

# 平膜による活性汚泥懸濁液の浸漬型濾過において曝気量及び膜間距離が汚泥堆積過程に及ぼす影響

尾崎則篤<sup>1</sup>・山本和夫<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 広島大学工学部助手 第四類(建設系) (〒739 広島県東広島市鏡山1-4-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 東京大学教授 環境安全研究センター(〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

平膜を用いた活性汚泥懸濁液の浸漬型濾過において平膜の配置、曝気量、汚泥濃度が汚泥堆積過程に及ぼす影響を調べた。汚泥堆積過程を記述する因子として、平衡汚泥堆積量、汚泥堆積速度、汚泥堆積開始時間という因子を抽出し、各々がどのような操作因子に依存するかを調べた。平衡汚泥堆積量及び汚泥堆積速度は主に膜面のせん断力に、汚泥堆積開始時間は膜間距離、曝気量、汚泥濃度いずれにも依存することを示した。また汚泥堆積開始時間に関して乱れ強度、粘性底層との関連に関する考察も行った。

**Key Words :** membrane separation, flat sheet membrane, sludge accumulation process, aeration intensity, distribution of membranes, shear force

## 1. はじめに

膜分離技術を用いた下廃水処理法は様々な方向から導入が検討され、開発、適用が進められている。日本におけるビル中水、屎尿処理への膜分離技術の適用はその成果といえる。

膜分離活性汚泥法は通常の活性汚泥法と比較して汚泥の沈降性によらない固液分離が可能であり、維持管理が容易な方法となる。

現在、より効率的な濾過方法を確立するため、様々な膜モジュールの開発、検討がおこなわれている。膜モジュールとしては中空糸膜<sup>1),2)</sup>、平膜<sup>3)</sup>、管状膜<sup>4)</sup>いずれかを基本としたモジュールが開発され、実廃水に対する長期運転などでその実用性が検討されている<sup>4)-7)</sup>。

また運転条件が濾過フラックスに与える影響も調べられている。フラックスの低下を抑制するには曝気による乱れを効率よく膜面に与え汚泥の堆積を避けることが重要であり、その為の基礎的検討として、曝気強度とクロスフロー流速や乱れ強度との関係が調べられている<sup>8),9)</sup>。また、間欠濾過によってフラックスの低下を抑制させられることが知られており<sup>10)</sup>、適切な間欠プロセスの検討などもおこなわれて

いる<sup>6)</sup>。

中でも、膜モジュールを直接反応槽に浸漬させ濾過をおこなう浸漬型膜分離活性汚泥法は現在開発が進みつつある分野である。浸漬型膜分離活性汚泥法では曝気が膜面への汚泥の堆積を抑制する役割を兼ね、また、外圧型の濾過と異なり高压運転の必要がなく、これら二つの面から、従来用いられているクロスフロー式の外圧型の濾過と比較して運転エネルギーを抑制することが可能な方法であると考えられている<sup>11)</sup>。

より高い運転効率を持った膜モジュールを設計するには、汚泥の堆積を避けつつどのように膜モジュールをコンパクトにしていくのかについて考えねばならない。その為には膜モジュールをより密に配することによって、汚泥堆積がどのように影響を受けるのかを調べ、それがどのような水理学的状況の変化によるものかを詳細に調べる必要がある。

筆者らは前報<sup>10)</sup>において中空糸膜による外圧式の濾過において汚泥の堆積過程を調べ、膜面に及ぼす剪断力や汚泥の挙動がどのように汚泥の堆積過程に影響を及ぼしているかを調べた。

本研究では、構造が単純で取扱が容易な平膜モジュールに注目した。平膜は中空糸膜と比べてモジュール容積あたりの濾過表面積を上げることが困

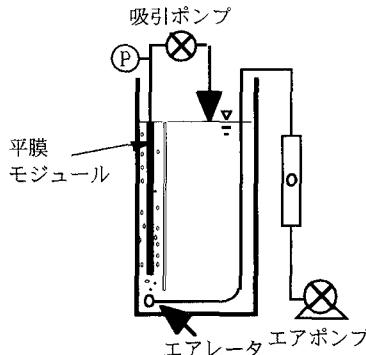


図-1 浸漬型平膜実験装置

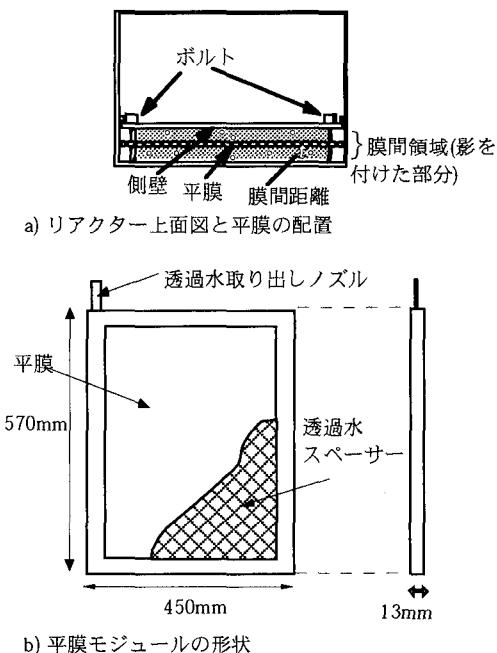


図-2 リアクター中の平膜の配置と平膜の形状

難であるが、形状が単純でありバルク側の流動状況を制御しやすい、高濃度懸濁液の濾過においては汚泥堆積を防ぐことが重要であり、その点で平膜モジュールは有利な構造を持っていると考えられる。

平膜を用いた浸漬型の濾過において汚泥堆積に影響を及ぼす水理学的な運転条件に注目すると曝気強度、膜間距離、膜の深さ、気泡径などが考えられる。そこで本研究においては、エネルギー的、容積的な効率を考えた場合、これらの条件の中で曝気強度、膜間距離がもっとも主要な影響を持つと考え、この2つの条件の変化が汚泥堆積に及ぼす影響を詳細に調べた。そして更にそれに基づき汚泥の堆積に影響を及ぼす水理学的な因子に関する解析をおこなった。この解析によって見出された因子は、より一般的な解析に対しても有効なものになると考えられ

る。

## 2. 濾過実験

### (1) 実験方法

実験に用いた平膜モジュールは日東電工社製の精密濾過膜で、材質はポリオレフィン系、分画径は $0.4\mu\text{m}$ (ラテックス球93%除去)である。平膜モジュールのサイズは $450 \times 570 \times 13\text{mm}$ 、有効膜面積は $0.3\text{m}^2$ である。

濾過実験装置の概略を図-1に示す。エアレーションタンクのサイズは $460 \times 230 \times 1100\text{ mm}$ であり、膜モジュールを図-1に示したように直接浸漬し、平膜モジュールの直下に散気装置を設置する。気泡の上昇流が濾過中の膜面へ堆積した汚泥を剥離する。

エアレーションタンクの上面図及び平膜エレメントの構造の概要を図-2に示す。膜モジュールは側壁及びボルトによってその隙間の中央に固定され、その隙間の全域(膜間領域)を均一に気泡が上昇する。散気装置としては、微細な気泡を発生させる市販のエアレータを用いた。気泡半径は写真撮影により測定し、平均気泡径 $2\text{mm}$ を得た。平膜は、実処理においては複数枚配置して濾過をおこなうが、本研究では2枚の支持板に囲まれた領域に固定された平膜を平膜モジュールの基礎単位と見なした。両面が平膜に囲まれている状態と比較すると、その水理学的状況が異なる可能性もあるが、本研究の範囲では汚泥が多く堆積した状態であっても膜間距離と比較して汚泥堆積層の厚さは薄く( $\text{数}\mu\text{m}$ 程度)膜間領域に及ぼす影響は小さいと考えられる。また、上昇流速に対する透過流束の大きさの比は数万分の1程度であり、片面の透過流束の有無がもう片面近傍の水理学的状況に及ぼす影響も、非常に小さいと考えられる。

平膜の配置の指標として、平膜から側壁までの距離を「膜間距離」として定義した(図-2参照)。また、曝気の強さの指標に(曝気量/流路断面積)を「曝気線速度」として定義した。

活性汚泥懸濁液はグルコース、ペプトンを中心とした基質を用いて実験室内で馴致した。Fill and drawによって図-1に示した反応槽で培養し汚泥滞留時間は40日に保った。濾過実験期間中も継続的に培養した。濾過水は反応槽に戻しており、濾過そのものが汚泥の性状に大きな影響を与えることはないと考えられる。水温は $20^\circ\text{C}$ とした。活性汚泥懸濁液の性状の指標として、MLSSの他に懸濁液の粘度、汚泥フロックの粒径分布を測定した。粘度は振動式粘度計(秩父セメント社製、CJV-1000)を、粒径分布は粒度分

布測定装置(堀場製作所製、CAPA-3000)によって測定した。

また基質の汚泥に対する負荷の指標として、汚泥負荷 $F[\text{kgC} \cdot \text{kgMLSS}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}]$ を、以下の式で定義した。

$$F = \frac{C_F}{C} \quad (1)$$

ここで $C_F$ :基質容積負荷 $[\text{kgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}]$ 、 $C$ :MLSS $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ である。

汚泥堆積に影響を与える因子としては本研究で着目している水理学的な因子の他に汚泥の微生物学的な性状(細胞外ポリマーの存在量や溶存有機物量など)がある。本研究では活性汚泥を長期にわたって培養、馴致し、実験期間を通してはそれらの値が一定の値をもつようにして、それら微生物学的な影響が実験結果にばらつきや傾向としてあらわれないようにした。MLSSや粘度、汚泥フロックの粒径分布、汚泥負荷などは実験期間を通して比較的一定であり(実験結果の項で後述)、本実験においては汚泥の性状の違いが実験毎の汚泥堆積過程の違いに本質的な影響を与えていることはないと考えられる。

一回の実験期間は約1日、実験毎に曝気線速度または膜間距離をかえておこなった。

濾過及び曝気は実験期間中連続しておこなった。濾過水はローラーポンプを用いて吸引し、ローラーポンプの回転数を手動で調整することによって、濾過初期においてはフラックス $0.6 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 、濾過終期においても最低でも $0.3 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上に保った。濾過水は再びエアレーションタンクに戻した。

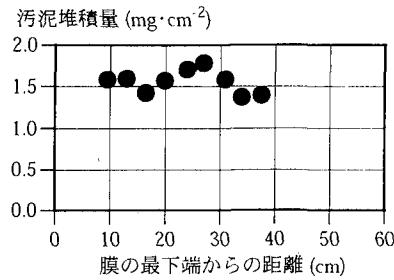
一つの膜に関しては、5~10回程度繰り返し使用した。濾過終了する毎に水道水を用いてスポンジ洗浄をおこない再利用した。濾過初期の抵抗が新膜と比較して2倍程度になる頃を目安に新しい膜に交換した。

濾過抵抗はフラックスと膜間差圧及び濾過抵抗の間に成立する以下の関係から求めた。

$$R = \frac{\Delta P}{\mu J} \quad (2)$$

ここで $J$ :フラックス $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ 、 $\Delta P$ :膜間差圧 $[\text{Pa}]$ 、 $R$ :濾過抵抗 $[\text{m}^{-1}]$ 、 $\mu$ :粘性係数 $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$ である。

また汚泥堆積過程を知ることを目的として濾過中の汚泥堆積量を測定した。測定に際しては濾過を一時中断し膜モジュールを取り出し、膜面の一部をふき取りその湿潤重量を測定した。一回の測定にふき取った面積は $75 \text{ cm}^2$ 、有効膜面積全体の40分の1である。一つの濾過実験での測定回数は5~7回、有効膜面積全体に対するふき取った総面積の割合は約6分の1である。濾過のごく初期と、濾過終了時におけるふき取りが濾



(濾過時間20時間、膜間距離1.0cm、曝気線速度 $0.007 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

図-3 汚泥堆積量分布の例

過に及ぼす影響は大きくないと考えられ、それ以外の、濾過に大きな影響を与えると考えられる濾過中期(5~15時間程度)における汚泥のふき取り作業は3回程度、その有効膜面積に対する割合は1割以下であり、ふき取ることによって濾過に及ぼす影響は小さいと考えられる。

## (2) 結果と考察

### a) 懸濁液の性状

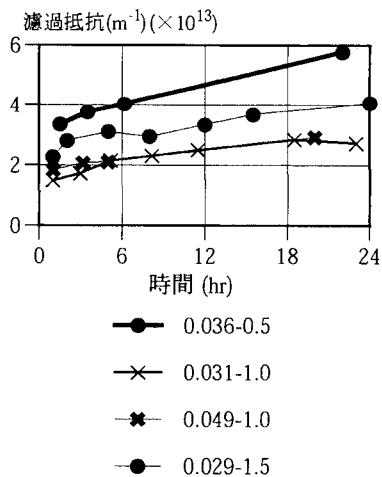
まず懸濁液の性状について述べる。MLSSは $0.8\sim1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、汚泥フロックのサイズは直径 $1 \times 10^2 \mu \text{m}$ (体積ベースによる粒径分布中央値)、懸濁液の粘性は同水温の純水と比較して1割程度高かった。汚泥負荷は平均 $3.4 \times 10^{-2} [\text{kgC} \cdot \text{kgMLSS}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}]$ であった。実験を通してこれらの値はおおむね一定であった。

### b) 汚泥堆積過程

まず、汚泥堆積量の、曝気流の流れ方向に沿った分布について述べる。図-3に、濾過終了後に曝気流の流れ方向に沿って汚泥堆積量を測定した結果例を示す。測定値のばらつきは2割程度であり、また、流下方向に沿って堆積量が変化することはなく、一様に堆積していることが分かる。そこで以降は汚泥堆積量は膜面に一様に生じているとし、単位膜面積当たりの汚泥堆積量を示すこととする。

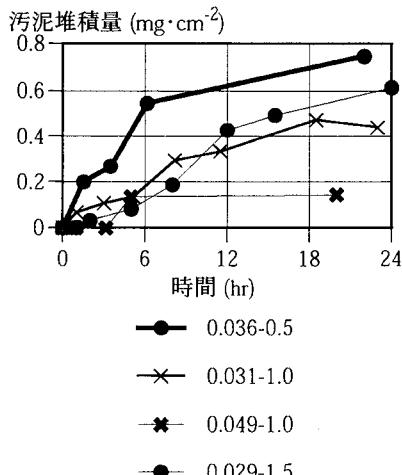
曝気線速度は $0.01\sim0.06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、膜間距離は $0.5, 1.0, 1.5 \text{ cm}$ にかえて各々の条件下で濾過実験をおこなった。

図-4に濾過抵抗の、図-5に汚泥堆積量の経時変化を示した。汚泥堆積量が多いほど濾過抵抗は大きいようである。汚泥堆積量と抵抗との関係を直接見るために、濾過終了時の汚泥堆積量と濾過開始1時間後の汚泥堆積量との差を「濾過後汚泥堆積量」、縦軸に濾過終了時の濾過抵抗と濾過開始1時間後の濾過抵抗と



数字は曝気線速度( $m \cdot s^{-1}$ )・膜間距離(cm)

図-4 濾過抵抗の経時変化の例



数字は曝気線速度( $m \cdot s^{-1}$ )・膜間距離(cm)

図-5 汚泥堆積量の経時変化の例

の差を「濾過後汚泥堆積層抵抗」とし、図-6に濾過後汚泥堆積量と濾過後汚泥堆積開始時間との関係を示した。濾過初期の値として、濾過開始直後の測定値を用いず濾過開始1時間後の値を用いたのは、濾過開始直後の場合、僅かな測定時間の違いの影響を受けやすいこと、また運転が安定していない可能性があると考えたためである。

図-6を見ると汚泥堆積量が多いモジュールほど濾過抵抗も大きいということが分かる。

汚泥堆積量に影響を与える因子について考察する。

図-5をみると汚泥堆積量は濾過開始後、直線的

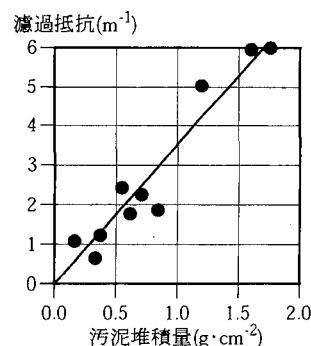


図-6 濾過後汚泥堆積量と濾過後汚泥堆積層抵抗

汚泥堆積量( $mg \cdot cm^{-2}$ )

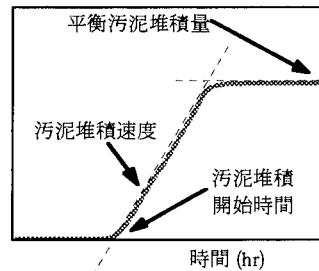


図-7 汚泥堆積過程の考え方

に上昇をし、そののち次第に増加が緩やかになるという傾向を見出すことが出来る。また、初期の汚泥堆積量が増加する期間の増加率を詳細に見ると、汚泥堆積は濾過開始直後から一定の割合で生じているわけではなく、ごく初期の時期には汚泥の堆積量の増加率が少なく、その後直線的に上昇し始めるという傾向を見ることが出来る。実際、汚泥堆積量の測定毎にモジュールを取り出した目視によつても、濾過初期には殆ど汚泥の堆積が見られないのに、ある時間を経過した後に汚泥の堆積が生じはじめるという事象を観察した。

そこで汚泥堆積は以下のようないプロセスで生じていると考えた。濾過初期においては、濾過を継続することによって表面の何らかの性状の変化が生じて、汚泥堆積が生じやすくなり直線的に汚泥堆積量が増加する。汚泥堆積量がある程度まで増加すると汚泥堆積を抑制する効果(剥離など)が大きくなり、付着と剥離の均衡により汚泥堆積が平衡に至る。図-7にその考え方を示した。

そこで平衡汚泥堆積量、堆積量が直線的に増加している時期の汚泥堆積速度、そして濾過初期の汚泥堆積開始の遅れのという、3つの因子に関して各々考察をおこなった。

まず、平衡汚泥堆積量に関して考察する。平衡汚泥堆積量は濾過開始後20時間の汚泥堆積量とする。

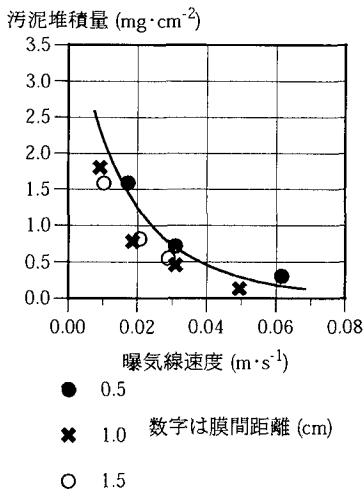


図-8 平衡汚泥堆積量

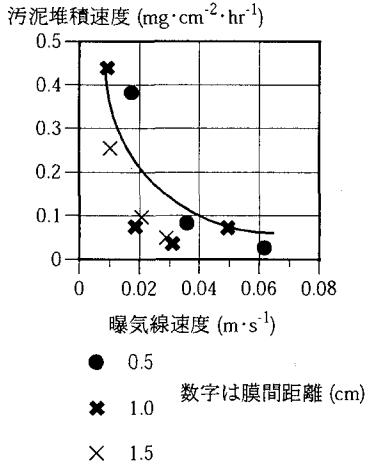


図-9 汚泥堆積速度

20時間目に測定値がない場合は、20時間目を挟む時間帯の2つの汚泥堆積量を用いて直線補間した。図-8にその結果を示す。曝気線速度が上昇するに従って平衡汚泥堆積量が減少しているのがわかる。また、曝気線速度が等しければ平衡汚泥堆積量もほぼ等しい。曝気線速度の大小で平衡汚泥堆積量が決まっているのが分かる。

汚泥堆積速度について考察する。汚泥堆積速度は汚泥堆積が直線的に、大きく増加している時期のプロットを用いて直線回帰した。原則的には最も堆積速度の大きい区間と、その前後1区間ずつを推定に用いた。

図-9に曝気線速度との関係を示した。曝気線速度が増加するに従ってゆるやかに減少している。平衡汚泥堆積量と同様に曝気線速度が等しければ汚泥堆積速度もほぼ等しくなることが分かる。

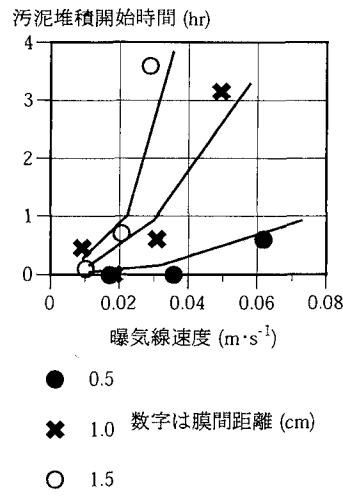


図-10 汚泥堆積開始時間

平衡汚泥堆積量と比較すると、ややばらつきが大きいが同様の傾向を持っていることが分かる。

濾過初期における汚泥堆積開始の遅れについて考察する。汚泥堆積開始の遅れに関しては、汚泥堆積速度の計算の際推定に用いた直線の横軸(時間軸)の切片の値を汚泥堆積開始時間として定義し、その指標とした。

曝気線速度と汚泥堆積開始時間との関係を図-10に示した。直線の切片が0より小さい場合は、汚泥堆積開始時間は0とした(切片の計算値は0よりも大幅に小さくなることはなかった)。

曝気線速度が上昇するに従って汚泥堆積開始時間は大きくなっている。しかし、その上昇率は膜間距離によって異なっている。異なる膜間距離同士で比較すると、膜間距離0.5cm, 1.0cm, 1.5cmの順に汚泥堆積開始時間の値は大きくなっている。曝気線速度が等しくとも膜間距離が短い方が汚泥堆積開始時間は小さくなるという傾向が得られた。これは、平衡汚泥堆積量、汚泥堆積速度とは異なる傾向であり、これらとは現象を支配する因子に異なるものがあることを意味している。

### c) 異なるMLSS条件下における濾過実験結果

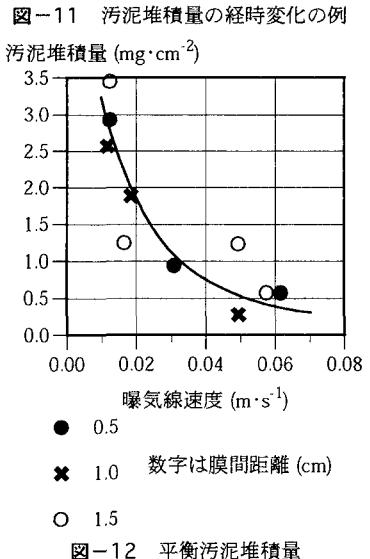
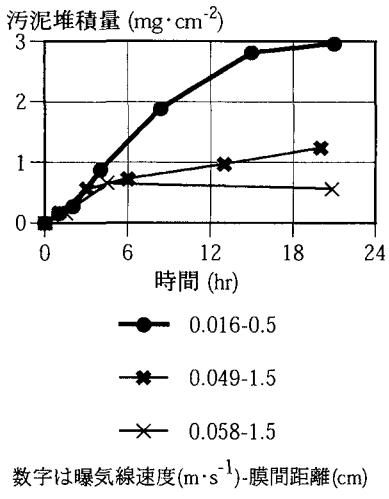
汚泥濃度の影響を調べるために懸濁液の濃度をより高くして濾過実験をおこなった。

用いた懸濁液の濃度はMLSSは $4.1\sim5.7\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、前節の実験条件の5倍程度である。

汚泥負荷は $5.3\times10^{-2}[\text{kgC}\cdot\text{kgMLSS}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}]$ であった。

汚泥堆積量の経時変化を図-11に示す。

経時変化のデータに基づき、曝気線速度の平衡汚泥堆積量に及ぼす影響を図-12に、汚泥堆積速度に



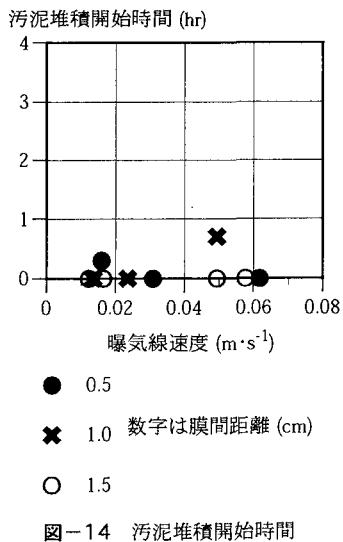
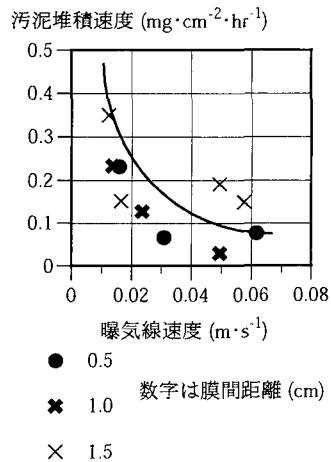
及ぼす影響を図-13に、汚泥堆積開始時間に及ぼす影響を図-14に計算し示した。

図-11、12を見るとMLSS0.8~1.2kg·m⁻³の場合(図-8、9)と同様に曝気線速度が等しければ平衡汚泥堆積量、汚泥堆積速度ともにもほぼ等しく、曝気線速度の大小でこれらの値が決まっているのが分かる。また、MLSSが異なっていても値に大きな差はないようである。

一方、汚泥堆積開始時間はMLSS0.8~1.2kg·m⁻³の場合(図-10)と異なり殆ど0であり、濾過開始直後から汚泥堆積が生じていることがわかる。

### 3. 汚泥堆積過程に影響を与える因子

次に、前節の実験に基づいて汚泥堆積過程に影響



を与える因子について考察することを目的として膜面近傍の流動状況を調べた。濾過実験に用いたエアレーションタンクと同じ形状のエアレーションタンクを用意し、水道水を用いて曝気の際の流動状況を調べた。そして、そのデータに基づき、汚泥の堆積過程に最も影響を与えると考えられる、膜面に及ぼすせん断力を計算した。

清水と活性汚泥ではその水理学的性質が異なるが、本実験条件の範囲では活性汚泥の粘性は同じ温度の清水と比較して高々1割程度増加していたに過ぎず、粘性の違いによる水理学的状況の差は大きくはないと考えられる。

#### (1) 実験方法

測定項目は気泡の上昇速度及び膜間領域(側壁及びリアクター壁面に閉まれた平膜を内に含む領域、図

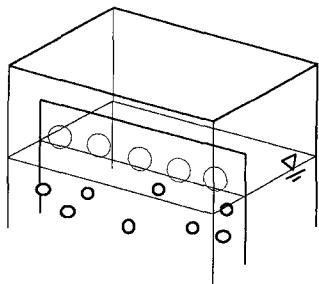


図-15 循環流の越流部  
上昇速度 ( $m \cdot s^{-1}$ )

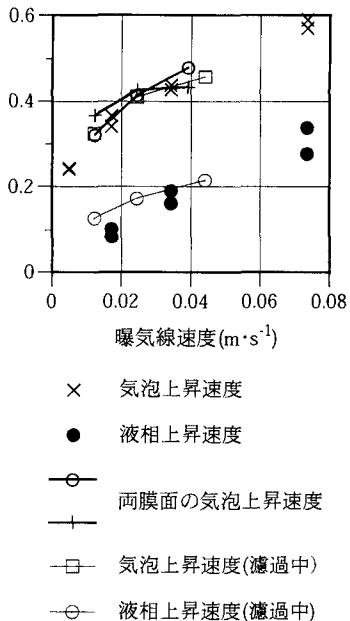


図-16 水と気泡の上昇速度の例（膜間距離：1.0cm）

-2参照)の水の循環量である。

気泡の上昇速度は外からストップウォッチを用いて測定した。

水の循環量の測定の際は、仕切り板の上部に堰を設置し、そこを越流する水量をメスシリンダー及びストップウォッチを用いて測定した(図-15参照)。

これらの測定値に基づいてボイド率、気泡及び液相の上昇速度を計算した。

ボイド率は流路断面積のうち気泡の占める割合であって以下のように計算される。

$$\alpha = \frac{V_b}{v_b} \quad (3)$$

ただし、 $\alpha$ :ボイド率[-],  $v_b$ :気泡の上昇速度 [ $m \cdot s^{-1}$ ],  $V_b$ :曝気線速度 [ $m \cdot s^{-1}$ ]である。

また、液相の上昇速度は以下のように計算される。

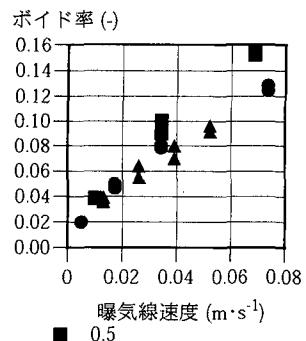


図-17 ボイド率

$$v_i = (1 - \alpha) \left( \frac{Q_i}{A} \right) \quad (4)$$

ただし、 $v_i$ :液相の上昇速度 [ $m \cdot s^{-1}$ ],  $Q_i$ :液相の循環量 [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ],  $A$ :流路断面積 [ $m^2$ ]である。 $(Q_i/A)$ は液相の見かけ速度 [ $m \cdot s^{-1}$ ]である。)

## (2) 流動状況の観察及び測定結果

曝気中、その様子を壁面から観察したところ、流動様式は気泡流であった。また、写真撮影をしたところ、気泡径も殆ど変わることなく、また、大きな気泡の形成なども殆どみられなかった。

図-16に気泡及び水の上昇速度の結果例を示す。

また図-17にボイド率を示した。ボイド率は曝気線速度の上昇とともに直線的に増加しており膜間距離による違いはない。

## (3) 膜面のせん断力

汚泥の堆積状況に影響を与える最も重要な因子としては膜面に及ぼすせん断力が考えられる。そこで気液の上昇速度の測定に基づいて膜面に及ぼすせん断力を計算した。

気液2相流におけるせん断力の計算には、以下に示すAkitaら<sup>11)</sup>の実験式を用いた。この実験式は円管中の気泡の上昇流の測定に基づいて導出しており、本実験とはその点で条件が異なるが、岸野<sup>9)</sup>らがAkitaらの実験式に基づき平膜間の気泡の上昇流の流速の測定値との比較をおこない良好な一致を見せており、本実験条件にも適用可能であると考えられる。

Akita<sup>9)</sup>によると、壁面の影響による圧力損失は $\Delta P$ は以下のように表される。

$$\Delta P = \frac{4fr \cdot \rho \cdot x}{D} \left( \frac{U}{1 - \alpha} \right)^2 \quad (5)$$

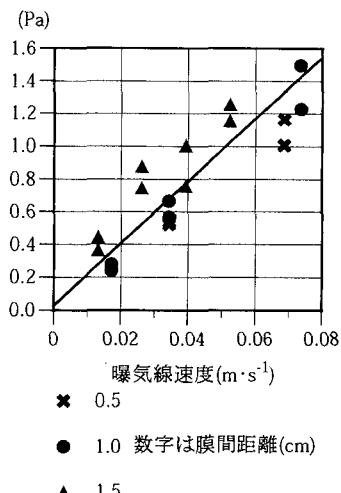


図-18 膜間距離と膜面のせん断力

$U$ : 水の見かけ流速 [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $D$ : 膜間距離 [m],  $\rho$ : 水の密度 [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $x$ : 深さ [m] である。  
また  $f_f$  は次のように与えられる。

$$f_f = 0.0468 \left( U / \sqrt{2Dg} \right)^{-1.1} \alpha^{0.5} \quad (6)$$

これらより、せん断力は圧力損失を用いて以下のように表される。

$$\tau = 2D \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad (7)$$

式(5)~(7)からせん断力を計算した結果を図-18に示した。

曝気線速度の上昇に応じてせん断力は上昇しており、また、膜間距離が異なっていても、曝気線速度が等しければせん断力に大きな違いがないことが分かる。

そこでこれらの実験に基づき膜面せん断力が汚泥堆積過程に及ぼす影響について考察する。

#### (4) 平衡汚泥堆積量

平衡汚泥堆積量を見ると(図-8参照)堆積量は曝気線速度に大きく依存しており、これは膜面せん断力と共に通する傾向である。平衡に達したときは、堆積汚泥の剥離のしやすさとせん断力とのバランスによってその平衡が保たれていると考えられる。

そこで、Akitaらの値を用いて曝気線速度と膜面のせん断力との関係を推定し(図-18の実線)、膜面のせん断力と平衡汚泥堆積量との関係を示した。せん断力と汚泥堆積量は反比例の関係にあるとし、図-19にせん断力の逆数と汚泥堆積量との関係を示し

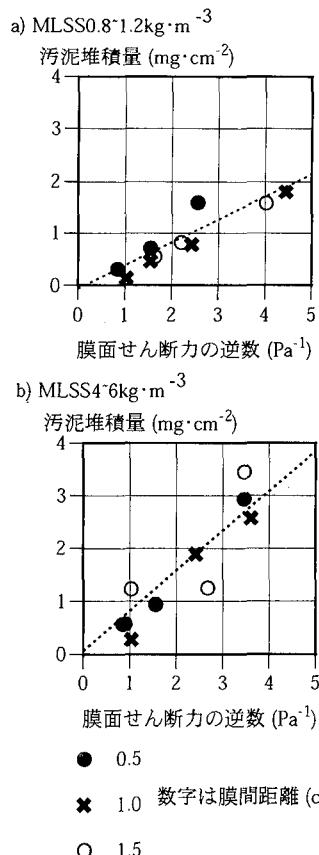


図-19 膜面せん断力と平衡汚泥堆積量

た。グラフはいずれの濃度においても直線的な関係を示しており、せん断力と汚泥堆積量は反比例の関係にあるといえる。

濃度による違いに関して見ると、MLSSは4.1~5.7 kg·m⁻³の方が、MLSS 0.8~1.2 kg·m⁻³の場合より2倍弱程度堆積量が多いが、濃度が5倍異なっていることを考えると堆積量の差はそれほど大きくはない。濃度依存性は少ないと考えられる。

#### (5) 汚泥堆積速度

汚泥堆積速度も、曝気線速度の上昇に応じて減少しており、また膜間距離に対する依存性は弱く、平衡汚泥堆積量と同様の傾向を持っている。また、濃度による違いも見られない。平衡汚泥堆積量と比較してややデータのばらつきが大きいため詳細な比較は困難であるが、本実験の範囲では平衡汚泥堆積量と共に通する傾向を持っていると考えられる。

#### (6) 汚泥堆積開始時間

汚泥堆積開始時間について考察する。汚泥堆積開始時間は膜間距離に強く依存している。また曝気線

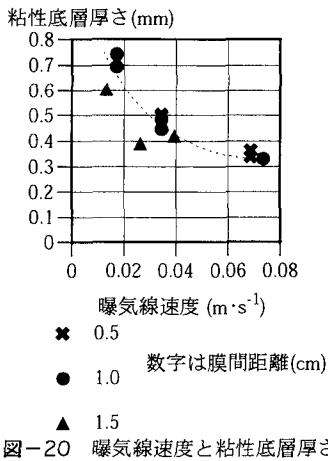


図-20 曝氣線速度と粘性底層厚さ

速度の上昇に応じて上昇する傾向も持つておらず、膜面のせん断力も原因として強く関与していると考えられる。しかし、膜間距離によって値が異なることは、膜面せん断力では説明できない。更に別の水理学的な因子が汚泥堆積開始時間に影響を与えていていると考えられる。

そこで、膜面近傍における水理学的状況を表すものとして、更に、粘性底層厚さの違いが膜間距離依存性の原因になっているのではないかと考え、粘性底層厚さとの関連について考察した。

粘性底層厚さの評価には以下の式を用いた<sup>12)</sup>。

$$\delta = 11.6 \frac{\nu}{u_*} \quad (8)$$

ただし  $\nu$ :液相動粘性係数 [m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>]、 $u_*$ :摩擦速度 ( $= (\tau_w / \rho)^{1/2}$ ) [m·s<sup>-1</sup>]である。

式(8)は単相の場合の粘性底層の評価式であるが、壁面のごく近傍はボイド率が低く<sup>13)</sup>単相流に近いと考え本式を適用し粘性底層厚さを評価する。 $\tau_w$ としてはAkitaらの計算結果(図-18)を用いた。

図-20にその結果を示す。粘性底層厚さは0.8~0.3mm程度であり曝氣線速度が小さい部分以外の部分では変化は緩やかである。また、膜間距離が異なることによる際だった違いも見られない。

膜間領域の流動状況が汚泥堆積開始時間に対して影響を与えているのではないかと考え、膜面の流動状況を強く支配していると考えられる2つの因子、膜面せん断力及び粘性底層厚さと、汚泥堆積開始時間の膜間距離依存性との関連について考察した。

しかしせん断力、粘性底層厚さいずれも曝氣線速度が等しければ膜間距離には大きく依存しないという結果を得た。

膜面せん断力、粘性底層厚さいずれも、膜間距離

が異なることにより汚泥堆積開始時間が異なるということを説明するには十分ではないと考えられる。

そこで、粘性底層以外の領域との関連について考察する。汚泥の堆積状況に直接影響を与えるのは膜面近傍の水理学的状況であると考えられる。しかし一方、因子によっては、膜面近傍の状況のみではなく、膜面近傍とその外側の因子との関わりが重要な場合もあると考えられる。

すなわち膜間距離が異なった場合、粘性底層を除いた外部領域の幅は大きく異なってくると考えられる。本研究の場合膜間距離が0.5cmから1.5cmまで変われば外部領域の幅は少なくとも3倍以上異なっている筈である。すると外部領域における水理が一定であるとしても、汚泥フロックにとっては粘性底層に対する関与の度合いが相当異なってくると考えられる。

図-10を見ると汚泥堆積開始時間は曝氣線速度の上昇に応じて長くなっています。また、濃度が高くなると、汚泥堆積開始時間が短くなっています(本実験条件では殆ど0となつた)。このことから、濃度依存性に関しては、汚泥フロックのパルク中の存在そのものが汚泥堆積開始時間の決定に関与しており、汚泥堆積開始時間を決定している主因は汚泥フロックの膜面に対する付着と剥離のつり合いであると考えられる。しかしその比例係数は膜間距離によって大きく異なっており、その差は汚泥フロックが外部領域をどれほど自由に移動できるかによって決まっているのではないかと考えられる。フロックの膜面に向かう方向の移動の幅に対して、外部領域が相対的に狭くなれば、フロックが粘性底層に突入する頻度が上昇する。そして粘性底層内の運動量の減少によりフロックが膜面に付着しやすくなり、それが汚泥堆積開始時間の減少に関与しており、そのため膜間距離が狭くなると汚泥堆積開始時間が短くなるのではないかと考えられる。

そこで汚泥堆積開始時間を決定する因子について以下のように仮定した：(1)汚泥堆積開始時間は膜面のせん断力と、フロックの膜に対する付着力との比、(2)及び、外部領域と液相の流れの乱れ強度に対する比に依存する。液相の流れの乱れ強度とは即ち汚泥フロックの運動における膜面に向かう方向の乱れ強度であり、それと外部領域との比というのは、汚泥フロックの運動が壁面の存在によってどの程度制限されるかを表している。

これに基づき汚泥堆積開始時間  $T_s$  を、(2)に示される粒子の移動と関連づけられた因子を用いて無次元化し、付着に関連する無次元化された因子(1)との関連を、以下に示す式によって表した。

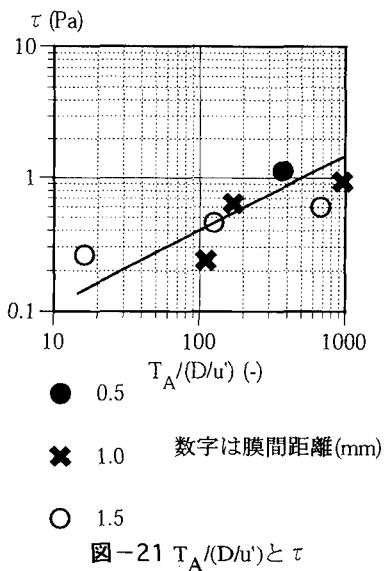


図-21  $T_A/(D/u')$ と  $\tau$

$$T_A \left/ \left( \frac{D - 2\delta}{u'} \right) \right. = k_s \cdot \left( \frac{\tau}{f_{pm}} \right)^n = \left( \frac{k_s}{f_{pm}^n} \right) \cdot \tau^n \quad (9)$$

ここに  $T_A$  : 汚泥堆積開始時間[s],  $\tau$  [Pa] : 膜面せん断応力[Pa],  $D$  : 膜間距離[m],  $\delta$  : 粘性底層厚さ[m],  $u'$  : 液相の乱れ強度[m·s<sup>-1</sup>],  $f_{pm}$  : 汚泥の膜に対する付着力[Pa],  $k_s$  : 定数[-]である。ここでは  $f_{pm}$  の値は不明であるが、汚泥の性状と、膜面のごく近傍の膜方向への流速、すなわちフラックスによって決まると考えると、本実験条件を通して一定値を持つと考えられる。この汚泥の膜に対する付着力に関しては、Surface transporation model<sup>[14]-[16]</sup>による「膜面に引き寄せられる力」と類比することができる。このモデルによると、クロスフロー流中における懸濁質の濾過においては、フランクスが膜面に引き寄せられる力が決め、クロスフロー流速によるせん断力が剥離の力を決めるとしている。

粘性底層厚さは図-20より0.3~0.8mm程度と推測された。汚泥堆積開始時間がある程度大きな値を持つ曝気線速度0.04m·s<sup>-1</sup>以上では粘性底層厚さは0.4mm程度であり膜間距離が最低でも5mmあることと比較するとその値は大きなものではない。また実際には粘性底層近傍でも完全に単相流であるとは考えられず、気泡の影響によって粘性底層はこれよりも更に小さいと考えられる。そこでここでは  $\delta=0$  として計算する。

液相の乱れ強度に関しては、Theofanous<sup>[17]</sup>らによって求められた、以下に示す垂直円管の気泡流の中心部の乱れ強度に関する関係式があるのでそれを用いた。

$$k^2 = \left( \frac{u_c'}{u_{cm}'} \right)^2 = (1 - \alpha)^2 + \frac{4\alpha(1 - \alpha)}{u_{cm}'^2} \left( 1 - \frac{\rho_g}{\rho_L} \right) Dg \quad (10)$$

$k$  : 2相流と単相流の乱れ強度の比、 $u_c'$  : 液相の乱れ強度[m·s<sup>-1</sup>]、 $u_{cm}'$  : 同じ液相流速をもつ単相流の乱れ強度[m·s<sup>-1</sup>]、 $\rho_g$  : 空気の密度[kg·m<sup>-3</sup>]、 $\rho_L$  : 空気の密度[kg·m<sup>-3</sup>]、 $g$  : 重力加速度[m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>]、 $D$  : 膜間距離[m]である。単相流の乱れ強度はLaufer<sup>[18]</sup>による実験結果から定めた。

本実験は2平板間に囲まれた気泡上昇流であり、垂直円管とは実験条件が異なる。しかし、岸野ら<sup>[8]</sup>は垂直円管によって得られた実験式を平膜間の気液の上昇流速の実験値へあてはめ、良好な一致を見ており、このことから、垂直円管と2平板間の気泡流の水理学的状況が大きく異なることはなく、垂直円管によって得られた乱れ強度の実験結果を本実験のような平膜間の実験に当てはめることもある程度可能であると考えられる。

ここで図-21に  $T_A/(D/u')$  と  $\tau$  との関係を示した。膜間距離に依らず一定の関係を持っており、汚泥堆積開始時間に関しては、式(9)を用いて解釈をすることが可能であるといえる。

#### 4. 結論

平膜を用いた活性汚泥懸濁液の浸漬型濾過において、膜表面の汚泥の堆積過程に影響を与える水理学的な因子に関する解析を行った。膜間距離、曝気強度、汚泥濃度を変えて濾過実験を行い汚泥堆積過程を調べ、平衡汚泥堆積量、汚泥堆積速度、汚泥堆積開始時間という3つの因子を見出し、それらに関して以下の知見を得た。

(1) 平衡汚泥堆積量及び汚泥堆積速度は曝気線速度と負の相関を持つ。

(2) また、平衡汚泥堆積量及び汚泥堆積速度は膜間距離が異なっていても曝気線速度が等しければ概ね等しく、膜間距離に対する依存性は見出されなかつた。

(3) 平衡汚泥堆積量は汚泥濃度が増加すると若干増加した。汚泥堆積速度は本実験の範囲では汚泥濃度に対する依存性は見られなかった。

(4) 汚泥堆積開始時間は膜間距離、曝気線速度、汚泥濃度のいずれにも依存する。

そこで、膜間領域の流動状況を清水実験に基づいて調べ、これらの項目と照らし合わせることで更に以下の知見を得た。

(5) 平衡汚泥堆積量の曝気線速度依存性は、膜面せん断力への依存性によって説明された。

(6) 汚泥堆積開始時間は曝気線速度だけでなく、膜間距離にも依存する。すなわち、膜面せん断力以外の因子にも依存する。

そこで、汚泥堆積開始時間が膜間距離に依存するのは、フロックの膜面に向かう方向の運動に対して膜間距離が相対的に短くなりフロックの膜面への接触機会が増加し、そのため汚泥堆積開始時間が短くなると考え、式(9)によって整理し、膜間距離によらない一定の関係が見出された。

フロックの移動における自由度が小さいということはフロックが粘性底層に突入しやすいということであり、そのため粘性底層で運動量を喪失する可能性が高くなり、それにより、フロックが膜面に対して付着しやすくなるためではないかと推測された。

## 参考文献

- 1) Yamamoto, K., Hiasa, M., Mahmood, T. and Matsuo, T.: Direct solid-liquid separation using hollow fiber membrane in an activated sludge aeration tank, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 21, pp. 43-54, 1989.
- 2) 上原勝：ステラボアLによる高汚濁水直接濾過、膜、Vol. 20, No. 1, pp. 87-89, 1995.
- 3) 大熊那夫紀、奥野裕、青井透、真柄泰基：屎尿処理に用いた回転平膜装置の処理特性、第30回環境工学研究フォーラム講演集、pp.19-21, 1993.
- 4) 山本康次、奥村早代子、松田恒男、鳴上善久、吉崎健：浸漬型セラミック膜を用いた生活排水処理と膜汚染、膜、Vol. 21, No. 3, pp. 205-213, 1996.
- 5) 青井透：サイフォン式浸漬平膜装置の合併処理施設での長期処理実験、第32回環境工学研究フォーラム講演集、pp. 21-23, 1995.
- 6) 荒井一仁、長岡裕：直接浸漬型膜分離活性汚泥法におけるモジュール形態および吸引サイクルの評価、水環境学会誌、Vol. 18, No. 4, pp. 324-331, 1995.
- 7) Chiemchaisri, C. and Yamamoto, K.: Performance of membrane separation bioreactor at various temperatures for domestic wastewater treatment, *J. Membrane Sci.*, Vol. 87, pp. 119-129, 1994.
- 8) 岸野宏、石田宏司、岩部秀樹、中野一郎、上坂太一：浸漬型有機平膜システムにおける供給空気量とクロスフロー流速との関係、第5回環境工学総合シンポジウム、95講演論文集、No. 95-23, pp. 258-261, 1995.
- 9) 二村修、大西敬之、荻野隆生：中空糸膜分離活性汚泥法のエアレーションに関する研究、第31回下水道研究発表会講演集、pp. 554-556, 1994.
- 10) 尾崎則篤、山本和夫：外圧型中空糸膜のクロスフロー濾過における汚泥堆積過程に関する研究、土木学会論文集 No.551/II-37, pp.123-134, 1996.
- 11) Akita, K., Okazaki, T. and Koyama, H.: Gas hold-ups and friction factors of gas-liquid two-phase flow in an air-lift bubble column, *J. Chem. Eng. Jpn.*, Vol. 21 No. 5, pp. 476-482, 1988.
- 12) 吉川秀夫：水理学、技法堂出版、pp. 127-128, 1976.
- 13) Wang, S. K., Lee, S. J., Jones Jr, O. C. and Lahey Jr, R. T.: D turbulence structure and phase distribution measurements in bubbly two-phase flows, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 13, no. 3., pp. 327-343, 1987.
- 14) Davis, R. H. and Birdsel, S. A.: Hydrodynamic model and experiments for crossflow microfiltration, *Chem. Eng. Commun.*, Vol. 49, pp. 217-234, 1987.
- 15) Lu, W. M. and Ju, S. C.: Selective particle deposition in crossflow filtration, *Sep. Sci. Tech.*, Vol. 24, pp. 512-540, 1989.
- 16) Stamatakis, K. and Tien, C.: A simple model of crossflow filtration based on particle adhesion, *AIChE J.*, Vol. 39, pp. 1293-1302, 1993.
- 17) Theofanous, T. G. and Sullivan, J.: Turbulence in two-phase dispersed flows, *J. Fluid Mech.*, Vol. 116, pp. 343-362, 1982.
- 18) Laufer, J., Investigation of turbulent flow in a two-dimensional channel, *NACA TN*. No. 2123, 1950.

(1996. 8. 4 受付)

EFFECTS OF AERATION INTENSITY AND DISTANCE BETWEEN  
MEMBRANES ON SLUDGE ACCUMULATION PROCESS IN THE SUCTION  
FILTRATION OF ACTIVATED SLUDGE SUSPENSION USING DIRECTLY  
IMMERSED FLAT SHEET MEMBRANES

Noriatsu OZAKI and Kazuo YAMAMOTO

Effects of aeration intensity and distance between membranes on sludge accumulation process in the suction filtration of activated sludge suspension was investigated using directly immersed flat sheet membranes. It was shown that sludge accumulation in steady state, rate of sludge accumulation and sludge accumulation starting time can describe the sludge accumulation process. And dependency of them on the experimental conditions was investigated. It was shown that sludge accumulation in steady state and rate of sludge accumulation are mainly under the influence of the shear stress on membrane surface, and sludge accumulation starting time is under the influence of distance of membranes and blowing intensity. Further, it was investigated that the dependency of viscous sublayer on the sludge accumulation starting time, and based on this, a relationship that can describe the sludge accumulation starting time is proposed.