

活性汚泥懸濁液の膜分離におけるろ過条件と透過フラックスに関する研究

西村和之¹・河村清史²・真柄泰基³・野池達也⁴

¹正会員 工博 国立公衆衛生院研究生 廃棄物工学部 (〒108 東京都港区白金台4丁目6-1)

²正会員 工博 国立公衆衛生院室長 廃棄物工学部 (〒108 東京都港区白金台4丁目6-1)

³正会員 工博 国立公衆衛生院部長 水道工学部 (〒108 東京都港区白金台4丁目6-1)

⁴正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科 (〒980 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉)

活性汚泥懸濁液の固液分離を目的とするクロスフロー型の限外ろ過において、ろ過条件と透過フラックスとの関係を実験的に検討した。連続ろ過によって限外ろ過膜が汚れ目詰まりが生じるが、水を循環させるだけでは除去できないろ過抵抗 R_p と水の循環により除去できるろ過抵抗 R_{cg} の2種類のろ過抵抗が形成される。目詰まりを起こした膜におけるろ過条件と透過フラックスとの関係は、ろ過抵抗層の圧縮性を考慮したろ過抵抗モデルで説明でき、パイロットプラントや実処理施設においてもこのろ過抵抗モデルで説明できた。現行の実処理施設における運転方法について、 R_p の増加をできるだけ抑えるような運転操作、すなわち、より速い膜面流速、より低い操作圧力によるろ過が膜分離の効率化へつながる。

Keywords: ultra membrane filtration, activated sludge suspension, cake-layer resistance, gel-layer resistance, shear stress, pilot plant data, collective night-soil treatment plant data

1. はじめに

し尿処理における膜分離技術は、膜分離高負荷生物脱窒素処理施設が(社)全国都市清掃会議により指針外技術として認定されたことにより普及が促進され、平成4年10月現在での処理施設総数は着工ベースで51件、総処理規模は2,768.3 kl/dayであった¹⁾。これは、国内のし尿処理施設による総計画処理能力に対する割合としては2.5%程度にすぎないが、平成4年度上半期の新規建設実績に占める膜分離高負荷生物脱窒素処理施設の計画処理能力の割合は39%であり、その占有割合は年毎に大きくなっており、今後も膜分離技術を用いたし尿処理プロセスの普及が進むものと考えられる²⁾。

このような状況の中で、膜分離技術を用いた生物処理プロセスの効率化を図る上で、膜分離プロセスにおける透過フラックスの長期間安定維持は、課題の一つである^{3), 4)}。

筆者らは、この課題に取り組むために、し尿等の生物処理の固液分離で一般的に用いられている内圧

式のクロスフロー型の限外ろ過において、活性汚泥懸濁液のろ過におけるろ過条件と透過フラックスの関係について検討を行ってきた。

その結果、透過フラックスに及ぼす圧力の影響は、モジュール形状やMLSS濃度に係わらず、膜面上のケーキ層やゲル層等の圧縮性を考慮したケーキろ過式を適用することで説明できた^{5), 6)}。また、流速の影響は、剪断応力 τ_0 やMLSS濃度を指標にすることでろ過形態が三つに分けられることを示した⁶⁾。

しかしながら、これらの成果は、新しい膜を用い、短期間に操作圧力と膜面流速を複数条件変化させた実験から得たものであり、長期間の運転によって目詰まり等が進行した場合のものではなかった。

本研究では、目詰まり等の進行した膜におけるろ過条件と透過フラックスとの関係を検討するために、活性汚泥懸濁液を試料とした3日間の連続ろ過実験と、これに使用した膜を用い、複数のろ過条件で行う短期間ろ過実験を実施した。また、水処理メーカー数社が実施したし尿の高負荷脱窒素処理に関わるパイロットプラントや実処理施設におけるろ過条

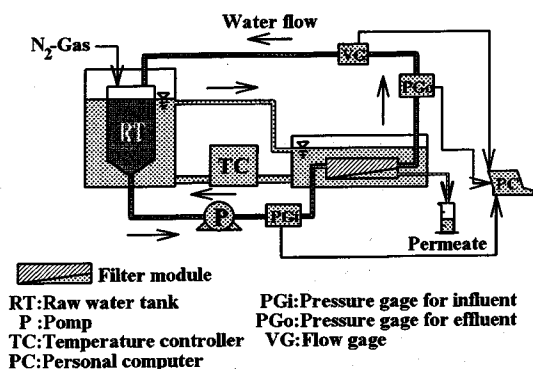


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental cross-flow filtration system

件と透過フラックスの関係について検討を加えた。最後に、これらを基にして実処理施設での効率的な運転方法について考察した。

2. 実験方法

(1) 実験装置

実験装置をFig. 1に示す。ろ過方式はクロスフロー型であり、試料水温度、膜面流速および入口側圧力が各々15～32℃、0.8～8.0 m/sec、98～490 kPaの範囲で制御できる。圧力は、ポンプの吐出圧と窒素ガスによる加圧力との合算値である入口側圧力で制御し、膜面流速は循環ポンプの流量を変えることにより制御した。なお、実験結果の評価にはモジュール圧力Pを用いたが、これは入口側圧力と管路等での圧力損失から求めたモジュールに加わる平均圧力である。また、膜面流速Vはモジュール流路断面積から計算される断面平均流速とした。

膜モジュールは、平膜型モジュールとチューブラー型モジュールを用いた。各モジュールの仕様をTable 1にまとめる。限外ろ過膜は、平膜は日東電工(株)製NTU-3100 XK-1を用い、チューブラー膜は日東電工(株)製NTU-3520を用いた。

(2) 試料

実験には、精製水と活性汚泥懸濁液(スキムミルクを基質として培養した活性汚泥を精製水で洗浄し、精製水に再懸濁させpHを7.2に調整したもの)を用いた。連続ろ過実験における活性汚泥懸濁液のMLSS濃度は、試料調整時に3,800～6,800 mg/lであったが、実験期間中に基質等の供給を行わなかったこと

Table 1 Ultra membrane filters and filter modules used in experiments

| | Flat plate type | Tubular type |
|--------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Filter material | Polysulfone | Polysulfone |
| Cut off M.W. (-) | 2,000,000 ^{a)} | 20,000 ^{b)} |
| Filter area (m ²) | 0.0336 | 0.034 |
| Section area (m ²) | W 40mm x L 840mm | L 470mm ^{c)} |
| | 0.00008 | 0.0001038 |
| | W 40mm x H 2mm | φ 11.5 mm |

a: Eighty percent of dosed Dextran (M.W. 2,000,000) is cut by the filter.

b: Definition of cut off is not offered.

c: Two modules were connected in series.

や装置内でのたまり込みがあったこと等のため、実験終了時の測定では初期値の40～80%に減少していた。また、短期間ろ過実験における活性汚泥懸濁液のMLSS濃度は、4,610～6,170 mg/lであった。

(3) 実験条件

a) 連続ろ過実験

連続ろ過実験は、循環流量18 l/min (Vとして、平膜型モジュールの場合3.6 m/sec, チューブラー型モジュールの場合2.9 m/sec)で3日間行った。なお、膜透過水はポンプにより原水タンクへ返送した。操作圧力は150～350 kPaの範囲であり、平膜型モジュールでは6条件、チューブラー型モジュールでは4条件行なった。いずれの実験でも、試料水温は24℃とした。

限外ろ過膜は、実験毎に交換し、その都度操作圧力390 kPa、循環流量18 l/minの操作条件で90分間精製水を透過させ、ろ過膜のスポンジ層を圧密させる前処理を行った。膜の初期精製水透過フラックス J_{w0} は、膜の前処理後に実験時のろ過条件で精製水をろ過して求めた。また、実験後の精製水透過フラックス J_{wf} は、実験終了後に試料を排出し、精製水を2度に分けて循環流量18 l/minで循環させ、その後さらに精製水を4～6度に分けて36 l/minで循環させ、循環水が透明になったことを確認した後に、実験と同じろ過条件で精製水を透過して求めた。

試料の粘度は回転式粘度計で測定し、密度は比重計により求めた比重から計算した。

b) 短期間ろ過実験

短期間ろ過実験は、 J_{wf} の測定終了後に、同一膜を用い、操作圧力と膜面流速を各々独立で変化させた20組の実験条件で行った各5分間のろ過である^{5), 6)}。

実験条件は、操作圧力が150～450kPaの範囲の4条件、膜面流速が平膜型モジュールで1.0～5.0 m/sec、チューブラー型モジュールで0.8～4.0 m/secの範囲の5条件であった。試料水温は24°Cとした。透過フラックス J_S は、各実験条件で装置の運転が安定した後の2分目から2分間に流出したる液量と膜面積から計算した。

3: 結果および考察

(1) 連続ろ過実験

a) 透過フラックスの経時変化

活性汚泥懸濁液の連続ろ過を行うと、透過フラックス J は、Fig. 2に示すようにモジュール形状に係わらず過初期に大きく低下し、やがて平衡に近い値を示した。

クロスフロー型の限外ろ過において、透過フラックス J は式(1)で表される⁷⁾が、未使用膜を用いた短期間ろ過実験においては、ケーキろ過式に基づく式(1')が成立することを示した⁵⁾。

$$J = \frac{P}{\eta \cdot (R_m + R_{cg})} \quad (1)$$

$$J = \frac{P}{\eta \cdot \left[R_m + \left(\frac{W}{A} \right) \cdot c \cdot P^n \right]} \quad (1')$$

ここで、 J : 透過フラックス(m/d)、 η : 透過水の粘度(mPa·sec)、 P : モジュール圧力(kPa)、 R_m : 膜抵抗(1/m)、 R_{cg} : ケーキ層やゲル層等のろ過抵抗層による抵抗(1/m)、 W : ろ過抵抗層の固体質量(kg)、 A : ろ過膜面積(m²)、 c : 実験定数(-)、 n : 圧縮係数(-)である。

式(1')は式(2)に変形される。膜の R_m は、 $R_{cg}=0$ として J_{W0} から式(1)により計算できるが、通常 R_m は R_{cg} より1オーダー以上小さく、かつその変化は相対的に無視し得るため、一定の P の下では、ろ過時間 $t=0$ の時に $W=0$ 、 $t=t$ の時に $W=W_t$ とすると、式(2)から式(3)を得る。

$$\frac{1}{J} = \frac{\eta}{P} \cdot R_m + \eta \cdot \frac{W}{A} \cdot c \cdot P^{n-1} \quad (2)$$

$$\frac{1}{J_t} - \frac{1}{J_0} = \eta \cdot \frac{W_t}{A} \cdot c \cdot P^{n-1} \quad (3)$$

これより、ろ過抵抗層の構成物質の質が t に影響されないと考えた場合、 P が一定の条件下では、 J の逆数の差は W により決定されることから、Fig. 2に

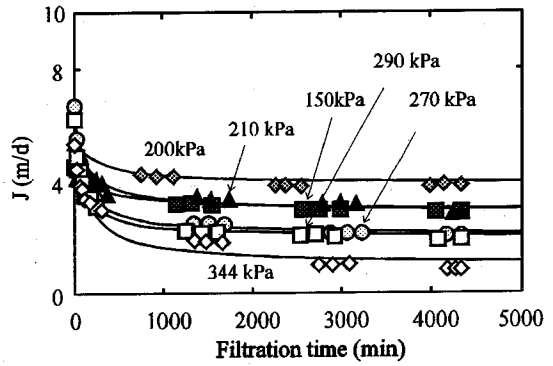


Fig. 2a Profiles of permeation flux of activated sludge suspension in 3 days (Flat plate type)

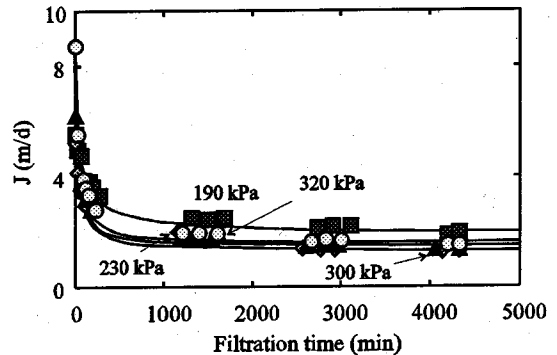


Fig. 2b Profiles of permeation flux of activated sludge suspension in 3 days (Tubular type)

示される結果は、 W が t と共に増加し一定値に漸近することを示している。従って、 t と W の関係は式(4)で示すことができるものと考えられる。

$$W_t = W_{max} \cdot \frac{t}{r+t} \quad (4)$$

ここで、 W_{max} : W の限界値(kg)、 t : ろ過時間(min)、 r : W が W_{max} の半になる時間(min)である。

実験結果から各 t における $\frac{1}{J_t} - \frac{1}{J_0}$ を求め、 $\frac{1}{t}$ に対して $1/\left(\frac{1}{J_t} - \frac{1}{J_0}\right)$ をプロットしたところ直線近似が可能となり、最小自乗法によって $\eta \cdot \frac{W_{max}}{A} \cdot c \cdot P^{n-1}$ と r の値を計算した。Fig. 2中に示した実線は、求めた $\eta \cdot \frac{W_{max}}{A} \cdot c \cdot P^{n-1}$ と r の値を用いて計算した J であるが、実験結果をうまく整理できる。これにより、 W_t に式(4)を仮定できることがわかった。

Fig. 3は P と r の関係を示している。 r は、モジュール形状に関わらず、 P が高い程小さくなる傾向を示していた。これは、活性汚泥懸濁液の連続ろ過において V が同じであれば、 P が高い程、膜面上

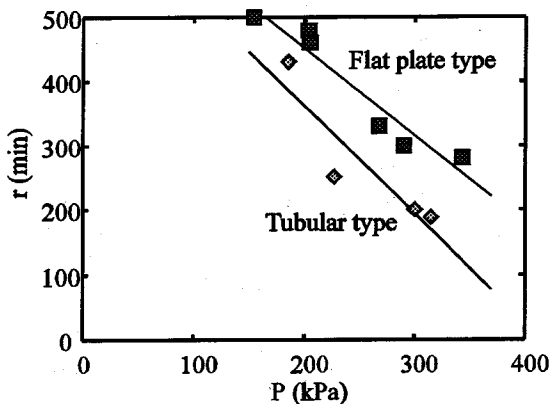


Fig. 3 Relationship between module pressure and r

に形成されるろ過抵抗層の固体質量は早く限界値に達することを示している。

b) モジュール圧力と透過フラックス及びろ過抵抗

Fig. 4は、連続ろ過実験時のモジュール圧力 P と実験終了時の透過フラックス J_f の関係を示している。

J_f は、 P が高いほど小さくなる傾向を示している。また、この減少傾向は、チューブラー型モジュールよりも平膜型モジュールの方が大きかった。これらのことは、膜面上でのゲル層やケーキ層の形成は、チューブラー型モジュールでより顕著であるが、圧力の影響は平膜型モジュールでより顕著であることを示唆している。

なお、図中の実線は次に述べる方法で求めた $\frac{W}{A} \cdot c$ と n を用いて式(1')をより計算した結果であり、計算値は全体の傾向をよく再現している。

各実験で V が同じであることから W は一定とみなし、 c を一定と考えた場合、 $\frac{W}{A} \cdot c$ は定数となる。この仮定の下で、モジュール毎に各実験終了時の P と R_{cg} の関係から $\frac{W}{A} \cdot c$ と n を計算した。このようにして求めた $\frac{W}{A} \cdot c$ と n を式(1')に代入し J_f を求めた。

Fig. 5は、 P と各種抵抗との関係を示す。ここで、 R_m は J_{w0} を用いて求めた初期膜抵抗、 R_f は J_f から求めた総抵抗、 R_r は連続ろ過実験後に精製水を循環させて洗浄した後、精製水をろ過して求めたろ過抵抗である。上述の R_{cg} は R_f から R_m を引いて求めたものである。また、 R_r と R_m の差は精製水を循環させるだけでは除去できない抵抗 R_p であるとし、 R_f と R_r の差は精製水の循環により除去できる抵抗

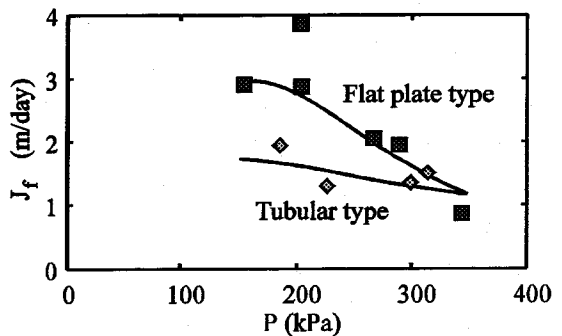


Fig. 4 Relationship between module pressure and J_f

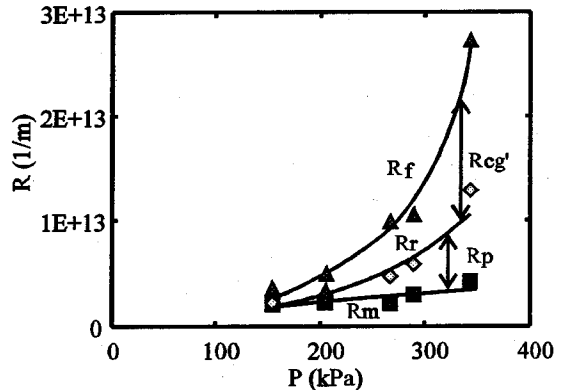


Fig. 5a Relationship between module pressure and resistance at the end of filtration (Flat plate type)

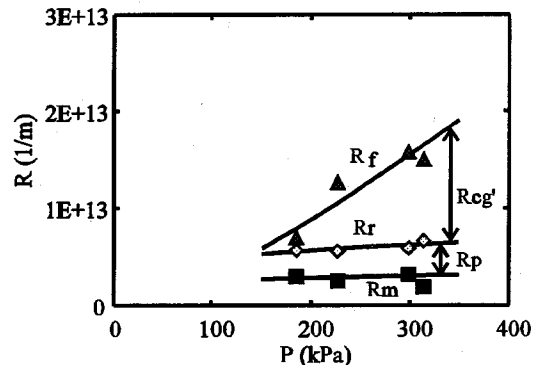


Fig. 5b Relationship between module pressure and resistance at the end of filtration (Tubular type)

R_{cg}' とした。

平膜型モジュールの場合、 R_p や R_{cg}' は P が 200 kPa 以下では約 2×10^{12} 1/m 程度の R_m と同程度かそれ以下であるが、 P を増加させると加速度的に増加した。一方、チューブラー型モジュールの場合、 P に係わらず R_p は 2×10^{12} 1/m 程度で常に R_m と同程度存在するが、 R_{cg}' はモジュール圧力の増加と共に直線的に増加する傾向を示し、300kPa 以上では 1×10^{13} 1/m 以上にまで増加した。

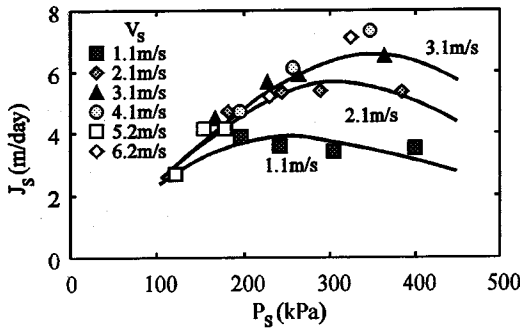


Fig. 6a Relationship between P_s and J_s

(Flat plate type; MLSS 5,400 mgSS/l; module pressure at long term filtration 150 kPa)

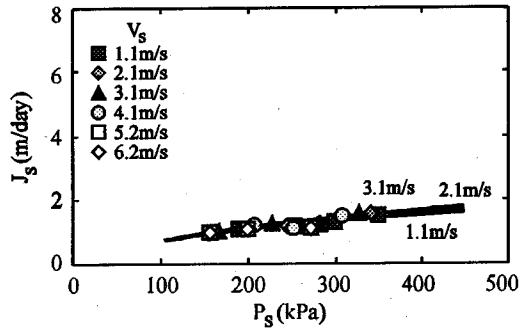


Fig. 6b Relationship between P_s and J_s

(Flat plate type; MLSS 4,800 mgSS/l; module pressure at long term filtration 340 kPa)

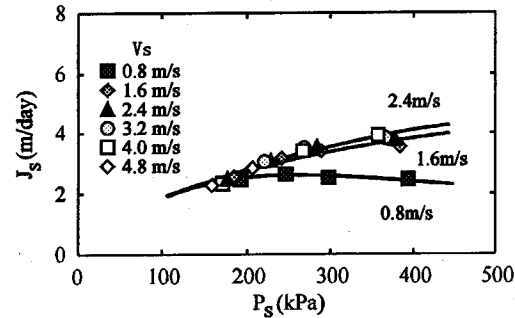


Fig. 6c Relationship between P_s and J_s

(Tubular type; MLSS 6,100 mgSS/l; module pressure at long term filtration 190 kPa)

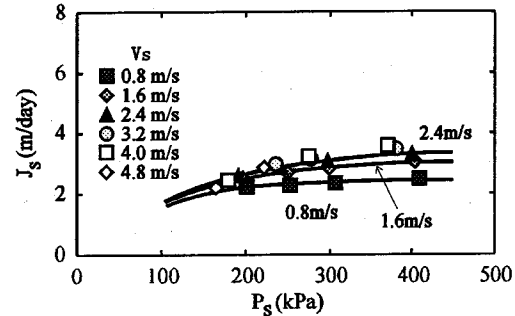


Fig. 6d Relationship between P_s and J_s

(Tubular type; MLSS 6,200 mgSS/l; module pressure at long term filtration 320 kPa)

以上のことから、ろ過抵抗層の抵抗は、平膜型モジュールでは P の増加に対して指数的に増加するが、チューブラー型モジュールでは直線的に増加し、また、低い P でも R_p が形成されやすいと結論される。

(2) 短期間ろ過実験

a) 透過フラックス

Fig. 6は、短期間ろ過実験におけるモジュール圧力 P_s と透過フラックス J_s との関係を連続ろ過実験時のモジュール圧力 P 毎に示したものであり、 P が低い場合と高い場合を例示した。

モジュール形状にかかわらず、連続ろ過実験時の P が低い場合、 J_s は膜面流速 V_s が遅い場合には P_s の増加とともに上に凸の曲線を描く傾向を示し、 V_s が速い場合には P_s の増加とともに増加する傾向を示す。また、 P_s が同じ場合には J_s は V_s が速いほど大きな値となる。一方、大きな P で連続ろ過した場合には、 V_s が増加しても J_s の変化は小さかった。

図中の曲線は、3.1(2)と同様に、 V_s 毎に P_s と R_{cgs} の関係から $\frac{W}{A} \cdot c$ と n の値を求め、式(1')より求めた J_s の計算結果である。なお、 R_m は連続実験開始時に求めた R_m を定数として用い、 R_m に対する履歴の影響は無視した。また、求められた n はいずれも1より大きかったが、 $n > 1$ の場合、式(1')において J は P の増加と共に上に凸の曲線を描くように変化する⁵⁾。

b) ろ過形態

筆者らが未使用の限外ろ過膜を用いて行った短期間ろ過実験では、 P が一定の場合、 J の V による影響は V やレイノルズ数では整理することができず、ろ過抵抗層の厚さを0とし⁸⁾、式(5)から計算される剪断応力 τ_0 ⁹⁾ を指標とするとFig. 7が得られ、ろ過形態を3つに分けることができた⁶⁾。なお、図中の R_m は用いた膜の最大値と最小値である。

$$\tau_{0s} = \frac{\Delta P}{\Delta l} \cdot \frac{d}{4} \quad (5)$$

ここで、 τ_{0s} : 短期間ろ過実験時の剪断応力(Pa)、 ΔP : モジュール内の管路による圧力損失(kPa)、 Δl : モジュール内の流路長さ(m)、 d : モジュール内の流路直径(m)、ただし平膜型モジュールの場合には相当直径 D (m) である。

τ_{0s} が100Pa以下となる低膜面流速域では、モジ

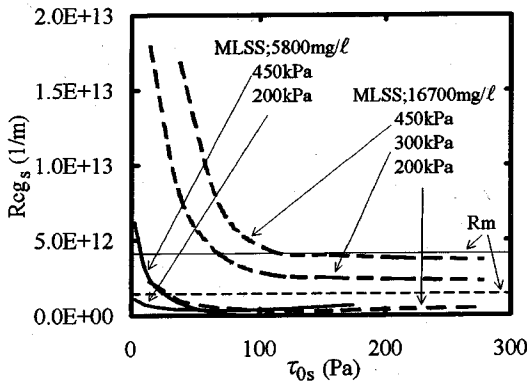


Fig. 7a Relationship between τ_{0s} and R_{cg_s}
(Flat plate type; Short term filtration)⁶⁾

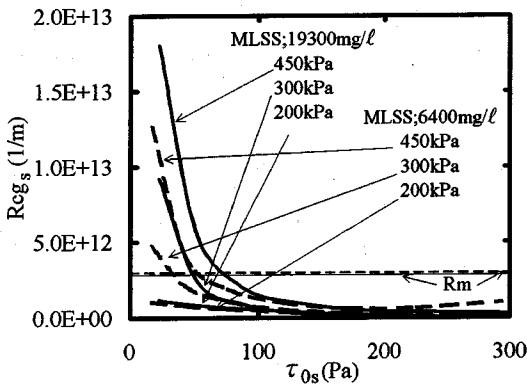


Fig. 7b Relationship between τ_{0s} and R_{cg_s}
(Tubular type; Short term filtration)⁶⁾

ジュール形状やMLSS濃度にかかわらず、 R_{cg_s} は τ_{0s} や P_s により変化し、これに伴って J_s が変化する①ケーキろ過のろ過形態にある。一方、 τ_{0s} が100Paを越える高膜面流速域では、平膜型モジュールで低MLSS濃度の場合やチューブラー型モジュールの場合、 R_{cg_s} は P_s にかかわらず R_m と比較して殆ど無視出来る程度の一定値となり、 J_s は R_m に依存してほぼ一定となる②膜ろ過のろ過形態になる。また、平膜型モジュールで高MLSS濃度の場合、 R_{cg_s} は無視できない一定値となることから、 J_s は R_{cg_s} と R_m に依存してほぼ一定となる③その他のろ過形態になる。

以上の前提の下で、本研究の短期間ろ過実験におけるろ過形態を検討した。

実験結果から、いくつかの P_s に対して τ_{0s} と R_{cg_s} を求め、Fig. 8に両者の関係を示した。

平膜型モジュールの場合、150 kPaで連続ろ過を行った時、50 Pa程度の τ_{0s} を境界として、①ケー

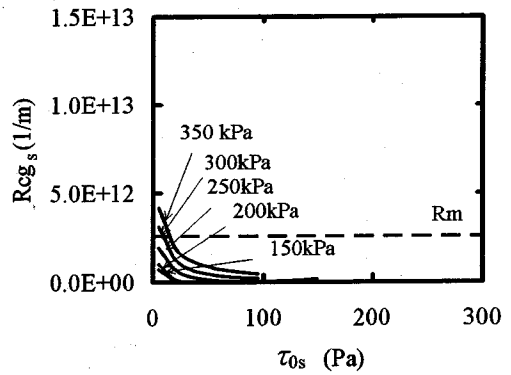


Fig. 8a Relationship between τ_{0s} and R_{cg_s}
(Flat plate type; MLSS 5,400 mgSS/l; module pressure at long term filtration 150 kPa)

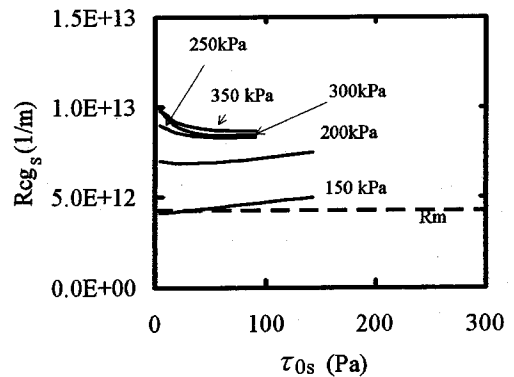


Fig. 8b Relationship between τ_{0s} and R_{cg_s}
(Flat plate type; MLSS 4,800 mgSS/l; module pressure at long term filtration 340 kPa)

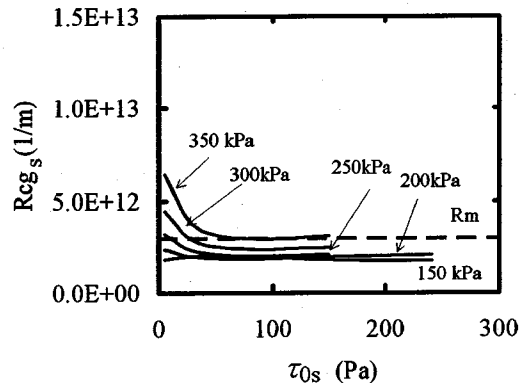


Fig. 8c Relationship between τ_{0s} and R_{cg_s}
(Tubular type; MLSS 6,100 mgSS/l; module pressure at long term filtration 190 kPa)

キろ過と②膜ろ過に分けられる。しかしながら、200 kPaより高いPで連続ろ過を行うと、50 Pa程度の τ_{0s} を境いに、①ケーキろ過から③その他のろ過

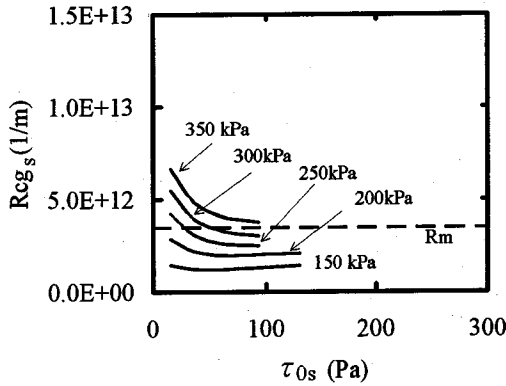


Fig. 8d Relationship between τ_{0s} and R_{cg_s}

(Tubular type; MLSS 6,200 mgSS/ℓ; module pressure at long term filtration 320 kPa)

形態に移行する傾向を示した。また、340 kPaと大きな P で連続ろ過を行った場合、 R_{cg_s} は τ_{0s} にかかわらず R_m 以上の値になり、かつ③のその他のろ過形態が卓越していた。一方、チューブ型モジュールの場合、連続ろ過時の P に係わらず、50 Pa 程度の τ_{0s} を境界として①ケーキろ過と③その他のろ過形態に分けられた。

c) ろ過条件とろ過形態

未使用の限外ろ過膜を用いて行った短期間ろ過実験の運転条件と透過フラックスの関係は、Fig. 9 に示す概念図により表すことができる^{5), 6)}。

すなわち、I で示される低 V_S 領域では、①ケーキろ過となり、 J_S は V_S が速いほど大きくなる。しかしながら、活性汚泥により形成されるろ過抵抗層は $n > 1$ であり^{5), 6)} 圧縮性を持つことから、 P_S には限界値が存在し、それ以上 P_S を増加させると J_S は逆に低下することになる。

一方、II で示される高 V_S 領域では、斜線で示す②膜ろ過となって、 J_S は V_S に影響されず P_S とともに増加する場合と、太線で示す③その他のろ過形態となって、 P_S が低い時は J_S は P_S とともに増加するが、 P_S が高いと J_S が変化しなくなる場合とがある。

I と II の領域を分ける指標は τ_{0s} であり、 τ_{0s} が 100 Pa 程度を越えるとモジュール形状や MLSS 濃度にかかわらず II の領域になった。また、②膜ろ過と③その他のろ過形態を分ける指標は、モジュール形状や MLSS 濃度である。すなわち、②膜ろ過は平膜型モジュールで MLSS 濃度が低い場合やチューブ

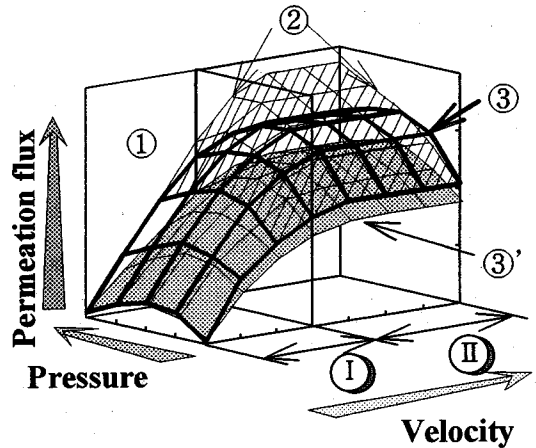


Fig. 9 Conceptual model of operational conditions on permeation flux

型モジュールで認められ、③その他のろ過形態は、平膜型モジュールで MLSS 濃度が高い場合に認められた。

これに対して、連続ろ過により膜が汚れた場合、平膜型モジュールで低い P で連続ろ過を行った場合を除き、膜面上には R_p が存在することを Fig. 5 で示した。したがって、いずれのモジュールでも②膜ろ過の状態ではなく、さらに③その他のろ過形態より J_S の上限が引き下げられた灰色で示した③'のろ過形態になると考えられる。このろ過形態は、ケーキ層に圧密が進み、さらに膜の汚れにより R_m が増加した結果生ずるろ過抵抗層での状態であるものと推定される。このような状態でろ過が行われた場合、I と II の領域を分ける τ_{0s} は 50 Pa 程度と小さくなった。

これらより、活性汚泥懸濁液の限外ろ過において安定して高い J を得るための要件は、 R_{cg} を小さくするために、より大きな τ_0 を与えるように V を大きく設定することであり、また、可能な限り低い P でろ過を行うことでもある。とくに、P の大きさによって R_p が変化する平膜型モジュールにあっては R_p の増加を抑えるような、低い P によるろ過が有効である。

(3) パイロットプラントおよび実処理施設での運転データの評価

a) 操作条件と透過フラックス

水処理メーカー数社のパイロットプラント実験¹⁰⁾と実処理施設における運転データ¹¹⁾を用いて、し尿

Table 2 Design and operation condition of collective night soil treatment plants.

| Pilot-scale plants | | | | | | | | | | |
|------------------------|------------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Module type | Flat plate | | | | Tubular | | | | | |
| Area (m ²) | — | — | 0.4 | 4.6 | — | 4.5 | 2.3 | | | |
| Temp.(°C) | 35.4 | 29.9 | 28.4 | 27.5 | 35.0 | 22.5 | 31.1 | | | |
| MLSS(mgSS/ℓ) | 8,690 | 18,000 | 17,815 | 23,765 | 22,200 | 12,200 | 18,932 | | | |
| Velocity(m/s) | 2.2 | 1.9 | 2.0 | 1.2 | 3.0 | 2.5 | 3.2 | | | |
| Pressure(kPa) | 142.2 | 186.3 | 88.3 | 235.4 | 271.6 | 259.9 | 298.9 | | | |
| P.Flux(m/day) | 1.9 | 1.3 | 0.6 | 1.3 | 1.2 | 1.6 | 1.1 | | | |
| Full-scale plants | | | | | | | | | | |
| Module type | Flat plate | | | | | | | | | |
| Capacity(kℓ/d) | 25 | 61 | 40 | 43 | 42 | 70 | | | | |
| Area (m ²) | 52.0 | 31.5 | 31.5 | 120.0 | 26.0 | 72.8 | | | | |
| MLSS(mgSS/ℓ) | 20,000 | 25,000 | 19,000 | 17,100 | — | 15,000 | | | | |
| Velocity(m/s) | 2.0 | 2.0 | 1.9 | 2.4 | 2.2 | 2.0 | | | | |
| Pressure(kPa) | 245.2 | 294.2 | 304.0 | 323.6 | 333.4 | 196.1 | | | | |
| P.Flux(m/day) | 1.2 | 1.3 | 1.2 | 1.0 | 2.3 | 2.1 | | | | |
| Module type | Tubular | | | | | | | | | |
| Capacity(kℓ/d) | 90 | 70 | 70 | 32 | 80 | 50 | 96 | 40 | 10 | 90 |
| Area (m ²) | 138.0 | 121.0 | 110.4 | 40.0 | 60.0 | 69.0 | 41.4 | 64.0 | 13.8 | 60.0 |
| MLSS(mgSS/ℓ) | 21,500 | 17,000 | 19,800 | 19,800 | 19,800 | 15,000 | 12,000 | 20,000 | 15,000 | 20,000 |
| Velocity(m/s) | 2.0 | 2.7 | 2.3 | 2.1 | 2.0 | 3.1 | 2.0 | 2.5 | 2.9 | 3.0 |
| Pressure(kPa) | 365.8 | 402.1 | 245.2 | 255.0 | 294.2 | 176.5 | 196.1 | 245.2 | 382.5 | 294.2 |
| P.Flux(m/day) | 1.3 | 1.4 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.5 | 1.3 | 1.2 | 1.1 |

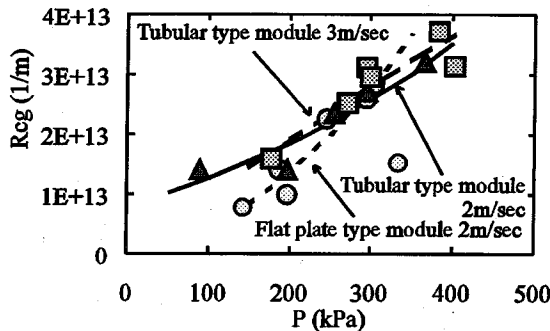


Fig. 10 Relationship between P and Rcg (Plants data)

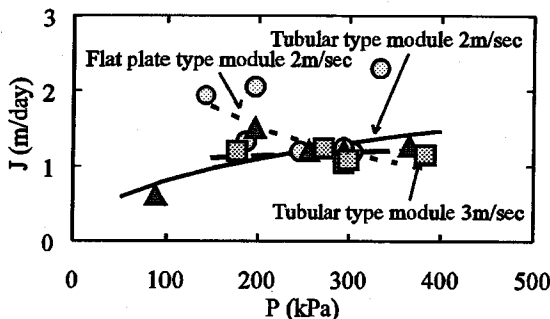


Fig. 11 Relationship between P and J (Plants data)

の生物処理の固液分離における膜分離プロセスについて運転状況を評価した。

解析に用いたデータは、Table 2に示すデータの

うち、平均膜面流速Vを指標として選定し、平膜型モジュールでは1.9~2.2m/sの範囲にある7ケースを、チューブラー型モジュールでは2.0~2.1 m/sの範囲にある5ケースと2.9~3.2 m/sの範囲にある5ケースを用いた。なお、V、操作圧力P及び透過フラックスJは、報告された値の平均値を用い、ろ過抵抗層の抵抗Rcgの算出に必要な膜抵抗Rmと粘度ηの値は、パイロットプラントで1例ずつ報告された値 1×10^{12} 1/mと0.77 mPa*sを定数として与えた。

Fig. 10はPとRcgとの関係を示す。膜面流速ごとにデータが得られた膜分離プロセスの運転条件、モジュール形状、膜性能、MLSS濃度は様々であるが、Pの増加とともにRcgは一定の傾向で増加している。図中の実線と点線は、ろ過抵抗層成分の質を同じと考え、3.1(2)と同様にして求めた $\frac{W}{A} \cdot c$ と n から $Rcg = \frac{W}{A} \cdot c \cdot P^n$ として計算した結果であるが、データをうまく整理できる。また、一例を除きRcgは 1×10^{13} 1/m以上であり、Rmと比較して十分大きな値であった。なお、平膜型モジュールにおける333.4 kPaのデータは異常値として計算から除外した。

Fig. 11にはPとJの関係を示したが、両者の関係

は、前述の $\frac{W}{A} \cdot c$ と n から式(1')により計算した実線や点線で近似できた。

これらの結果から、パイロットプラントや実処理施設は、モジュール形状に係わらず J が P により変化する R_{cg} に支配されていると考えられる。

b) チューブラー膜における τ_0 と R_{cg} の関係

調査データの中にはモジュール内の管路による圧力損失が含まれていないことから、式(5)を用いて τ_0 を計算することはできないが、チューブラー型モジュールの場合、モジュール内の試料の流れを乱流状態と仮定すると、 τ_0 は式(6)で表される¹²⁾。

$$\tau_0 = \frac{(V^2 \cdot f \cdot \rho)}{8} \quad (6)$$

ここで、 V ：膜面流速(m/s)、 f ：摩擦損失係数(-)、 ρ ：処理対象水の密度(kg/m^3)である。

チューブラー型モジュールの運転データについて、ろ過形態を把握するために、式(6)を用いて τ_0 を求め検討した。なお、 τ_0 の計算に必要な摩擦損失係数 f の値は、本研究で用いたチューブラー膜 NTU-3520 で得た膜面上の粗度係数 n ($n=0.010$)⁶⁾ を用いて計算した。また、 ρ はパイロットプラントで報告されている値 997.6 kg/m^3 を定数として用いた。

用いたデータは、Table 2 で示したチューブラー型モジュールの 240 ~ 270 KPa の範囲にある 6 ケースと 370 ~ 400 KPa の範囲にある 3 ケースであった。

Fig. 12 に τ_0 と R_{cg} の関係を示す。同程度の操作圧力の場合、 R_{cg} は τ_0 に対してほとんど変化しなかった。この結果は、チューブラー型モジュールを用いたパイロットプラントや実処理施設におけるろ過形態は、前述の③' その他のろ過形態にあることを示している。

このことが平膜型モジュールの場合にも当てはまると考えた場合、現行の実処理施設では、3. 1 (3) で述べたように速い膜面流速、目的の透過フラックスを得ることが可能な限り低い圧力によるろ過操作が、透過フラックスから見た効率的な運転操作条件であると結論できる。

4. まとめ

本研究では、し尿等の生物処理の固液分離プロセ

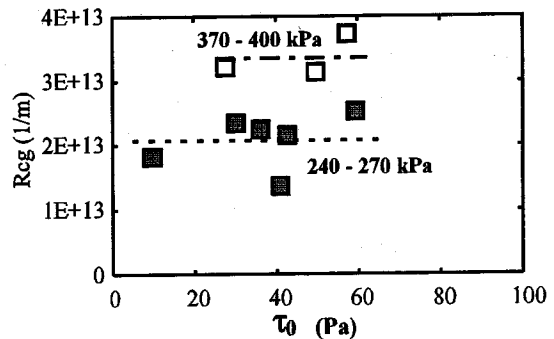


Fig. 12 Relationship between τ_0 and R_{cg} (Plants data)

スとして用いられているクロスフロー型の限外ろ過で、膜汚れがある場合のろ過条件と透過フラックスの関係について検討を行った。また、水処理メーカー社の子尿の高負荷脱窒素処理に関わるパイロットプラントや実処理施設におけるろ過条件と透過フラックスの関係について検討を加え、実処理施設での効率的な運転方法について考察した。

以下に得られた結果を要約する。

- 1) 活性汚泥懸濁液の連続ろ過におけるろ過時間 t と透過フラックス J との関係は、 t とろ過抵抗層の固体重量 W との間に式(2)を想定することにより説明できた。この結果、モジュール圧力 P が高い程膜面上のケーキ層は早く限界値に達することが推測された。
- 2) クロスフロー型の連続ろ過は、ケーキろ過の状態で行われており、また、モジュール形状に係わらず、 J は水の循環では除去できない R_p と水の循環により除去できる R_{cg}' の 2 種類の抵抗に支配されると考えられる。
- 3) 膜が汚れ、 R_p が存在する膜における J とろ過条件との関係は、低 V 領域では①ケーキろ過となるが、高 V 領域では多くの場合③' のろ過形態となり、Fig. 9 に示す概念図で R_p が顕著でない時の太線で示した J を引き下げた形になる。
- 4) パイロットプラントや実処理施設では、モジュール形状に係わらず③' のろ過形態でろ過が行われていると考えられるため、より速い膜面流速を与え、また、目的の透過フラックスが得られる限り低い圧力によるろ過操作が膜分離プロセスの効率化へつながらせるものと考えられる。

謝辞：本研究の実施ならびに論文作成にあたり、国立公衆衛生院水道工学部井上雄三生活衛生適正処

理技術主任研究官に御助言をいただき、また、実験にあたり、当時東洋大学工学部土木工学科学生石田欣司君（現新潟県庁）の協力を得たので記して感謝いたします。また、本研究は、ヒューマンサイエンス振興財団のヒューマンサイエンス基礎研究事業および環境庁の国立機関公害防止等試験研究費による研究成果の一部であり、記して謝意を表す。

参考文献

- 1) (財) 廃棄物研究財団: 財団だより, No. 14, 1993.
- 2) 田中勝, 三崎岳郎: 膜を利用したし尿処理技術の研究, 第14回全国都市清掃研究発表会講演論文集, 43-45, 1993.
- 3) 益本正憲, 小西克育, 砂原広志, 正藤英司, 大野省太郎: 活性汚泥-平膜限外ろ過による下水の長期運転処理, 第23回水質汚濁学会要旨集, 205-206, 1989.
- 4) 保田雄二: 膜分離を適用した生物処理法の成立条件に関する考察, 水処理技術, **32**, 427-422, 1991.
- 5) 西村和之, 河村清史, 伊藤雅喜, 真柄泰基: 膜分離プロセスにおける操作因子, 液中成分の透過フラックスに及ぼす影響に関する基礎的研究, 衛生工学研究論文集, **28**, 113-124, 1992.
- 6) 西村和之, 河村清史, 真柄泰基: 活性汚泥懸濁液の膜分離における透過フラックスに関する研究, 環境工学研究論文集, **29**, 85-91, 1992.
- 7) J.L.Harris: Influence of gel layer theory on ultrafiltration flux of wheat starch effluent, *J.Membrane Sci.*, **29**, 97-109, 1986.
- 8) 鈴木宏政, 山下一彦, 松本幹治: クロスフロー精密ろ過の剪断力による解析, 化学工学会年会研究発表講演要旨集, **55**, 85, 1990.
- 9) 古屋善正, 村上三清, 山田豊: 朝倉機械工学全書 **12**, 流体工学, (株)朝倉出版, 1967.
- 10) 国立公衆衛生院廃棄物工学部が実施した膜分離を導入した高負荷脱窒素処理施設の運転状況調査の結果.
- 11) ヒューマンサイエンス基礎研究事業報告書用資料.
- 12) 椿東一郎: 基礎土木工学全書 6 「水理学 I」, 森北出版株式会社, 1973.

(1995. 1. 5 受付)

STUDY ON EFFECTS OF OPERATIONAL FACTORS FOR PERMEATION FLUX OF ACTIVATED SLUDGE SUSPENSION IN ULTRA MEMBRANE FILTRATION

Kazuyuki NISHIMURA, Kiyoshi KAWAMURA, Yasumoto MAGARA and Tatsuya NOIKE

Effects of operational factors on permeation flux of activated sludge suspension were examined in an experimental plant of the cross-flow type ultra membrane filtration process. The resistance developed in fouled filters was consisted of removable resistance and non-removable resistance by water washing.

Relationship between permeation flux and operational conditions was explained by the pressure- model of sludge filtration, which introduced compression effect of resistance layer. And the effects of operational factors on permeation flux in pilot- scale plants and full-scale plants for collective human excreta treatment are also explained by the model.

It was concluded that the effective operational conditions to maintain high permeation flux in the cross- flow type ultra membrane filtration process were high flow velocity and low driving pressure.