot\text{s}$)、 X は MLSS 濃度 (mg/L)、 K_x 、 n は活性汚泥の性状、温度によって決まる定数である。(1)式は高分子液体に適用される式であり、 X は分子量であることが知られている。合成し尿馴致汚泥では K_x は約 5×10^{-10} 、 n は約 2.8 であった。しかし、 $3,000 \text{ mg/L}$ より小さい濃度では(1)式は適用できず、活性汚泥溶液を高分子液体とみなすことはできない。全濃度範囲では Fig. 4 のように、 $\log \mu_x$ と X とがよい直線関係を示し

$$\mu_x = A_e^{BX} \quad (2)$$

で表わされる。この式は高分子溶液における粘度推算式である Doolittle 型の粘度式に類似しており、活性汚泥溶液が高分子溶液と同様の振る舞いを行うものと思われる。ここで A 、 B は汚泥の性状、温度などによって決まる定数である。合成し尿馴致汚泥では A は約 1.0、 B は約 3.0×10^{-4} であった。 A は X が 0 のときの μ_x であるから、水の粘度とほぼ一致し、(2)式が有効であることを示す。

高分子性流体の粘度は温度の影響が大きいことが知られている。Fig. 5 は活性汚泥が普通に利用されている $15 \sim 35^\circ\text{C}$ の温度範囲で汚泥濃度を变化させた場合の粘度と温度の関係を調べたものである。使用した活性汚泥は Figs. 3, 4 と同じものである。低濃度の場合水と同じように大きな変化は認められずほぼ一定とみなし得るが、汚泥濃度が増大する

と狭い温度範囲でも大きな影響があることが分かる。これは高濃度になるにしたがい高分子流体としての性質が増大しているためと考えられる。高分子液体の粘度と温度の関係は $\mu = A' e^{-B'/T}$ (T は温度) で表わされるが、 $15 \sim 30^\circ\text{C}$ の温度範囲では粘度と温度は直線で近似できる。活性汚泥の透過フラックスは温度の影響を受けるとされているが、これは主として粘度が影響し、同一の圧力でも平行流速が変化しているためと考えられる。(2)式によると、MLSS 濃度が $5,000 \text{ mg/L}$ の粘度に対して、 $20,000 \text{ mg/L}$ の粘度は約 7 倍である。同じ流量を得るためにはポンプ動力も 7 倍必要である。

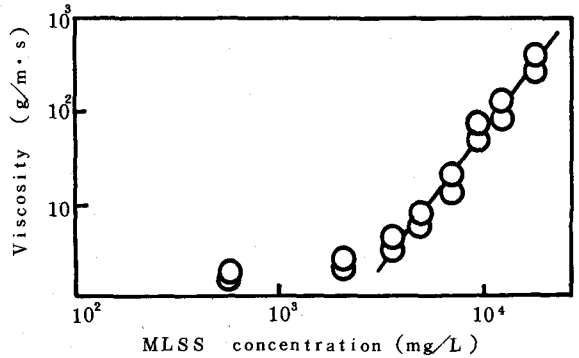


Fig. 3. Viscosity of activated sludge at 25°C
($\log \mu_x$ v. s. $\log X$)

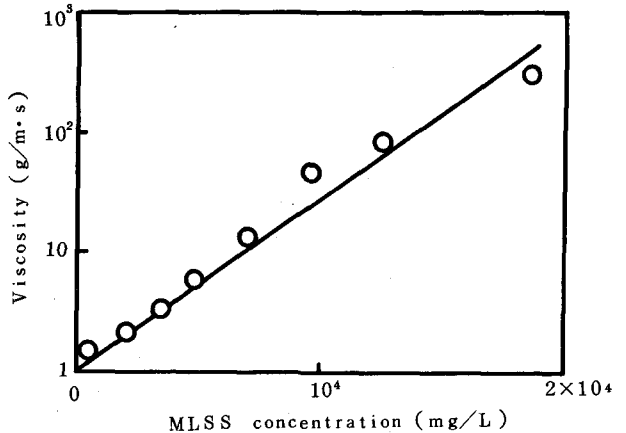


Fig. 4. Viscosity of activated sludge at 25°C
($\log \mu_x$ v. s. X)

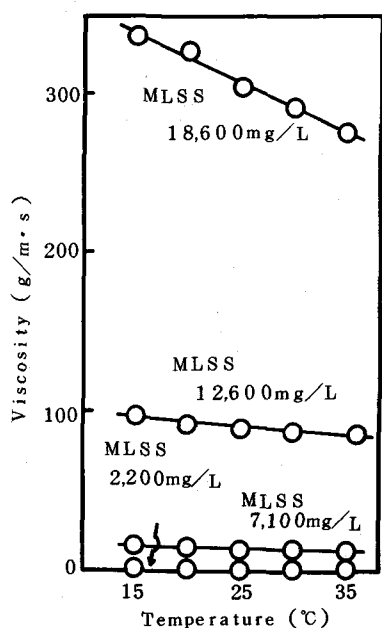


Fig. 5. Viscosity of activated sludge with temperature changes

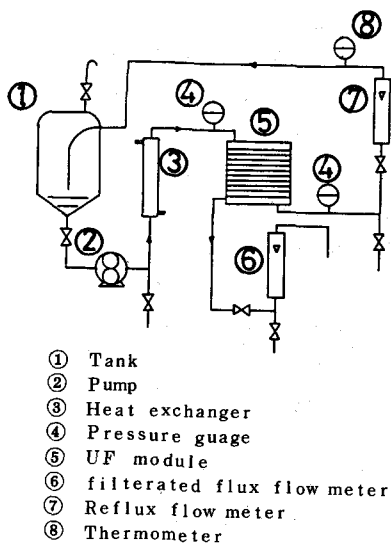


Fig. 6. Scheme of UF-20MS system

4. 活性汚泥濃度と透過フラックス

4.1 実験条件および方法

使用した膜分離システムは東ソー社のTOSOH-UF-SYSTEM(UF-20MS型)でシステムの概略をFig. 6に示す。分画分子量(以降、ポアサイズとする)3,000,000の膜を使用した。膜モジュールは平板膜型で、ろ過面積は0.2 m²である。膜面流路はFig. 1と同様である。流路断面は1流路で約0.105 × 10⁻⁵ m², 18流路で行ったので、約1.89 × 10⁻⁵ m²である。流路断面はゴム製のパッキンにより締め付けるので正確ではない。したがって、平行流速は循環流量で示した。

この型の送液システムはポンプにより圧力をかけて行うものである。したがって、循環流量と圧力を独立に設定することができない。このため、実験上若干の制約を受ける。

本実験装置におけるろ過推進力4Pは透過側が大気開放であるため、操作圧(ゲージ圧)である。活性汚泥はあらかじめ合成尿により回分法で馴致した。馴致に用いた原水はペプトン、肉エキスを主成分とし、種々の無機塩類を含む。所定の汚泥濃度を得るため、同システムで濃縮を行った。活性汚泥混合溶液は貯留槽からポンプで膜モジュールに送られ、貯留槽に還流させる。透過フラックスも貯留槽に返送し、汚泥濃度を一定に保った。実験は3.1の結果に留意し、目測による汚泥の蓄積しない程度とし、必要に応じて水道水で膜表面を洗う程度で行った。このようにすることにより、ケーキ蓄積の影響は考えなくてよい。

4.2 活性汚泥濃度と透過フラックス

圧力、循環流量を変化させ、汚泥濃度に対する透過フラックスの影響を調べた。Fig. 7に循環流量一定の場合の各操作における汚泥濃度と透過フラックスの関係を示した。この操作圧力範囲では圧力が大きいほど透過フラックスは大である。循環流量が120 L/hではMLSS濃度が5,000 ~ 8,000 mg/Lで透過フラックスは急速に低下するが、10,000 mg/Lを越えるとゆっくり低下する。循環流量の増大にともない、圧

力の影響は顕著になり、循環流量
 480L/h では平行曲線群となる。これ
 は汚泥濃度が高くなることによって、
 ゲルの濃度も高くなり、膜表面に蓄積
 するゲルも多く、その抵抗によるもの
 と考えられる。また、この条件では粘
 度が圧力によって変化しないものとす
 れば、循環流量480L/hで、水の場合
 でRe数は約120,000, MLSS濃度が
 5,000で約26,000, 10,000 mg/Lで
 約5,500である。このように汚泥濃度
 が高くなると蓄積するゲルを剥ぎ取る
 ことが困難となる。このため、高濃度
 では透過フラックスが大きく変化しな
 いものと考えられる。循環流量が
 660L/hではMLSS濃度が15,000
 mg/L程度から透過フラックスは逆に
 増大した(D)図)。このことについて
 は、0.4, 0.8 atmでの実験ができず
 (圧力により、流量が制限されるため)、
 低圧での様子が分からないこともあり、
 理由は不明である。Fig. 8には操作圧
 力一定の場合の各循環流量における汚
 泥濃度と透過フラックスの関係を示し
 た。操作圧力が小さいとき平行流速は
 透過フラックスに大きな影響を与える
 が、圧力の増大とともに平行流速の影
 響は小さくなる。1.6 atmでは平行流
 速の影響は殆どなくなる。また、圧力
 が増大し、汚泥濃度が高くなるにした
 がって透過フラックスの差は小さくな
 る。これは汚泥濃度が高くなるにした
 がって、圧力の増大により、ゲルの圧
 密化が生じているためと考えられる。
 圧密化が起こらない低圧では平行流速
 の影響は大きく、圧力の大きいところ
 では圧密化が促進されるため、平行流
 速の影響が小さくなるものと考えられ
 る。

循環流量の大きい方が小さい方より
 も、液の膜面速度が大きく、そのため
 透過フラックスは大きくなるものと一

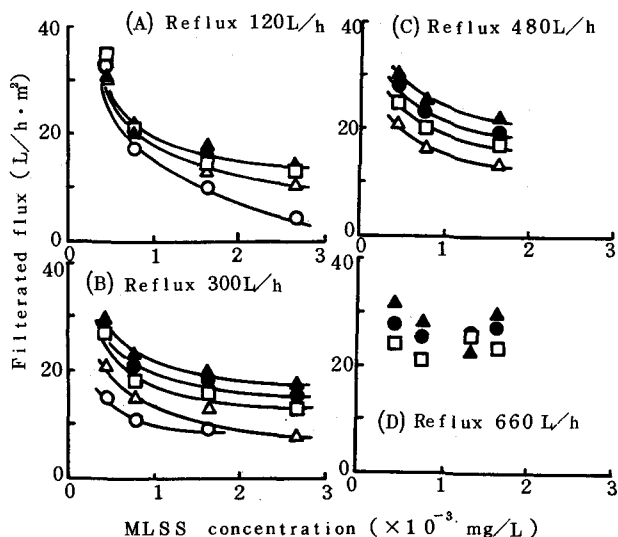


Fig. 7. Relationship between MLSS and filtered flux at pressure gauge changes

○ : 0.4 atm △ : 0.8 atm □ : 1.2 atm
 ● : 1.6 atm ▲ : 2.0 atm

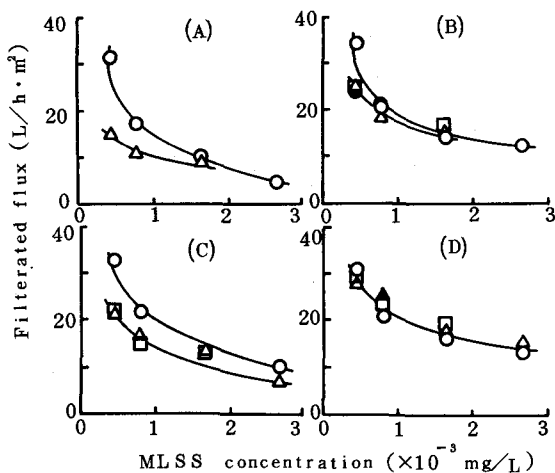


Fig. 8. Relationship between MLSS and filtered flux at reflux changes

Pressure gauge : (A); 0.4 atm (B); 0.8 atm
 (C); 1.2 atm (D); 1.6 atm
 Reflux : ○; 120L/h △; 300L/h
 □; 480L/h ●; 660L/h
 ▲; 840L/h

般的には考えられるが、本実験では異なる結果（特に、Fig. 8(A), (C)）となった。平板膜を用いた別の実験でも同様な現象が観察されたが、この現象については複雑な要素が考えられ、現在検討中である。

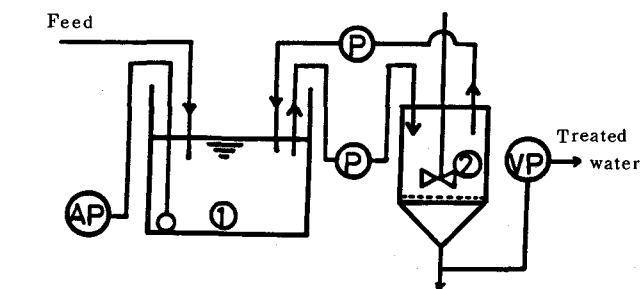
5. 平行流速、差圧と透過フラックス

平行流速と差圧を独立に変化させて特性を調べるためには、加圧系と流動系を独立させる必要がある。加圧により流速を変化させるモジュールタイプはこの実験には不向きである。そこで攪拌により平行流速、真空ポンプにより差圧を得、これにより平行流速、差圧を独立に設定し、活性汚泥の分離特性を調べた。

5.1 実験条件および方法

実験装置の略図を Fig. 9 に示す。

反応槽有効容積 10 L、膜分離槽は直径約 15 cm、有効容積 600 mL の円筒形で下部はフランジで膜を固定してある。静圧は一定になるように、膜分離槽内のヘッドで調整してある。有効ろ過面積は $1.26 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ である。ラボスターラで攪拌し、膜に対する平行流速を得た。反応槽と膜分離槽は 2 流路式のチューブポンプで連結し、送入、返送量を同じになるようにしてある。このようにすることにより、膜分離槽内の液量を一定にすることができる。平行流速は可変速型ラボスターラ（かい型、翼径 6 cm）を用い、0～780 rpm で変化させた。差圧は真空ポンプを用いて減圧することにより、真空度を 0～53 kPa の間で変化させた。限外ろ過膜はポアサイズが 1,000, 10,000, 20,000, 50,000, 100,000, 200,000, 3,000,000 の膜を用いた。材質はポアサイズ 1,000 の膜は高分子電解質であり、それ以外はいずれもポリスルホン系である。温度は 30℃、MLSS 濃度は 7,000 mg/L で、反応槽より直接送液した。供試原水は前述と同じものを用いた。ファウリングなどにより、時間経過とともにフラックスが低下するが、ポアサイズにより現れ方が異なり、評価できないので、本実験では目視による汚泥ケーキの蓄積しない条件、あるいは水道水の洗浄程度でフラックスに再現性が得られる状態でを行った。このようにすれば一つのデータを取るために要する時間（10～60 分）内では問題ない。



AP: Aeration pump P: Tube pump VP: Vacuum pump
①: Reactor ②: Separator with UF

Fig. 9. Scheme of experimental equipment with UF

5.2 平行流速と透過フラックス

平行流速と透過フラックスの関係を Fig. 10 に示す。平行流速はラボスターラの攪拌翼による回転で与えたので、回転数で表わすことにする。ポアサイズが 1,000 の膜はフラックスが極めて小さかったので省略した。ポアサイズ 10,000 の膜については平行流速の影響は極めて小さいが、ポアサイズの増加にともない、流速の小さいところで平行流速の影響が大きくなる。平行流速の影響は 50,000 の膜に著しく（Fig. 10 (C)），平行流速 0 rpm から急激に透過フラックスは低下し、差圧の大きいほど透過フラックスの変化は大きい。200 rpm 付近から回復する。平行流速が 200 rpm を越えると透過フラックスの変化は少なくなる。これは膜表面に蓄積するゲルが膜に平行な力を受けず、並び方が無秩序であるため平行流速の小さいところではかなりの透過フラックスが認められるが、平行流速の増大とともに、適当な力（平行流速）を受けることにより、膜表面のゲルの並び方が渦密になるため、透過フラックスが低下するものと考えられる。さらに平行流速が大きくなると、ゲルが膜表面から剥ぎ取られるものと思われる。しかし、本実験範囲の平行流速程度ではゲルの厚さは大きく変化しないものと思われる。

透過フラックスに対する差圧の影響はポアサイズ 10,000 から 50,000 にかけては次第に大きくなるが、

100,000 を越えると影響は小さくなる。
10,000 から 50,000 の膜では差圧の大きいほど透過フラックスが大きくなっているが、100,000 以上では必ずしもそうならず、規則性が認められない。また、透過フラックスの最も大きいのはポアサイズ 50,000 の膜であった。このことは活性汚泥が生産する高分子性有機物の分子量と関係があるのかも知れないが、現在のところ不明である。

5.3 差圧と透過フラックス

Fig. 11 に透過フラックス J_v ($L/h \cdot m^2$) と ΔP (kPa) の関係を示した。200 rpm 以上では J_v が平行流速に関係なく、圧力のみの関数であるとして平行流速 200~780 rpm の範囲のデータをプロットしたものである。透過フラックスの圧力依存性は直線関係にある場合、(3)式の k によって示される。

$$J_v = k \cdot \Delta P + \alpha \quad (3)$$

k は透過比抵抗である。 α は ΔP が 0 のときの透過フラックスであり、操作圧以外の力によるものである。本実験では ΔP に真空度を用いたため、(3)式のように表現したが一般的な α を ΔP に含めて考える。

ポアサイズ 10,000 から 50,000 の膜 (Fig. 11 (A)~(C)) は直線関係が認められた。図中、実線は平均、破線は範囲を示す。

k はポアサイズの増加とともに大きくなる。 k の代表値は 10,000 の膜では 3.5×10^{-4} , 20,000 では 1.04×10^{-3} , 50,000 では 1.52×10^{-3} であった。しかし、 ΔP の増加にともない次第に透過フラックスに差が生じた。ポアサイズが大きくなるほど差は大きくなった。これは平行流速の影響であり、ポアサイズが大きくなるほど影響も大きくなるためである (Fig. 10)。このことは平行流速により k が変化することを示す。Fig. 8 に示したように、汚泥濃度の小さいところでは平行流速の影響が大きいので、MLSS 濃度が 2,000 mg/L で、圧力の影響が最も大きい 50,000 の膜を使用し、(3)式について調べた。結果を Fig. 12 に示す。図に見られる通り、平行流速により k は変化する。140 rpm で 3.9×10^{-4} , 410 rpm で 1.03×10^{-3} , 780 rpm で 1.7×10^{-3} であった。これは膜表面に蓄積するゲルの抵抗が影響しているものと思われる。ポアサイズ 100,000 以上の膜 (Fig. 11 (D), (E), (F)) では直線関係が認められず、(3)式は成立しない。これは明らかに目詰まりによるものである。

ろ過に関する Ruth 式は次式である。

$$J_v = \Delta P / [\mu (R_c + R_m)] \quad (4)$$

$$k = 1 / [\mu (R_c + R_m)] \quad (5)$$

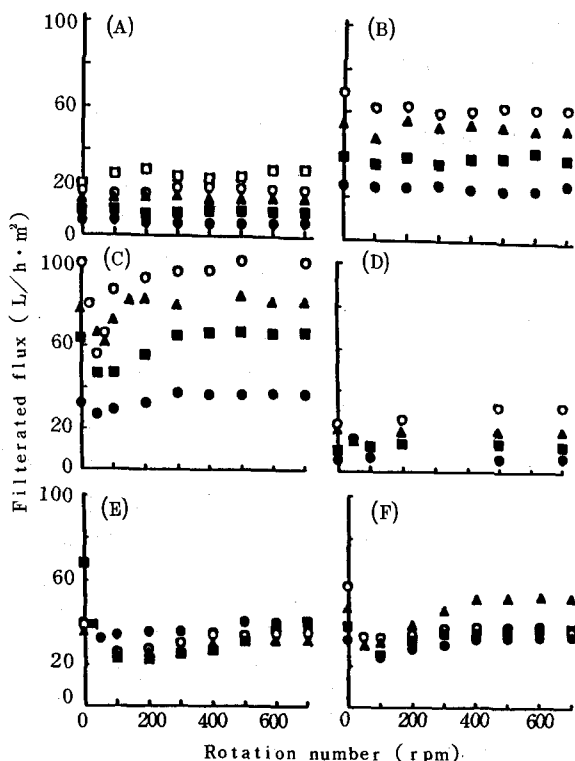


Fig. 10. Relationship between rotation number of agitation and filtered flux

Pore size : (A); 10,000 (B); 20,000
(C); 50,000 (D); 100,000
(E); 200,000 (F); 3,000,000
 $\Delta P (\times 10^{-5} \text{ Pa})$: ●; 0.13 ■; 0.27 ▲; 0.40
○; 0.53 □; 0.67

(4)式の ΔP は(3)式の α を含んだものである。したがって、(3)式の k は(5)式である。ここで、 R_c はケーキ層抵抗、 R_m は膜抵抗である。 μ は透過液粘度で活性汚泥透過液については水と同じとみなせ、約1 (g/m·s)である。限外ろ過膜ではゲルと汚泥ケーキの取り扱いが異なるものとするれば、(5)式の k は次のようになる。

$$k = 1 / (R_c + R_g + R_m) \quad (6)$$

ここで、 R_g はゲル層抵抗である。ケーキの蓄積が少なく、抵抗が小さい場合は

$$k = 1 / (R_g + R_m) \quad (7)$$

となる。汚泥粒子による抵抗よりもゲルによる抵抗の方が大きいと考えられるため、(7)式が適用可能と思われる。しかし、膜表面の蓄積状態がゲルと汚泥粒子の2層になり、汚泥が圧密化された状態では(6)式が重要になるものと思われる。ゲルと汚泥粒子を一体とみなせる場合には $R_c = R_c + R_g$ として、(5)式でよい。本実験では汚泥の蓄積および圧密化が起きていないところで行ったので(7)式が適用できる。

圧力、平行流速を一定にした場合のポアサイズと透過フラックスの関係はFig. 13のようになる。 ΔP が 0.53×10^5 Pa、平行流速が500 rpmの例である。50,000から100,000の間で不連続となった。50,000と100,000の間の膜がないので正確には分からないが、このことは次のように説明される。すなわち、ポアサイズの小さい膜では平行流速の影響が小さいところからゲル抵抗は膜抵抗に比べて小さく、膜抵抗律速になっているものと考えられる。これは(5)式の k が(8)式と考えてよいことを示すものである。

$$R_m \gg R_g \quad \therefore k = 1 / (R_g + R_m) \approx 1 / R_m \quad (8)$$

これに対しポアサイズ100,000以上の膜では目詰まりによる抵抗を無視すると、膜の表面に蓄積するゲル層の影響が大きく、ゲル層抵抗に対し相対的に膜の抵抗が小さくなっており、(9)式のようにになっているものと考えられる。

$$R_m \ll R_g \quad \therefore k = 1 / (R_g + R_m) \approx 1 / R_g \quad (9)$$

しかし、透過フラックスの減少に見られる通り、孔が大きいと活性汚泥中のゲルが落ち込み、孔の壁に付着することによる目詰まりが大きく影響しているものと考えられる。その結果Ruth式が成立しないのであろう。また、100,000~3,000,000の間で透過フラックスに大きな差が見られないことから、このような大きなポアサイズでは目詰まりの抵抗が大きく影響し、(10)式のようにになっているものと考えられる。

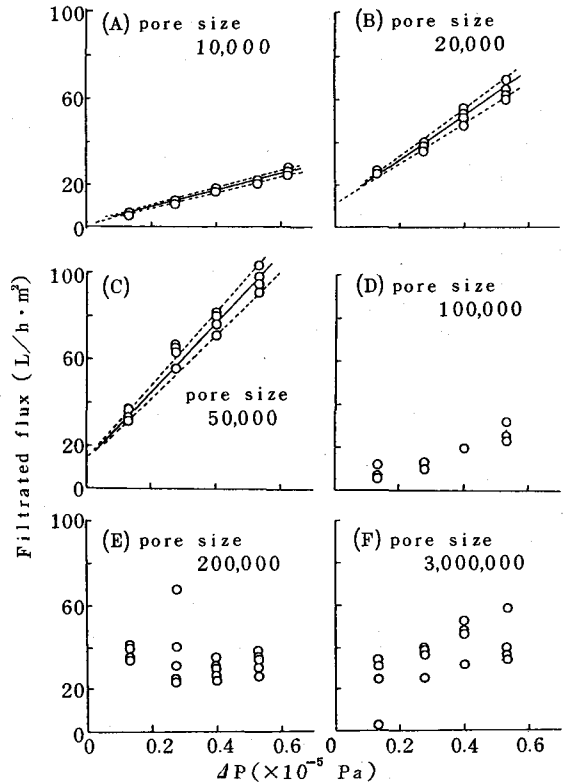


Fig. 11. Relationship between ΔP and filtrated flux with UF
MLSS: 7,000mg/L
Rotation number: 200~780rpm

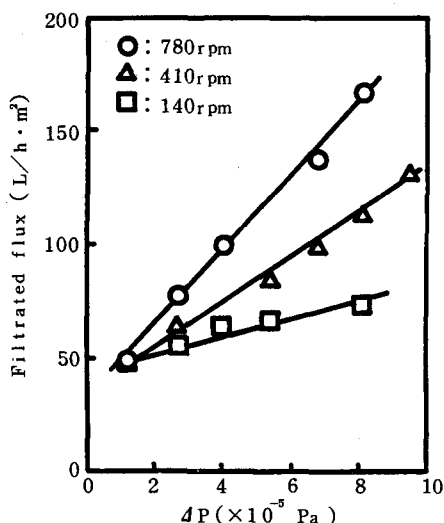


Fig. 12. Relationship between ΔP and filtrated flux with pore size 50,000
MLSS: 2,000mg/L

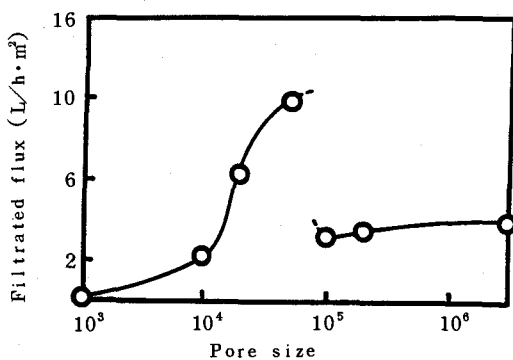


Fig. 13. Relationship between pore size and filtrated flux
MLSS: 7,000mg/L $\Delta P: 0.53 \times 10^5 \text{ Pa}$
Rotation number: 500rpm

$$k = 1 / (R_g + R_c + R_x)$$

(10)

ここで、 R_x は膜抵抗 R_m に変わるものであり、膜の目詰まりによる抵抗である。 ΔP が大きい場合には圧密のため $(R_g + R_c) \gg R_x$ であるとした報告もあるが⁴⁾、本実験結果からはその大小は決めがたい。むしろ ΔP が比較的小さい本実験の場合、 R_x 律速と考えられる。

50,000 の膜は膜抵抗律速からゲル抵抗律速に移行するところにあり、膜抵抗とゲル層抵抗が相対的に影響しあっているものと考えられる。このポアサイズでは目詰まりがないとすれば、(7)式において R_m は一定であるから膜面に形成されるゲル層の厚さによる抵抗 R_g の変化により k がゲル層の厚さに比例して変化するものと考えられる。

ポアサイズが 3,000,000 程度になると透過フラックスは回復する様子が伺われ (Fig. 11(F))、この点ポアサイズのもっと大きな精密ろ過膜について検討が必要かもしれない。また、操作圧力が大きくなると、活性汚泥の蓄積、圧密化による抵抗 R_c はポアサイズの大きな膜について顕著になるものと考えられる。

6. ま と め

活性汚泥を分離するためにし尿処理システムに限外ろ過膜を導入するに当たって、膜の分離特性を検討した。その結果次のようなことが明らかとなった。

- (1) 汚泥濃度が高くなると活性汚泥が最初、流路の周辺部に蓄積し徐々に成長しフラックスに重大な影響を与える。
- (2) 汚泥の蓄積を防ぐため線速度を大きくしても活性汚泥が高濃度の場合は粘度が大きく、本実験で用いた膜モジュールでは 1 ~ 2 atm 程度の液送圧では十分な乱流を得ることは難しい。
- (3) 活性汚泥溶液は濃度が 3,000mg/L 以上では高分子液体と同様な取り扱いが可能であり、全濃度範囲では高分子溶液の取り扱いが可能である。このことから循環液の流動の状態を知ることが可能である。
- (4) 透過フラックスは活性汚泥が高濃度になると平行流速の影響は小さくなり、操作圧が大きくなると活性

汚泥濃度に関係なく平行流速の影響は小さくなる。

- (5) ポアサイズが 50,000 程度までは Ruth 式が成立し、ポアサイズが小さい場合はろ過比抵抗 k は一つの値として取り扱えるが大きくなると平行流速により異なる。100,000 以上の膜では Ruth 式は成立しない。
- (6) 合成し尿の活性汚泥処理の固液分離に対しては分画分子量 50,000 の膜が最適であった。

以上のような点が明らかとなったが、限外ろ過膜を適用する以上、ポアサイズ以上の溶解性高分子は阻止され、反応槽内に蓄積される。この問題についても検討中である。さらにポアサイズの大きな精密ろ過膜の有効性もまだ検討されておらず、課題として残っている。

参考文献

- 1) 淵上善弘，山本和夫，浅見恵一，松尾友矩：「膜分離活性汚泥法の処理特性」衛生工学研究論文集，Vol. 23 (1987)
- 2) 中尾真一：「高分子分離膜モジュールの性能変化の原因とその防止法」MOL，昭和 60 年 12 号
- 3) 金山彦喜：「膜型バイオリアクタの水処理への応用」化学装置，No. 8，p47 (1987)
- 4) 中村 忠：「嫌気性バイオリアクターと膜分離法の組み合わせによる排水処理」用水と廃水，Vol. 29，No. 10 (1987)