

(32) 管状限外ろ過膜における膜透過流束に影響を及ぼす因子に関する研究

A STUDY ON FACTORS AFFECTING PERMEATE FLUX IN A TUBULAR
ULTRAFILTRATION SYSTEM

柳根勇*, 桃井清至*, 原田秀樹*

Liu GenYong*, Kiyoshi MOMONOI*, Hideki HARADA*

ABSTRACT; The effect of soluble microbial products(SMP) on permeate flux and resistances in ultrafiltration incorporated into activated sludge process was investigated. In a resistance-in-series model applied in this study, gel layer resistance was assumed to be proportional to gel layer thickness(Lg) and gel layer formation concentration(Cg), i.e. $R_g = \alpha \cdot L_g \cdot C_g$. Resistance coefficient α and mass of gel layer Mg was used for interpretation of the influences of suspension composition and operational conditions on permeate performance. The results suggested that high molecule SMP accumulated in the reactor plays a more significant role in the decline in permeate flux rather than MLSS. It is found that permeate flux dropped logarithmically with increasing SMP concentration. The declination in flux or the increase in resistance was due to the increase in gel layer mass independent of resistance coefficient α . It is observed that applied pressure and crossflow velocity affect both cake layer resistance and gel layer resistance. As applied pressure was raised, the gel layer resistance increased correspondently. This is attributed to the same variation in resistance coefficient as gel layer resistance. On the other hand, gel layer resistance decreased with crossflow velocity due to decrement in the Mg.

KEYWORDS; UF membrane, permeate flux, SMP(soluble microbial products), cake layer, gel layer.

1. はじめに

膜分離システムのし尿処理あるいは中水道の分野への応用は急速に進んでいるが、システムの操作、運転に関し、いくつかの解決すべき問題が残されている。特に、膜への付着層の形成による膜透過性能の低下もその内の一つである^{1) 2)}。

クローズドシステムとしての膜分離システムでは、生物代謝反応により産出される生物代謝産物(Soluble Microbial Products, 以下はSMPと略す)が反応槽内で蓄積されるという特徴を持っている。これらの代謝産物は、流入基質の種類に関係なく特定の性質を示す³⁾。生成あるいは蓄積される代謝産物は、生物反応に影響を及ぼすとともに、反応槽混合液の主な溶解性成分として膜面付着層の形成にも大きく関与する。

そこで、本研究では、この生物代謝産物に焦点をあて、膜面付着層の形成及び膜透過性能の低下に代謝産物などの影響について検討を行った。また、全量ろ過と同様に、ろ過抵抗モデルのゲル層抵抗項にろ過抵抗係数を導入し、ゲル層付着物量とろ過抵抗係数を用い、混合液の性状及び操作条件の膜透過流束に及ぼす影響について考察を行った。最後に、付着層形成物質の物性あるいは組成成分を分析し、反応槽混合液の組成との関係について調査した。反応槽内の生物代謝産物と溶解性残存基質を区分するために、本実験では易分解性の低分子量有機物フェノールを唯一の基質炭素源として用いた。

2. 実験方法

2. 1 連続ろ過実験

連続ろ過実験は、膜洗浄を行わないで、基質を連続的に反応槽へ流入させるとともに反応槽の混合液を連続的にろ過する実験系である。図-1に実験装置の概略を示す。反応槽内の活性汚泥混合液は、循環ポンプにより反応槽と膜モジュールの間を加圧循環されている。膜モジュールの入り口と出口でそれぞれ圧力計を取り付け、操作圧力はその入り口と出口の圧力の平均値とした。反応槽の容積は12 lである。槽内の液温は $25 \pm 1^\circ\text{C}$ に設定した。基質タンクより、人工基質を自動的に反応槽内へ補給し反応槽内の液量を一定に保つようにした。実験に用いた活性汚泥混合液は7:1-Nを主成分とする人工下水で連続培養したものである。基質組成を表-1に示す。連続実験の運転条件を表-2に示す。連続実験の間、約5日の間隔で反応槽の混合液を抜き取って他の膜モジュールを用い90分間のろ過実験を行った。それによって、槽内に生物代謝産物の蓄積に伴う膜透過性能の変化を考察した。実験に用いた膜モジュールは日東電工の管状限外ろ過膜（分画分子量 2万、有効膜面積340 cm^2 、材質 ポリレフィン）である。透過液量の測定は電子はかりで液の重量を測定し体積に換算した。

2. 2 回分ろ過実験

回分ろ過実験は、混合液の性状と操作条件を変化させ、膜透過性能と膜面付着層の性状の変化を調べた実験系である。実験条件を表-3に示した。混合液の代謝産物とMLSSをそれぞれ五段階の濃度に変化させて、代謝産物濃度とMLSS濃度の膜透過流束へ与える影響について検討を行った。混合液中の7:1-N濃度が1.0mg/l以下まで分解された時点での上澄液中の有機物を代謝産物由来と仮定し、上澄み液TOC濃度を代謝産物濃度の指標として用いた。回分ろ過実験の混合液は次のように調整した。連続ろ過実験終了後の混合液を用い、図-1に示した膜分離装置において混合液の濃縮を行った。さらに濃縮された混合液を自然沈降による固液分離し、上層の液と下層の沈降汚泥をそれぞれ回収した。次に水道水を用い、回収した上層の液を表-3に示したように五つの濃度（上澄み液のTOC）に希釈した。上澄み液TOC 5~10mg/lの系においてはMLSSの設定値を0から20000mg/lまで 5段階とし合計5回のろ過実験を行なった。ほかの上澄み液TOCにおいても、これと同様にMLSS濃度を5段階にし、全部で25回のろ過実験を行なった。回分ろ過実験は図-1に示した実験装置を用い、クロスフロー方式でろ過を行った。回分ろ過を行う前、装置に水を循環させ、膜の水透過流束を測定した。膜洗浄（スポンジボール洗浄と薬品洗浄）に

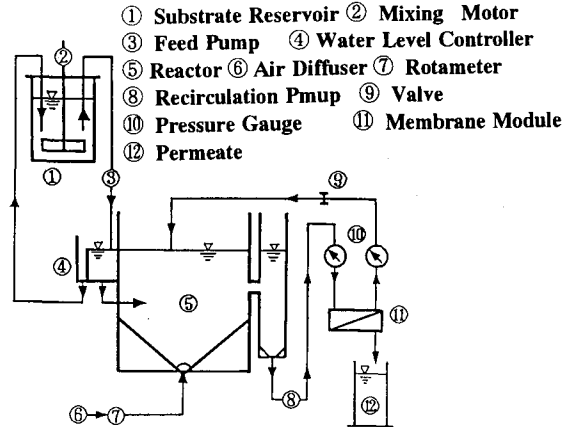


Fig.1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

Table.1 Substrate Composition

$\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$	500 mg/l
KH_2PO_4	80 mg/l
NH_4Cl	320 mg/l
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	100 mg/l
$\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	9.0 mg/l
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.0 mg/l
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	20 mg/l

Table.2 Experimental Condition

MLSS(mg/l)	10000
Substrate Concentration(mg/l)	500
Sludge Load of Start up (kg phenol/kg MLSS/d)	0.15
HRT(h)	8.0
Crossflow Velocity (m/s)	1.0
Operating Pressure(Pa)	1.96×10^5

Table.3 Experimental Method

SMP (mgTOC/l)	MLSS (mg/l)
5~10	0
30~40	2000
50~80	5000
100~120	10000
200~250	20000

より、ろ過実験開始前の水透過流束が一定になるようにした。また、回分ろ過を行っている間、混合液のSMPが変化しないように、膜透過液を反応槽内に戻すことにした。実験に用いた膜モジュール及び透過液量の測定は連続実験と同様である。各分離対象液のろ過特性はろ過時間 90分の膜透過流束（以下、平衡透過流束と称する）で評価した。

2. 3 膜面付着物の回収及び分析

混合液のろ過終了後、水とスポンジボールを用い順に膜面を洗浄した。水洗浄は、混合液のろ過と同一の操作条件（膜面流速と操作圧力）で行った。水洗浄後、膜を装置から取り外し、スポンジボールを管内に入れ水道水で押し出しながら洗浄した。膜面の付着物には、目詰まり物質、ゲル化された付着層（ゲル層）と汚泥の堆積層が存在する。本実験において、考察の便宜上、ゲル化された付着層と汚泥の堆積層をそれぞれゲル層とケーキ層と定義した。さらに、水洗浄によりケーキ層、スポンジボール洗浄によりゲル層がそれぞれ排除されると仮定した。従って、式（1）を利用し、水洗浄後の膜透過流束の回復に基づきケーキ層抵抗を算出し、スポンジボール洗浄後の膜透過流束の変化からゲル層抵抗を求めた。また、水洗浄とともに回収した付着物はケーキ層形成物質とし、スポンジボール洗浄とともに回収した付着物はゲル層形成物質とした。回収したゲル層とケーキ層洗浄液をそれぞれ100mlサンプリングし、この100mlの液に対し約30秒ホモジナイズ（ヒスコトロン、ダイヤル40）する。浮遊させた各洗浄液を0.1 μ m、0.2 μ m、0.45 μ mと1.0 μ mのメンブレンフィルターでろ過し、残存のTOC, Sugar, Protein濃度に基づき、洗浄液の粒径分布を評価した。また、回収した各洗浄液はミクロレタを用い所定の体積に濃縮され、TOCと蒸発残留物（TDS）を付着物量の指標として用いた。付着物分析における蛋白質の定量はLowry法、糖の定量はフェーリング・硫酸法で測定した。

2. 4 ろ過抵抗^{4) 5) 6)}

活性汚泥混合液をろ過した場合、管内の膜表面から順に目詰まり物質、ゲル層、ケーキ層（汚泥堆積層）が存在すると仮定すれば、ろ過抵抗は式（1）より定義される。

$$J = \frac{\Delta P}{\mu (R_m + R_p + R_g + R_c)} \quad (1)$$

ここで、Jは膜透過流束（m³/m²・d）、 ΔP は操作圧力（Pa）、 μ は透過液の粘度（Pa・S）、 R_m は膜抵抗（1/m）、 R_p は目詰まり抵抗（1/m）、 R_g ゲル層抵抗（1/m）、 R_c はケーキ層抵抗（1/m）である。

ゲル層抵抗 R_g はゲル層濃度と厚さに比例すると仮定すると、式（2）が得られる。

$$R_g = \alpha \cdot L_g \cdot C_g \quad (2)$$

ここで、 L_g はゲル層厚（m）、 C_g はゲル層濃度（kg/m³）、 α はろ過抵抗係数（m/kg）である。従って、式（2）が式（3）のように整理できる。

$$R_g = \alpha \cdot L_g \cdot C_g = (\alpha/A) \cdot M_g \quad (3)$$

ここで、Aは有効膜面積（m²）で、 M_g はゲル層付着物量（以下は、付着物量と略する）である。式（3）を式（1）に代入すると、式（4）が得られる。

$$J = \frac{\Delta P}{\mu (R_m + R_p + R_c + (\alpha/A) \cdot M_g)} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta P}{\mu J} = R_m + R_p + R_c + (\alpha/A) \cdot M_g \quad (5)$$

後述の実験結果（図-4）によると、ろ過継続時間が長くなっても目詰まり抵抗とケーキ層抵抗はほとんど変化しなく、ほぼ一定の値となっている。従って、式（5）を利用して、 $\Delta P/(\mu J)$ と M_g の関係を図示すると、直線が得られ勾配からろ過抵抗係数 α が求められる。

3. 実験結果及び考察

3. 1 生物代謝産物の蓄積と膜透過流束の低下

図-2は、連続ろ過実験における反応槽内の代謝産物の蓄積と膜透過流束の経時変化を示したものである。膜透過流束は一日平均の値を用いた。図-2によると、連続ろ過時間の経過とともに代謝産物の蓄積濃度は高くなるが、連続運転開始後20日に最大値になりその後、若干減少する傾向が見られた。また、透過液の色度もろ過時間の経過とともに高くなるのが観察された。代謝産物は菌体由来の有機物として、色度成分の原因物質でもある。代謝産物の蓄積濃度の増大に伴い混合液の色度も大きくなることが考えられる。透過液の色度の変化は、生成された代謝産物の内、膜の分画分子量より小さい色度成分の流出によるものと推察される。このように低分子量の代謝産物あるいは色度成分の流出のため、槽内混合液の代謝産物の蓄積濃度が無制限に高くならなかった可能性も考えられる。また、膜透過流束の変化は蓄積濃度と逆に運転開始10日目内に急激な減少を示したが、その後の変化は緩やかになってろ過時間の経過とともに徐々に低下した。連続運転期間中、約5日間置きに反応槽内の混合液を用い、90分のろ過実験を行った。図-3に示したのは、その90分ろ過時間の平衡透過流束と反応槽上澄み液の代謝産物濃度 C_b の関係である。図-3によると、平衡透過流束は代謝産物の蓄積濃度 C_b の対数と直線関係となった。即ち、膜透過性能が代謝産物の蓄積濃度の増大につれ次第に低下し、平衡透過流束は代謝産物の蓄積濃度の増大に伴い指数関数的に減少することが分かった。

膜面付着層の性状の時間的変化により、膜透過流束はろ過時間の経過とともに減少すると思われる。連続ろ過実験終了後の混合液を用い、ろ過継続時間と各ろ過抵抗（目詰まり抵抗 R_p 、ゲル層抵抗 R_g 、ケーキ層抵抗 R_c と全ろ過抵抗増加分 R_t ）の関係を調べた。その結果を図-4に示した。ろ過継続時間が長くなるに従って、ケーキ層抵抗と目詰まり抵抗はあまり変化しないが、ゲル層抵抗は全ろ過抵抗増加分とともに大きくなった。ろ過開始後24時間で、ろ過抵抗の約80%以上がゲル層抵抗に占められた。膜透過流束の時間的減少が主にこのゲル層抵抗の増加によるもので、クロスフローの管状限外ろ過ではゲル層抵抗が支配的であることが分かった。また、ケーキ層はゲル層の外側に存在する濃度分極層と仮定すれば、ケーキ層抵抗が時間的に変化しないことが考えられる。図-5は、ゲル層抵抗と付着物量（以下は、付着物と略す）をプロットしたものである。式（3）に示したとおり、ゲル層抵抗と付着物量の関係はほぼ直線で近似できることを示唆している。図-6は、ろ過継続時間と付着物量及びろ過抵抗係数の関係を示したものである。付着物量はろ過時間の経過とともに多くなるが、ろ過抵抗係数はろ過時間と無関係でほぼ一定の値となっている。ろ過時間の経過に伴い、ろ過抵抗の増大あるいは膜透過流束の低下は、膜面ゲル層性状の変化によるもので

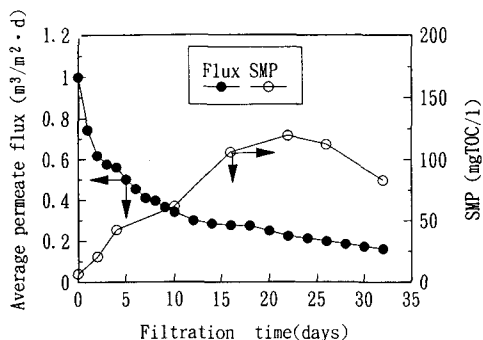


Fig.2 Permeate Flux Drop and SMP Accumulation with an Elapse of Filtration Time.

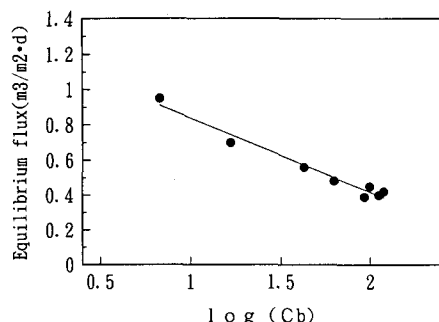


Fig.3 Variation in Equilibrium Flux with the Accumulation of SMP (At 90 Minutes Filtration Time)

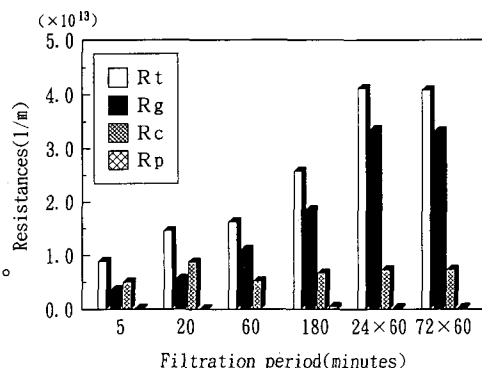


Fig.4 Variation in Resistances with an Elapse of Filtration Time.

はなく付着量の増加によるものということが分かった。

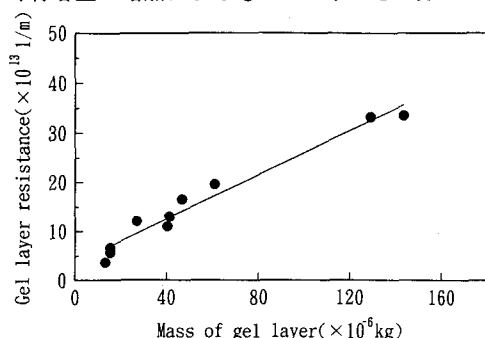


Fig.5 Relationship between Gel Layer Resistance(R_g) and Mass of Gel Layer(M_g).

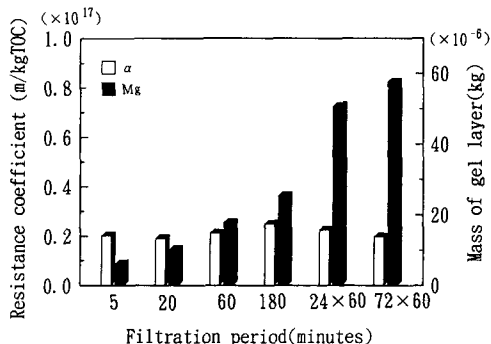


Fig.6 Variation in Resistance Coefficient (α) and Mass of Gel Layer(M_g) with an Elapse of Filtration Time.

3. 2 生物代謝産物濃度と膜透過流束

回分ろ過実験におけるMLSS濃度と平衡透過流束の関係について調べた結果を図-7に示す。代謝産物濃度が最も低い(TOCとして5~10mg/l) 場合、MLSS濃度の増大に従って膜透過流束は低下していくが、代謝産物濃度が30 mg/l以上になると平衡透過流束にMLSS濃度の影響はほとんど見られなかった。むしろ、MLSS濃度の増大に従って平衡透過流束が若干上昇する傾向が示された。また、図-7から、代謝産物濃度が高いほど平衡透過流束は低く、その差は代謝産物濃度の増加に従って小さくなることが観察された。

混合液のMLSS濃度を変化させ、膜透過流束と代謝産物濃度 C_b の関係を調べたところ、図-8に示したような結果が得られた。ほぼ連続ろ過実験の結果と同様に、平衡透過流束は混合液のMLSS濃度によらず $\log C_b$ と直線関係になった。即ち、代謝産物濃度が大きいほど膜の透過性能は悪くなり、平衡透過流束は代謝産物濃度のべき乗に比例して減少することが判明した。

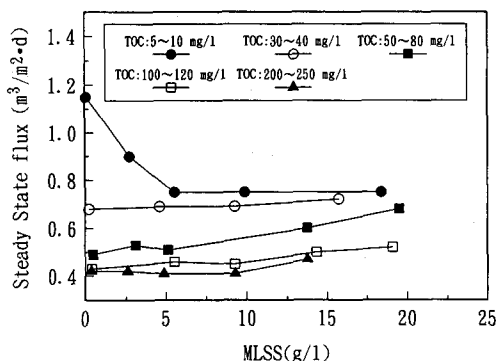


Fig.7 Effect of MLSS on the Equilibrium Flux as a Function of SMP Concentration.

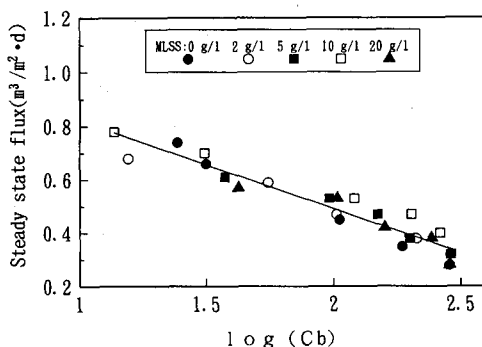


Fig.8 Effect of SMP Concentration on the Equilibrium Flux.(with different MLSS)

そこで、回分ろ過実験により、MLSS濃度と代謝産物濃度 C_b に対する各ろ過抵抗(目詰まり抵抗 R_p 、ゲル層抵抗 R_g 、ケーキ層抵抗 R_c 及び全ろ過抵抗増加分 R_t) の関係を検討したところ、図-9と図-10に示すような結果が得られた。図-9に示すように、MLSS濃度を 5 g/lから 30 g/lまでの範囲に大きく変化させたにもかかわらず、ろ過抵抗の変化はそれほど大きくなかった。ケーキ層抵抗はMLSS濃度とともに若干上昇したが、全ろ過抵抗増加分とゲル層抵抗は逆に減少する傾向しか認められなかった。また、図-10に示したように、全ろ過抵抗増加分とゲル層抵抗は代謝産物濃度 C_b の増大とともに大きくなることが観察された。ケーキ層抵抗は代謝産物濃度 C_b の低い領域では代謝産物濃度の増大に伴い大きくなるが、代謝産物濃度 C_b が40mg/l以上では変化しなくなった。一方、ろ過抵抗係数及び付着物量と代謝産物濃度の関係を図-11に

示した。図-11から分かるように、代謝産物濃度 C_b が高くなると、付着物量はそれと対応して急速に増えるが、ろ過抵抗係数の変化は

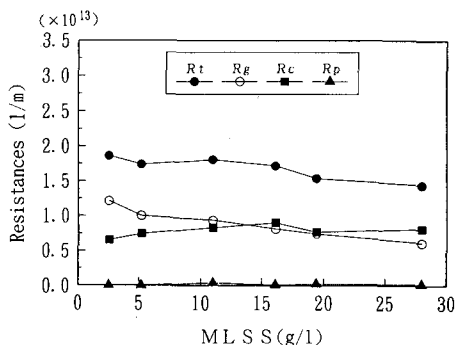


Fig.9 Effect of MLSS on the Resistances. (R_t, R_g, R_c and R_p)

認められなかった。ろ過抵抗係数及び付着物量とMLSS濃度の関係についても調べたが、両者にMLSS濃度の影響は見られなかった。これらの結果から、代謝産物はゲル層の形成に大きく関与し、ろ過抵抗係数ではなくゲル層の付着物量を通じてろ過抵抗あるいは膜透過流束に影響を及ぼすことが分かった。

3. 3 操作条件とろ過抵抗係数

ろ過抵抗の操作圧力依存性について調べた実験結果を図-12に示した。本実験の操作圧力範囲において、ゲル層抵抗とケーキ層抵抗はほぼ同様な変化を示し、両抵抗ともに操作圧力の上昇に伴い大きくなることが分かった。図-13にろ過抵抗と膜面流束の関係を示した。膜面流速が大きくなると、ケーキ層抵抗だけではなく、ゲル層抵抗も減少する。ケーキ層抵抗の変化は膜面流速のはぎ取り効果によるものと考えられる。図-9の結果と比較すると、ケーキ層抵抗には混合液の性状より操作圧力と膜面流速など操作条件の影響の方が大きいことが分かった。膜面流速が高くなると、ケーキ層あるいは濃度分極層内の乱れによってゲル層の成長を抑制したため、ゲル層抵抗が小さくなったと推察される。ろ過抵抗係数及び付着物量と操作条件（操作圧力、膜面流速）の関係を図-14及び図-15に示した。ろ過抵抗係数と付着物量は操作圧力と膜面流速に大きく依存することが分かった。ろ過抵抗係数と付着物量は、操作圧力の増大に従って大きくなる。また、膜面流速の増大につれろ過抵抗係数が大きくなるが、付着

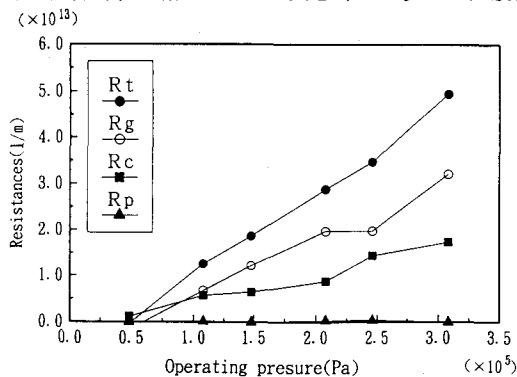


Fig.12 Effect of Operating Pressures (ΔP) on Resistances (R_t, R_g, R_c and R_p).

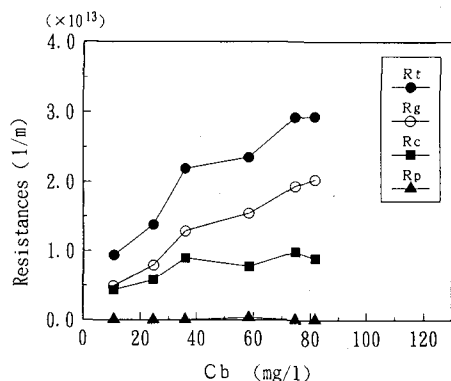


Fig.10 Effect of SMP Concentration on the Resistances (R_t, R_g, R_c and R_p).

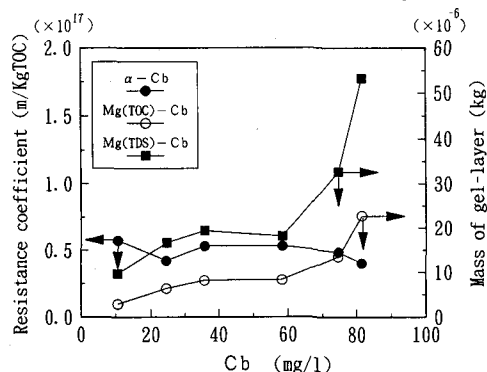


Fig.11 Variation in Resistance Coefficient (α) and Mass of Gel Layer (M_g) with an Increase in SMP Concentration (C_b).

ろ過抵抗の操作圧力依存性について調べた実験結果を図-12に示した。本実験の操作圧力範囲において、ゲル層抵抗とケーキ層抵抗はほぼ同様な変化を示し、両抵抗ともに操作圧力の上昇に伴い大きくなることが分かった。図-13にろ過抵抗と膜面流束の関係を示した。膜面流速が大きくなると、ケーキ層抵抗だけではなく、ゲル層抵抗も減少する。ケーキ層抵抗の変化は膜面流速のはぎ取り効果によるものと考えられる。図-9の結果と比較すると、ケーキ層抵抗には混合液の性状より操作圧力と膜面流速など操作条件の影響の方が大きいことが分かった。膜面流速が高くなると、ケーキ層あるいは濃度分極層内の乱れによってゲル層の成長を抑制したため、ゲル層抵抗が小さくなったと推察される。ろ過抵抗係数及び付着物量と操作条件（操作圧力、膜面流速）の関係を図-14及び図-15に示した。ろ過抵抗係数と付着物量は操作圧力と膜面流速に大きく依存することが分かった。ろ過抵抗係数と付着物量は、操作圧力の増大に従って大きくなる。また、膜面流速の増大につれろ過抵抗係数が大きくなるが、付着

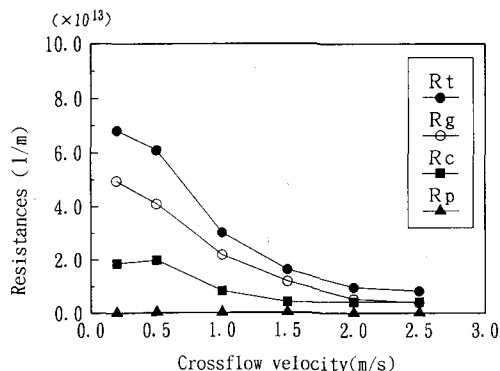


Fig.13 Effect of Crossflow Velocity (V) on Resistances (R_t, R_g, R_c and R_p).

物量は逆に減少した。操作圧力の上昇によって膜面ゲル層が圧密され、ろ過抵抗係数の増加をもたらしたと考えられる。付着物量が膜面流速の増大につれ減少するのは膜面流速の剥離効果によるものと推察される。ろ過抵抗係数と膜面流速との関係の結果について、さらに検討する余地があるが、膜面流速のはぎ取り効果で、抵抗係数の比較的大きい成分が優先的に付着したためと推測される。

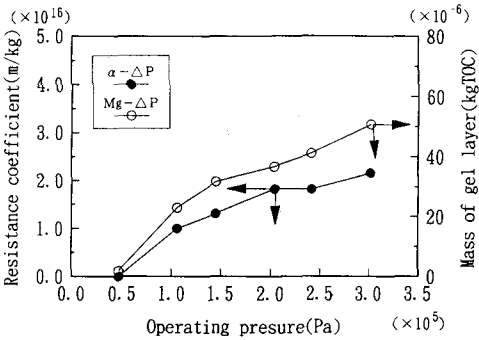


Fig.14 Effect of Operating Pressures (ΔP) on Resistance Coefficient (α) and Mass of Gel Layer (Mg).

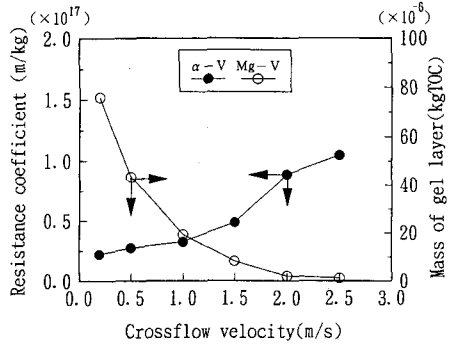


Fig.15 Effect of Crossflow Velocity (V) on Resistance Coefficient (α) and Mass of Gel Layer (Mg).

3. 4 付着成分について

図-16は回分ろ過実験終了後、膜面上の付着物を回収した洗浄液の粒径分布について調べた結果を示したものである。付着物の回収及び分散させる処理方法などについて、まだ確立されていないが、ゲル層とケーキ層の形成物質を回収した洗浄液を比較しながら分析したところ、以下に示したことがわかった。ケーキ層の洗浄液には粒子径0.45 μ mより小さい成分あるいは溶解性成分が約半分以上占めTOC、糖と蛋白質の占める率はそれぞれ49.0%、75.2%、53.4%であった。またケーキ層の洗浄液には、このような溶解性成分のほか、固形性成分もかなりの比率で存在することが分った。TOCを指標とした場合、ケーキ層洗浄液の約45.9%が固形性成分により構成され、膜透過流束にMLSSのような固形性成分の影響はこのケーキ層の形成に関与していると推定される。一方、ゲル層の洗浄液には1.0 μ mより大きい固形性成分の存在が少なく、0.45 μ mより小さい溶解性成分が大部分を占めている。また、ろ過時間の経過とともに、ゲル層の固形性成分の比率は増加するという結果が得られた。しかしながら、ゲル層とケーキ層形成物質を比較した場合、ゲル層中の溶解性成分の割合が多く、溶解性成分はゲル層の形成に大きく関与することが判明した。図-17は、ゲル層の洗浄液と反応槽上澄液のゲルクロマトグラフィを示したものである(ゲル:Sepharose CL-2B、溶出液:0.1MNaCl溶液)。上澄液とゲル層洗浄液は同一の位置にTOCピークが現れた。反応槽内の上澄液成分は膜を透過されない生物代謝産物で占められているので、この代謝産物がゲル層を形成しているものと思われる。

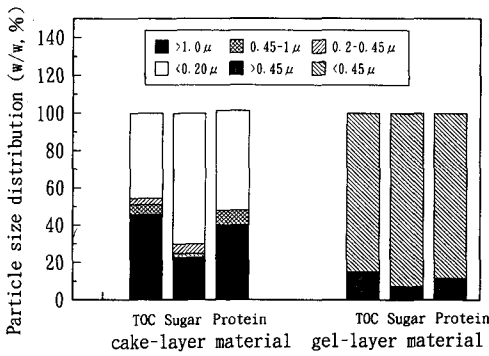


Fig.16 Particle Size Distribution of Fouling Layers Substances (At 90 Minutes Filtration Time).

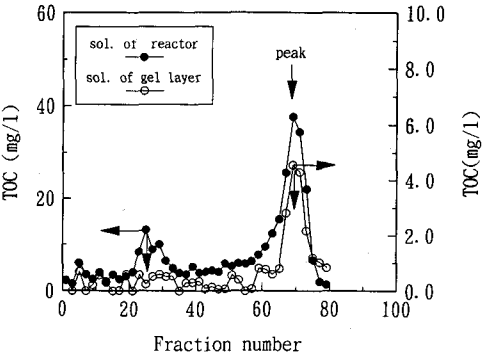


Fig.17 Gel Chromatogram of Gel-layer Washing Water and Reactor Broth.

0.1MNaCl溶液)。上澄液とゲル層洗浄液は同一の位置にTOCピークが現れた。反応槽内の上澄液成分は膜を透過されない生物代謝産物で占められているので、この代謝産物がゲル層を形成しているものと思われる。

4. まとめ

本研究から得られた知見は以下のとおりである。

(1) 膜分離システムにおいては、反応槽内の生物代謝産物の蓄積濃度はろ過時間の経過とともに大きくなり、約20日に最大蓄積濃度に達した。その間、混合液の膜透過性能は次第に低下していく。また、ろ過時間の経過につれゲル層の付着物量が多くなるが、全ろ過抵抗増加分にゲル層抵抗の占める割合が大きくなり、付着層抵抗の性質は次第にゲル層抵抗支配になる。

(2) 活性汚泥混合液のような高分子物質と菌体粒子を含む混合系では、膜透過性能にMLSSと生物代謝産物ともに影響を与えるが、MLSSより、代謝産物の影響の方が大きい。生物代謝産物濃度が高いほど、膜透過流束が小さくなり、代謝産物濃度の増大に従って膜透過流束は指数関数的に減少する。

(3) ゲル層抵抗は、MLSS濃度より代謝産物濃度に大きく影響される。代謝産物によるゲル層抵抗の増加は、ろ過抵抗係数ではなくゲル層付着物量の増加によるものである。また、ケーキ層抵抗は、MLSS濃度の増大につれ若干上昇する傾向を示すが、代謝産物濃度による変化は少ない。

(4) 操作圧力と膜面流束が変化すると、ゲル層抵抗とケーキ層抵抗はほぼ同様な変化を示す。即ち、両者とも操作圧力の増大につれ大きくなり、膜面流速の増加につれ減少する。ろ過抵抗係数は、操作圧力と膜面流速の増大に従って大きくなるのと対照に、付着物量は逆に減少していく。

(5) 膜面ケーキ層の付着物質には菌体のような固形性成分の他、溶解性成分も約半分以上占める。また、膜面のゲル層には固形性成分の存在がケーキ層より少なく、生物代謝産物由来の溶解性成分が多い。この代謝産物由来の溶解性成分はゲル層抵抗と大きく関係し、ゲル層抵抗を通じ膜透過流束に影響を及ぼすと考えられる。

〔使用記号〕

J = 膜透過流束 [$\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$]

ΔP = 操作圧力 [Pa]

μ = 透過液粘度 [$\text{Pa} \cdot \text{S}$]

R_t = 全ろ過抵抗増加分 [m^{-1}]

R_m = 膜抵抗 [m^{-1}]

R_g = ゲル層抵抗 [m^{-1}]

R_c = ケーキ層抵抗 [m^{-1}]

R_p = 目詰まり抵抗 [m^{-1}]

α = ろ過抵抗係数 [$\text{m} \cdot \text{kg}^{-1}$]

L_g = ゲル層の厚さ [m]

C_g = ゲル層生成濃度 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

A = 有効膜面積 [m^2]

M_g = ゲル層の付着物量 [kg]

C_b = 生物代謝産物濃度 [mg l^{-1}]

〔参考文献〕

- 1) 松本豊・戸塚好之：高温し尿発酵液のクロスフロー濾過，化学工学論文集，第16巻第2号，pp.193～203 (1990)。
- 2) 深川勝之ら：膜分離活性汚泥法における限外ろ過膜の目詰まり物質に関する研究，衛生工学研究論文集 第28巻，pp.125～130(1992)。
- 3) 丹保健仁・亀井翼・高橋正弘：好気性生物化学プロセスからの代謝産物成分の挙動と性質 (I)，下水道協会誌 Vol.18 No.210，pp.48～57(1981)。
- 4) 浦瀬太郎・山本和夫：下水処理におけるクロスフロー濾過に係わる諸因子の検討，衛生工学論文集，Vol.27，pp.55～64(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 第28巻 pp.113～123 (1992)。
- 6) 浦野紘平・中川信一：限外ろ過・精密ろ過の理論とその問題点，用水と排水 Vol.32 No.6，pp.3～10 (1990)。