

中空糸膜による活性汚泥懸濁液の外圧型クロスフロー濾過における汚泥堆積過程に関する研究

尾崎則篤¹・山本和夫²

¹学生会員 工修 東京大学大学院 都市工学専攻 (〒113東京都文京区本郷7-3-1)

²正会員 工博 東京大学教授 環境安全研究センター

中空糸膜による活性汚泥の外圧型クロスフロー濾過において膜糸配置及びクロスフロー流速が汚泥堆積過程に及ぼす影響を調べた。ある一定値以上のクロスフロー流速では汚泥が堆積しなくなることを示した。また膜糸配置が異なると汚泥堆積過程が異なることを示した。しかし膜間流速及び乱れ強度は膜糸配置によらず一定であった。そこで汚泥粒子の膜面への衝突現象のシミュレーションに基づいて、膜糸配置による汚泥堆積開始の違いを説明しうるモデルを提案した。

Key Words : *membrane separation, hollow fiber membrane, sludge accumulation, crossflow velocity, turbulence intensity, model of particle behavior*

1. はじめに

膜分離技術を用いた下 wastewater 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、尿尿処理への膜分離技術の適用はその成果といえる。

その中で、活性汚泥法と限外濾過膜等の膜による固液分離を組み合わせた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。膜分離活性汚泥法は汚泥の沈降性によらない安定した処理水質が得られ、基本的には汚泥引き抜きを必要としない維持管理が容易な方法となりうる。一方、本法が広く適用されるには膜分離にかかるコストを低減することが重要であり、そのために透水能のすぐれた膜素材の開発、またよりコンパクト化された、処理効率のよい膜モジュールの開発が必要になってくる。

膜モジュールのコンパクト化に関しては様々なモジュールが考案されている¹⁾²⁾。なかでも中空糸膜は膜の充填密度を高くすることが容易であり、容積当たりの処理効率を大きくすることが可能である。しかし中空糸膜の外圧型濾過では膜糸の充填密度を高くすることによって膜表面に汚泥の堆積が起きるとい問題が生じる。汚泥の堆積は透過水量の低下を引き起こし膜糸の充填密度を上げることによる効果を相殺する。濾過の効率を上げるには適切な運転工程を見いだすこと³⁾⁴⁾、また出来るだけ汚泥の堆積を避けつつ膜糸の充填密度を上げるような設計をせね

ばならない。

膜濾過において膜表面への汚泥の堆積に影響を与える因子としてはモジュールの配置、クロスフロー流速、汚泥の性状、操作圧力、操作時間などがある⁵⁾⁶⁾。中空糸膜においてはWong⁷⁾による活性汚泥の濾過実験によって一定のクロスフロー流速下では、ある程度以上膜糸密度が上がると汚泥の堆積が生じ、それにより急激なフラックスの低下を引き起こすことが明らかになった。そこで、汚泥堆積を避けつつ膜糸密度を上げるには膜糸密度がどのような機構で汚泥堆積に影響を与えるのかを調べることが重要になってくる。

本研究の目的は中空糸膜において膜糸の充填密度が汚泥堆積に及ぼす影響を、構造を単純化した膜モジュールを用いることにより詳細に解析することである。そこで正三角形に配置された3本の中空糸膜モジュールが外圧型中空糸膜モジュールを構成する基本単位となるとし、3本の膜を持つ中空糸膜を用いた解析を行った。3本の膜モジュールは、膜糸に囲まれた領域が存在しうる最小の本数であり、そこでの解析は一般の、多くの膜糸を含む膜モジュールの堆積機構の解明の基礎となりうるものである。

まず活性汚泥の濾過実験によってクロスフロー流速と膜糸の充填密度が汚泥の堆積量にどのように影響を与えるのかを調べた。一方濾過実験による結果をうけ、膜モジュールを清水に設置し膜近傍の流速を測定し、流速および乱れ強度と汚泥付着量との関

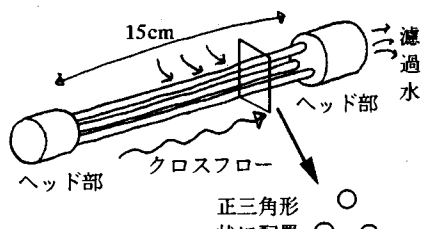


図-1 膜モジュールの形状

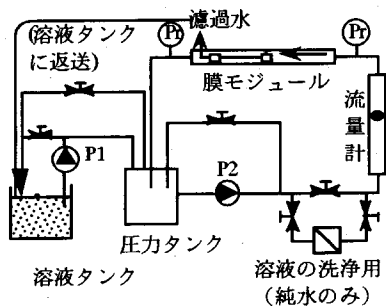
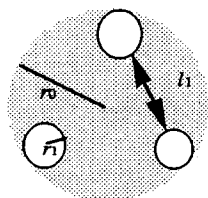


図-3 実験装置の配置



■ : 膜糸を囲む領域S

○ : 膜糸断面 (周長d)

l_1 : 通常の意味での膜間距離

l : 一般化された膜間距離

図-2 膜糸断面と一般化された膜間距離の計算

$$S = \pi r_0^2 - 3\pi l_1^2$$

$$d = 3 \cdot 2\pi l_1$$

$$l = \frac{S}{d} = \frac{\pi r_0^2 - 3\pi l_1^2}{3 \cdot 2\pi l_1}$$

$$l = \frac{S}{d} \quad (1)$$

ただし、 l : 一般化された膜間距離[mm], S : 膜糸を囲む領域の断面積[mm²], d : 膜糸断面の周長[mm]である。図-2に各々の示す部分について記した。この定義による膜間距離は通常の意味での膜間距離が0のときも膜糸に囲まれた領域と膜糸の外に空隙ができるため0にはならない。本研究で用いた膜モジュールでは、一般化された膜間距離0.3mmが通常の意味での膜間距離0mmに相当している。本論文では、特に通常の意味での膜間距離と区別するべき場合を除き一般化された膜間距離を「膜間距離」と呼ぶ。

活性汚泥を外圧式でクロスフロー濾過をし、膜間差圧は70 kPa、MLSSは1.2~1.8 kg・m⁻³、水温は25℃であった。活性汚泥はグルコース、ペプトンを中心とした基質を用い、Fill and Draw方式で汚泥滞留時間(SRT)は10日とした。

実験装置の概要を図-3に示す。溶液タンクで汚泥は培養されポンプP1によって圧力タンクに送られる。P1はまた膜間差圧を与える役割をもつ。循環流によるクロスフローはポンプP2によって与えられる。二つのポンプと、弁によって圧力とクロスフローが独立に調節される。濾過水は再び溶液タンクに返送される。一つの濾過実験の期間は3日ないし4日であり、膜糸配置またはクロスフロー流速を変えて、それぞれの濾過実験を行った。濾過実験中もFill and Drawを継続して行い、汚泥の性状を一定に保った。

測定項目は活性汚泥濾過時のフラックス(体積フラックス)および、濾過実験終了後に膜表面に付着した汚泥の重量である。付着した汚泥の重量は活性汚泥の濾過終了後、膜モジュールを取り出し、キムワイプで膜表面の汚泥をふき取りモジュールをふき取る前後の重量差から計算した。またふき取った汚泥は105℃で2時間強熱乾燥させ、再び重量を測

連を調べた。

また活性汚泥粒子の挙動を記述した数値シミュレーションに基づいた膜糸充填密度と汚泥堆積の関係に関する考察を行った。

2. 膜糸配置と汚泥付着量

(1) 活性汚泥の濾過においてクロスフロー流速および膜糸配置が汚泥堆積に及ぼす影響

a) 実験方法

実験に用いた膜は表-1に示す仕様のものである。膜モジュールの形状を図-1に示す。3本の膜糸が正三角形に配置されている。管径20mmの円管中央に膜モジュールを固定する。膜糸の位置の固定は両ヘッド部によってなされる。濾過水は片側集水である。膜糸部分の断面を図-2に示す。

膜糸の配置におけるその分散の度合いの指標として一般化された膜間距離を以下のように定義する。

表-1 膜の仕様

サイズ	外径 2mm、内径 1.2mm
素材	ポリスルホン系
分分子量	約20,000、限外濾過膜
純水フラックス	1.2m ³ ・d ⁻¹ at 70 kPa, 25℃
構造	外側に活性層、内側に支持層

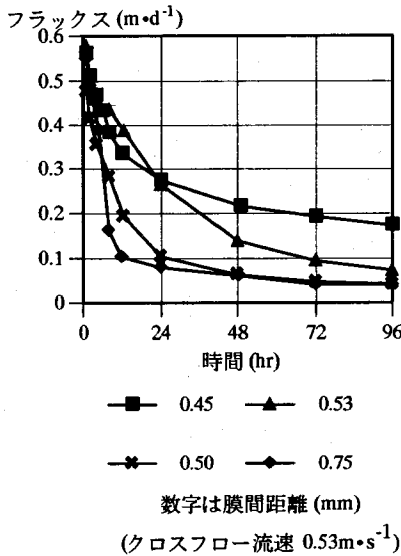


図-4 フラックスの経時変化

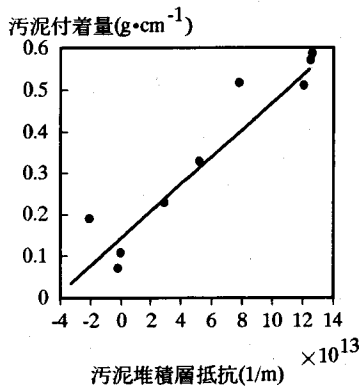


図-5 汚泥堆積層抵抗と汚泥堆積量

定し付着した汚泥の含水率を計算した。汚泥は膜系全体に一樣に堆積しているとし、膜系の長さで除した値で汚泥付着量を表した。

濾過はまずクロスフロー流速を一定にし、様々な膜間距離を持つ膜モジュールを用いておこない、汚泥付着量とフラックスとの関係を調べた。またフラックスの経時変化に基づき汚泥堆積層抵抗を求め膜間距離との関係を調べた。

また様々なクロスフロー流速で濾過を行いクロスフロー流速とフラックス、汚泥付着量との関係を調べた。

b) 実験結果

図-4に膜間距離を変えて行った場合のフラックスの経時変化を示す。

次にこれらフラックスの値に基づき汚泥堆積層抵抗

を算出し、汚泥付着量との比較を行う。

フラックスと膜間差圧、濾過総抵抗には以下の関係がある。

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

ここに J : フラックス [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], ΔP : 膜間差圧 [Pa], R_T : 濾過総抵抗 [m^{-1}], μ : 粘性係数 [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]である。

また、濾過総抵抗 R_T は、膜抵抗 R_m [m^{-1}], 膜内の目詰まりによる抵抗 R_i [m^{-1}], 汚泥堆積層抵抗 R_c [m^{-1}]を用いると、

$$R_T = R_m + R_i + R_c \quad (3)$$

と表される。

濾過時に汚泥堆積を起さなかった場合、汚泥堆積層抵抗は生じず、 $R_c = 0$ となり、 $R_T = R_m + R_i$ となる。そこで、この場合の濾過総抵抗を R_{T0} とすると、汚泥堆積層抵抗は

$$R_c = R_T - R_{T0} \quad (4)$$

として計算される。

同じ時間濾過を行ったとしても、一般には汚泥堆積が起きた場合と起きなかった場合とでは膜内の目詰まりによる抵抗 R_i が異なる。これは主として濾過水量が異なってくるため濾過水が膜を透過する際に付着する目詰まりの量が異なってくるからである。しかし本実験中、最も汚泥堆積が多かった場合とほとんど堆積が起きなかった場合とでは、濾過総水量が最大2倍程度の開きがあったにもかかわらず、洗浄によって表面の汚泥を取り除いた後の純水フラックスには1割程度しか差がなかった。このことから、本実験においては濾過実験ごとに汚泥付着量が異なっても膜内目詰まり抵抗に大きな差はなく、本実験においては汚泥堆積が異なっても目詰まり抵抗は等しいといえる。

本実験においてはクロスフロー流速が一定であっても、汚泥付着が甚だしいものとほとんど汚泥が付着しないものに分かれフラックスに大きな差が生じることが観察された。本実験の目的はなぜ膜間距離によって汚泥付着量が様々な異なる値をとるかを調べることである。そこで汚泥の付着がほとんど起きなかった膜モジュールの抵抗を R_{T0} と見なし、それ以外の各々の膜モジュールの抵抗との差として汚泥堆積層抵抗 R_c を式(4)から計算し汚泥付着量との関係を調べた。

図-5に濾過終了時における汚泥堆積層抵抗と、汚泥付着量との関係を示す。汚泥堆積層抵抗と汚泥付着量は一定の直線関係を持っている。汚泥付着量は汚泥堆積層抵抗が0の時でも0にはならず正の値を持っている。これはどの濾過においても全く汚泥付

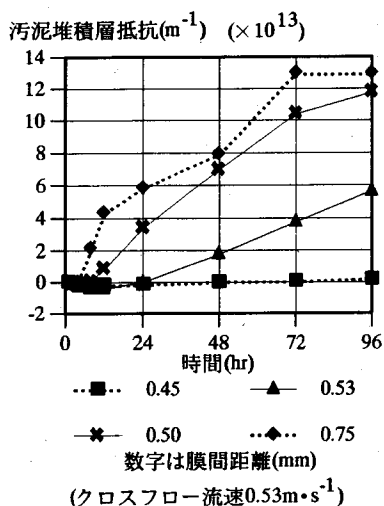


図-6 汚泥堆積層抵抗の経時変化の例

着が起きないというわけではなく汚泥付着がわずかながら生じるためである。また、汚泥堆積層抵抗が負値をとる部分があるが、式(4)において異なる膜モジュールとの差をとっているために生じた誤差であると考えられる。

汚泥付着量は直接には濾過終了時に膜を取り出さねば測ることは出来ない。しかし、一旦図-5が得られれば、式(2)~式(4)によって定義された汚泥堆積層抵抗に基づき汚泥堆積量の経時変化を推定することが可能になることが分かる。

図-6に汚泥堆積層抵抗の経時変化の例を示した。抵抗は濾過開始後一定の時間を経て生じ始めている。すなわち汚泥の堆積は濾過開始後、ある程度時間が経過して後生じる。また堆積開始に要する時間は膜間距離によって異なっている。

そこで膜間距離と、濾過開始後、汚泥堆積が始まるのに要する時間(汚泥堆積開始時間)との関係を図-7に示した。全体として下に凸の傾向を持ち、膜間距離0.8mm程度が最も汚泥の堆積開始時間が早い。膜間距離による違いが汚泥堆積が開始される時間の違いにあらわれているのが分かる。

膜間距離1.4 mm付近に汚泥堆積開始時間が非常に小さく、他と傾向の異なる実験結果がある(括弧で括ったプロット)。このとき、原因は不明だが汚泥の性状が他のものに比べて見かけ粘性が高くなっていたことが観察され、汚泥の性状の変化が膜面への付着の起きやすさに影響を与えたのではないかと考えられる。

また図-8に膜間距離と汚泥堆積層抵抗の増加速度との関係を示した。堆積速度の差は最も大きいも

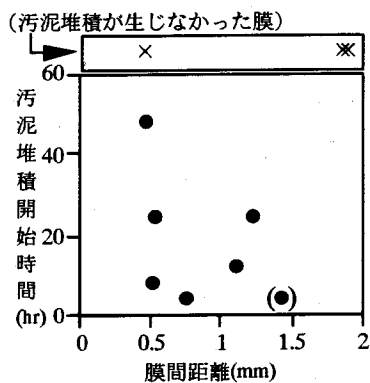


図-7 膜間距離と汚泥堆積開始時間
(濾過において汚泥堆積を起こさなかった場合を上記に示した)

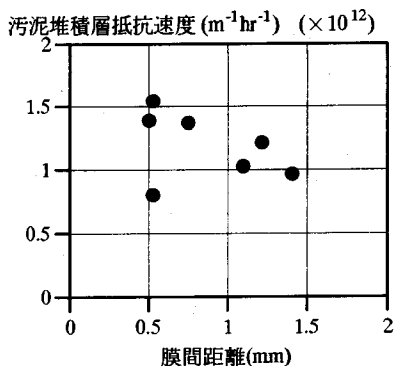


図-8 膜間距離と汚泥堆積層抵抗の増加速度

のでも2倍程度であり、最大10倍以上の差が出た汚泥堆積開始時間と比較すると差はそれほど顕著ではない。

また異なるクロスフロー流速下で濾過実験を行いクロスフロー流速の違いによる汚泥堆積の違いについて調べた。

図-9に、濾過開始後72時間経過した時点でのフラックスを定常フラックスと見なし、異なるクロスフロー流速下における定常フラックスを示した。また、図-10に活性汚泥実験終了時の、膜の表面の汚泥付着量を示した。図-9とあわせてみると、クロスフロー流速一定のもとでは汚泥付着量が大きいときは定常フラックスは小さく、汚泥付着量が小さいときは定常フラックスが大きいといえる。

また、汚泥の堆積状態を観察したところ、下流部ほど堆積量が大きくなるという傾向を持っていたが、おおむね均一に堆積を起こしていた。

また汚泥の含水率も測定し、95±0.5%とほぼ一定の値を得た。

図-10において、クロスフロー流速一定のもと

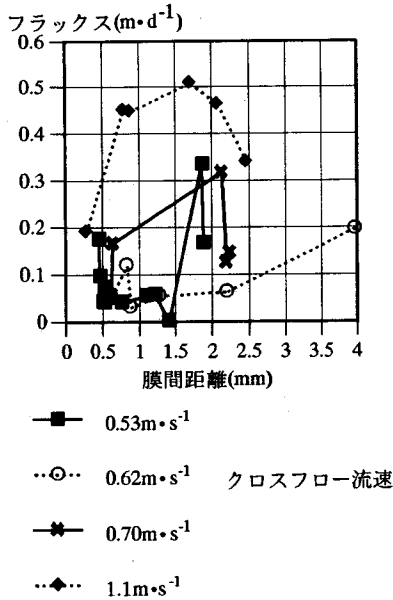


図-9 各クロスフロー流速下における膜間距離とフラックス

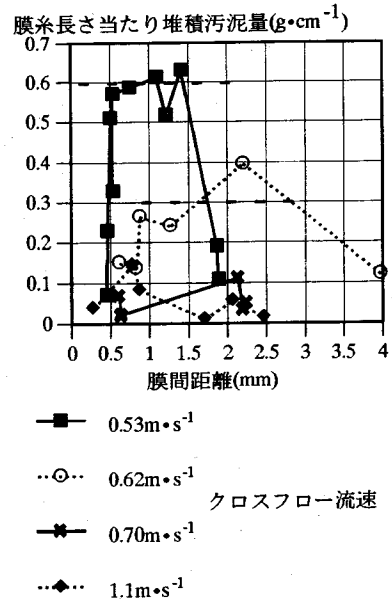


図-10 各クロスフロー流速下における膜間距離と膜糸長さあたり堆積汚泥量

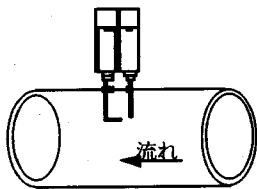


図-11 ピトー管の設定

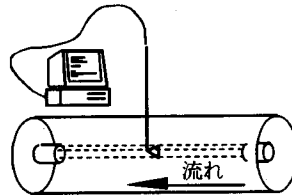


図-12 熱線流速計の設定

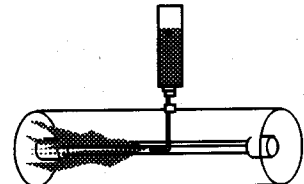


図-13 トレーサー実験

では最大の汚泥付着量が存在し、その最大汚泥付着量はクロスフロー流速が大きくなるに従い小さくなっている。クロスフロー流速 $0.7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上では $0.1\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}$ 以下と他と比べ非常に小さい値で一定しており、また実験中の膜糸表面の観察においてもほとんど汚泥の堆積は認められなかった。

(2) 膜間領域の平均流速と乱れ強度の測定

前節の濾過実験で、クロスフロー流速が一定であっても、汚泥堆積開始時間が膜間距離によって異なることが分かった。また一定の濾過時間内に汚泥堆積が起きるか否かも膜間距離によって異なり、その差は濾過時間内に汚泥堆積開始時間に達するかどうかの差に起因すると考えられる。そこで汚泥堆積開始時間が短い膜モジュールではその他の膜モジュールよりも膜間流速が低下しているのではない

かと考え、膜間流速を調べるための実験を行った。またトレーサー実験により膜間領域が層流になっているかどうかを調べた。

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割程度増加するにすぎず、粘性の違いによる水理学的状況の差は無視できる。

a) 実験方法

膜間流速の測定

膜糸に囲まれた領域（膜間領域）の中心点での流速（膜間流速）を測定した。膜糸に囲まれた狭い領域の流速を測定するため、外径 0.65mm のピトー管を用いた。図-11に示したようにピトー管を流れにおき測定した。

静水管は動水管の測定点の 5mm 程度上流、また静水管が動水管の測定点での流れをなるべく乱すこと

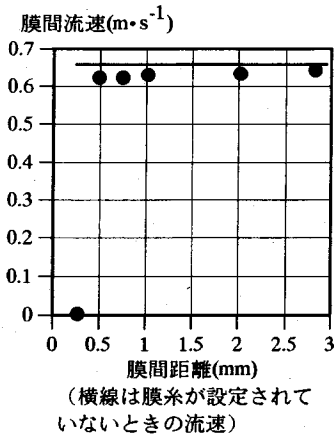


図-14 膜間距離と膜間流速

のないように流れに直角方向に2mm程度ずらして設置した。測定点は膜糸上流端から7cm流下したところであった。管内平均流速は $0.53\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ で測定を行った。

ピトー管の校正は円管中に設置し流速を測定し、円管流の速度分布則である1/7乗則と比較することで行った。

乱れ強度の測定

測定装置としては熱線流速計 (KANOMAX社, モデル1008, 1010, 1013) を用い, プロープは幅2mmのものを用いた。管内平均流速は $0.53\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, サンプリングレートは50Hzであった。

測定の際は図-12に示したようにヘッド部のみで、膜糸を除いた状態で設定した。プロープは膜糸上流端相当部から7cm流下した部分、円管の中心部に配した。また比較のためにヘッド部を装着していない状態、すなわち通常の円管流れでの測定を行った。

トレーサー実験

クロスフロー中の懸濁液のマクロな流動状況を把握することを目的としてトレーサー実験を行った。

トレーサー実験にはピトー管として用いたものと同じ、先を曲げた注射針を用いてトレーサーを注入した。トレーサー注入点は膜糸上流端から7cm流下した部分で、膜間領域の中心点であった。

またヘッド部のみで、膜糸を設定しない場合でも測定を行い、クロスフロー中のマクロな乱れが膜糸の有無によって大きく変わるかの比較検討も行った。測定点は円管の中心部、膜糸を設定して測定した場合と同じ場所に相当する。管内平均流速は $0.53\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ であった (図-13)。写真撮影によってトレーサーの広がりを観察した。またその写真に基づき膜糸がある場合とない場合とでトレーサーの広

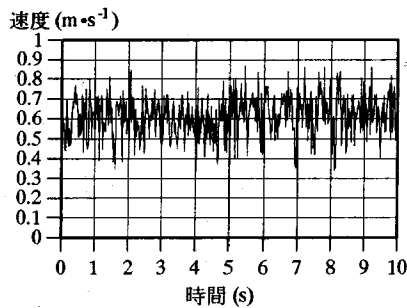


図-15 ヘッド部後流の流速

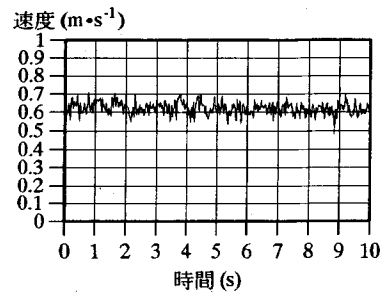


図-16

モジュールを設置していない円管流中心部の流速

がりの比較を行い、膜糸の存在が乱れ強度にどの程度影響を及ぼしているかを調べた。

b) 実験結果

膜間流速の測定結果

測定結果を図-14に示す。 $0.66\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ を通る横線は膜糸を設定していない場合の同じ場所での流速を示したものである。

一般化された膜間距離0.3mm (通常の意味での膜間距離0.0mm) 以外での膜間流速はほぼ一定値を示している。

クロスフロー流速 $0.53\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ で行った活性汚泥の濾過実験においては膜間距離1.5mm以下で汚泥の堆積を起こしており (図-10), また汚泥堆積開始時間も様々な値を示している (図-7)。しかし膜間流速はほぼ一定であり汚泥堆積開始時間は膜間流速によらず様々な値を取りうる事が分かる。

乱れ強度の測定結果

管内平均流速を $0.53\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ にして測定を行った。図-15にヘッド部を装着した場合の瞬時流速を、また比較のためヘッド部を装着していない場合の円管中心部の瞬時流速を図-16に示した (これは通常の円管乱流の流速を測定したことになる)。

乱れ強度は $9.9\times 10^{-2}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, ヘッド部を設定していない場合 $3.1\times 10^{-2}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ であった。ヘッド部を装着した場合、装着していない場合の乱れ強度の3.4倍程度となっており上流の端部の存在が相当乱れ強度を大きくしているのが分かる。

トレーサー実験結果

膜間距離0.8mm, 3.2mmの膜モジュールでトレーサー実験をおこなった結果、いずれもトレーサー注入点を頂点とする紡錘状の広がりを見せた。膜間領域で層流であるとすればトレーサーは膜間領域に封じ込められるか、少なくとも広がりが遅れると考えられる。トレーサーが注入点から拡散したということは膜間領域内にも乱流であることを示している。

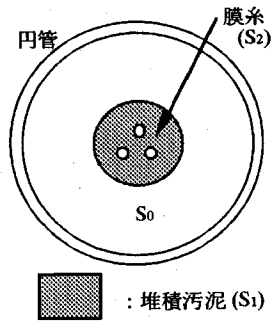


図-17 汚泥堆積時の流路の収縮

また膜糸を設置した場合と、ヘッド部のみで膜糸を設定していない場合との乱れ強度の違いを調べるために、膜間距離3.2mmの膜モジュールと、ヘッド部のみで膜糸を設定していない場合とでトレーサーの広がり角の違いを調べた。複数の写真からトレーサーの広がり角度を調べた。

膜糸が存在しない場合、その広がり角度は平均 $2.2 \times 10^{-1} \text{rad}$ 、分散 $7.0 \times 10^{-2} \text{rad}$ 、膜糸が存在している場合は広がり角度は平均 $2.6 \times 10^{-1} \text{rad}$ 、分散 $6.0 \times 10^{-2} \text{rad}$ であった。広がり角の違いは2割程度であり、ヘッド部の有無によって3倍以上の差が出たことと比較すると全般的な乱れ強度は膜糸の存在によって大きく異なることはないといえる。

c) 膜糸間の乱れ強度

膜糸間における乱れ強度について考察する。

膜間領域では時間平均流速のみを測定し、乱れ強度は測定していない。また、トレーサー実験により、膜間距離が小さい場合であってもその膜間領域全体が層流になっているわけではないという結果を得たが、乱れ強度そのものの値は得ていない。

乱れ強度が異なっている可能性としては、膜間領域で境界層を形成することにより、乱れが抑制されているという状態が考えられる。

境界層には層流境界層と乱流境界層とがある。まず、層流境界層であるとした場合、膜間領域全体で層流境界層を形成しているわけではないことはトレーサー実験により明らかである。膜糸表面の近傍にのみ層流境界層を形成している可能性はあるが、膜間領域全体が層流境界層であるということではなく、必ず境界層外部の領域が膜間領域にまで及んでいる。つまり、膜間領域外部の乱れ強度と同程度の乱れ強度が膜間領域にまで及んでいるといえる。

乱流境界層の場合、粘性底層以外では乱れ強度は大きく低下することはないことが知られている。膜間流速は膜糸を設定していない場合の流速と比較して1割以下の速度低下しか示しておらず、粘性底層

が膜間領域の支配的な領域のわけではないことがわかる。

$y=11.4\nu/u_*$ (y :粘性底層厚さ, ν :動粘性係数, u_* :摩擦速度) を用いて粘性底層厚さを評価すると0.1mm程度であった(付録参照)。この評価からも膜間領域のほとんどの部分では、粘性底層以外の外部領域に属していると言え、乱れ強度は膜間領域外側の乱れ強度と変わらないと考えられる。

3. 汚泥堆積過程を支配する因子に関する考察

(1) クロスフロー流速と最大汚泥付着量

図-10によると最大汚泥付着量はクロスフロー流速が大きくなるに従い小さくなっている。 $0.70 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上ではほとんど汚泥の堆積を起こしていない。

一定以上のクロスフロー流速では汚泥堆積を起こさなくなる限界クロスフロー流速が存在している。そこで、付着した汚泥による流路の収縮によって最大汚泥付着量に達した状態では限界クロスフローになっているのではないかと予測できる。汚泥堆積が起きた場合、汚泥の堆積は膜モジュールを包み込むように成長することが(図-17)観察された。一旦そのような成長が始まると、最大汚泥付着量に達するまで成長し、その値は限界クロスフロー流速によって決まるのではないかと考えられる。

そこで $0.53 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.62 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ の各結果において最大汚泥付着量に達したときの収縮した流路内でのクロスフロー流速を計算した。

流路内でのクロスフロー流速を $v_c [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ 、初期状態でのクロスフロー流速を $v_0 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ 、流路の収縮率を $e [-]$ 、管の断面積を $S_0 [\text{cm}^2]$ 、膜糸の断面積を $S_1 [\text{cm}^2]$ 、汚泥堆積層の断面積を $S_2 [\text{cm}^2]$ とすると、

$$v_c = \frac{v_0}{e} = \frac{S_0}{S_0 - (S_1 + S_2)} v_0 \quad (5)$$

となる。汚泥堆積層厚さは流れにわたって一様であると仮定すると、式(5)から限界クロスフロー流速を求めることができる。クロスフロー流速 $0.53 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ の場合は最大汚泥付着量 $0.6 \text{g} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、 $0.62 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ の場合は $0.3 \text{g} \cdot \text{cm}^{-1}$ であった。これらの値に基づき計算を行うと、 $0.53 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ の場合は流路内での流速は $0.66 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.62 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ の場合は $0.71 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ という値を得た。この値は、クロスフロー流速 $0.7 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上の濾過ではほとんど汚泥の堆積を起こしていないという結果とも一致する。

このことより限界クロスフロー流速 $0.7 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ が、汚泥堆積が起きうるかどうかの上限を決めていること

がわかる。また限界クロスフロー流速に達したときの剪断応力を求めると、 $2 \times 10^2 \text{ Pa}$ であった（付録参照）。最大汚泥付着量は限界剪断応力によって規定されていると考えられる。

(2) 膜系配置と汚泥堆積開始時間

a) 膜間領域における平均流速と乱れ強度

図-7、図-8を見ると膜間距離による汚泥堆積過程の違いは主として汚泥堆積開始時間の違いとしてあらわれているのが分かる。図-7によると汚泥堆積開始時間は膜間距離0.8mm程度を極小として下に凸の変化をしており、汚泥堆積開始時間の違いは、一定時間濾過した後汚泥堆積が起こるかどうかの差にあらわれる。図-10によると汚泥堆積が起こりうるクロスフロー流速であっても、実際に一定の濾過時間内に堆積が起こるかどうかは膜間距離に依存して異なっている。クロスフロー流速 $0.53 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ の場合、膜間距離0.5mm~1.5mmの範囲では一定量の汚泥堆積を起こしているが、その範囲外では汚泥の堆積量は少なくなっており、目視によってもほとんど汚泥堆積は観察されていない。

濾過を継続することで、いずれ汚泥の堆積は起こりうるものの、その汚泥堆積開始時間が大きく異なる。堆積開始までの時間が濾過時間よりも長い場合、結果として汚泥堆積が起きてないといえる。

汚泥堆積開始時間が膜間距離によって大きく異なる原因は、膜間領域において流速が低下しているためではないかと考え膜間領域の時間平均流速を測定した。しかし、汚泥堆積が早くに起こる膜モジュール（膜間距離0.5~1.5mm）も、その膜間領域での速度は一定であり、また乱流であるという点でもそれ以上の膜間距離をもつモジュールと変わりはなかった。

乱流であってもその乱れ強度が膜間領域で低下している可能性がある。しかし境界層に関する考察によって、乱れ強度も膜間領域の外側と比較して大きく変わってはいないであろうことが示された。

平均流速と乱れ強度の違いからは汚泥堆積開始時間に大きな違いがあることは説明できない。汚泥堆積開始時間に差を与えるものとしては別の要因が支配しているのではないかと考えられる。そこで以下の節では汚泥堆積開始時間を記述しうるモデルに関する考察を行った。

b) 汚泥粒子の挙動のシミュレーションに基づく汚泥堆積開始時間の予測

粒子の膜面への衝突頻度に関するモデル

膜面への懸濁物の付着を懸濁物の膜面への衝突現象から説明することを試みた。それらに類する試みと

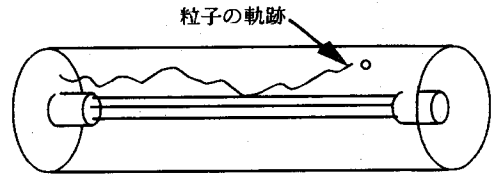


図-18 クロスフロー中における粒子の軌跡

しては、懸濁物の膜面への進入角度から説明する方法¹⁴⁾や、膜面への衝突回数から説明する方法¹⁵⁾などが考えられる。ここでは膜面への衝突回数から説明する方法を用いて考察する。汚泥堆積はフロックの衝突による付着が主要な原因であるとし、汚泥の増殖の影響は無視した。

ここでは汚泥粒子のクロスフロー中での挙動を記述し（図-18）、その粒子の膜系への衝突分布について調べた。そしてそれに基づいて膜間距離に依存する汚泥堆積開始時間の違いを考察した。汚泥粒子の膜系への衝突分布は、次のようなモデルから導出した：（1）汚泥粒子は独立に運動し各粒子は流体の乱れと連動して動く。（2）また汚泥粒子の膜面の衝突の際は弾性衝突をし運動量を失わない。

（3）汚泥粒子の運動の記述に際しては粘性底層の影響は無視できる。

水理条件に関しては次のように定めた：変動のLagrange自己相関は凍結乱流の仮定に基づきEuler自己相関から記述し、管路中心付近での現象を追うことになるので（図-17）、乱れは一様、等方的であると見なす。膜系近傍では膜系による壁面の粘性底層の影響が考えられるが、膜系の壁面の占める割合は、円管の壁面と比較すると1/100程度であり、その影響は膜面のごく近傍を除いては無視できると考えている。

これらから、粒子の移動距離の分散は、

$$\begin{aligned} \overline{d^2(\Delta t)} &= \overline{\left(U \Delta t - \int_0^{\Delta t} u'(\tau) d\tau \right)^2} \\ &= \overline{u'^2} \int_0^{\Delta t} \int_0^{\Delta t} R_1(x-y) dx dy \end{aligned} \quad (6)$$

と表される。

ここに、

d^2 ：粒子の移動距離の分散 $[\text{m}^2]$ 、 U ：平均流速 $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ 、 u ：瞬時流速 $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ 、 Δt ：時間ステップ $[\text{s}]$ 、 u' ：乱れ強度 $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ 、 $R_1(\tau)$ ：ラグ τ における速度変動の自己相関係数 $[-]$ である。 u' および $R_1(\tau)$ は図-15に示した測定結果から導出される。

汚泥粒子が乱れと連動して動くことの妥当性は汚泥の粒径と乱れのスケールとの比較で判断できる。

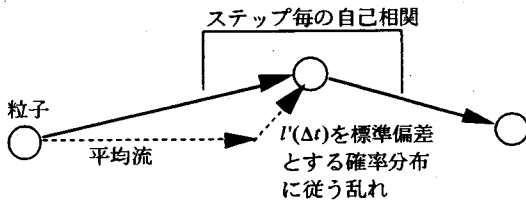


図-19 汚泥粒子の挙動の決定

汚泥の粒径は粒度分布計（堀場製作所，CAPA-4000）で測定し平均粒径約40 μmを得た。乱れの渦の代表スケールである Taylor scale は数百 μm であり（付録参照），汚泥粒子の大きさは乱れスケールと比較して十分小さく，汚泥粒子が流体と運動して動くと仮定することができる。

これらの仮定に基づき，図-19に示したように相関の及ぶ範囲の時間ステップを選んでステップごとの粒子の動きを与えた。

本シミュレーションでは，活性汚泥中での粒子の挙動が，汚泥の堆積現象を支配していると考えている。そこで，膜糸の分散度と，粒子の拡散の度合いとの比が指標として重要であると考え，無次元化された膜間距離を，以下のように定めた。

$$\lambda = \frac{l}{d(t_s)} \quad (7)$$

ここに， λ :無次元化された膜間距離[-]， l :膜間距離[mm]， $d(t)$: t 秒経過した後の粒子の移動距離の標準偏差[m]， t_s :自己相関係数を積分して得られる時間スケール[s]である。 t_s は，

$$t_s = \int_0^{\infty} R_t(\tau) d\tau \quad (8)$$

と計算される。ここに $R_t(\tau)$:自己相関係数である。 t_s は，平均的な渦の継続時間と考えられ， $d(t)$ は流れに直角な方向の粒子の拡がりのスケールを代表するものと考えられる。すなわち λ は，膜糸間の隙間の拡がりのスケールと粒子の拡散のスケールとの比である。

これら粒子の挙動に関する仮定および無次元化された膜間距離を用いて汚泥粒子の膜面への衝突頻度と膜間距離との関係を調べた。

図-20に無次元化された膜間距離と，衝突頻度（膜糸への衝突回数/総粒子数）との関係を示した。衝突頻度は膜間距離によらず一定である。流速分布が膜間距離によらず一様とした場合，このモデル中の粒子の衝突頻度も一定であることが分かる。衝突頻度の差によっては膜間距離によって汚泥堆積開始時間が異なることを説明できない。

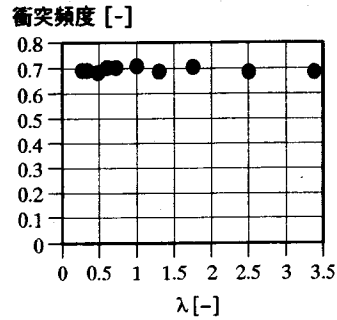


図-20 粒子が膜糸に衝突する頻度（膜糸への衝突回数/総粒子数）

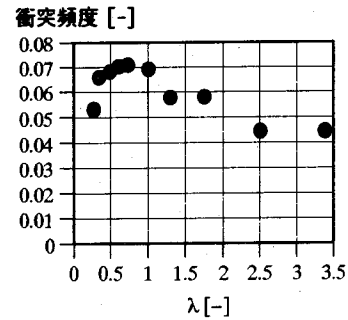
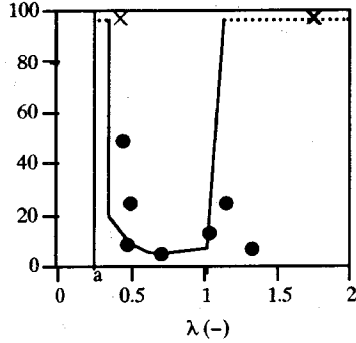


図-21 粒子が膜糸に3回以上衝突する頻度（膜糸に3回以上衝突する粒子の個数/総粒子数）

そこで，衝突頻度そのものが一定であっても膜間距離が短いときは何度も膜面に衝突する粒子の数が増加するのではないかと考え，複数回衝突する粒子の数をカウントした。その例として，3回以上衝突する粒子の，総粒子数に対する比を図-21に示した。他の回数を用いて整理しても同様の傾向が見られた。図を見ると，ある膜間距離の範囲ではその個数が増加しているのが分かる。これは膜糸に囲まれた領域に存在する粒子がより衝突しやすくなるためであると考えられる。

衝突頻度は膜間距離に依存しないが，膜間距離が小さくなることで膜糸に囲まれた領域は膜糸によってより閉じられた領域となり，同じ粒子が複数回衝突しやすくなる。一方膜糸配置の偏りによって，より膜糸からの距離が遠い，衝突に関与しにくい粒子の数が増加し，それらの粒子と衝突しやすい粒子の数との釣り合いによって全体としての衝突頻度は一定に保たれる。膜間距離が非常に小さいときに複数回衝突する粒子の数が減少するのは，膜糸に囲まれた領域が非常に小さくなりその中の粒子そのものの数が非常に少なくなるため，複数回衝突する粒子数も減少するものと考えられる。また，より衝突回数

汚泥堆積開始時間 (hr)



●, X 実験結果

— シミュレーション結果

($\Lambda=1.0 \times 10^{-3}$, $D=6.6 \times 10^4$, (10)式による)

----- 濾過時間内 (96時間) に堆積を起こさないと考えられる領域

X 濾過実験に置いて堆積を起こさなかった実験結果

aの縦線は通常の意味での膜間距離が0に相当する

図-2-2 汚泥堆積時間の実験値とシミュレーションの比較

の多い粒子の場合、その衝突頻度の分布のピークはよりλの小さい方にシフトし、その回数の釣り合いによって、膜間距離が非常に小さい領域での衝突頻度も一定に保たれる。

衝突頻度そのものは膜間距離によって変わることはなかったが、複数回衝突する粒子の個数は膜間距離が短いところで増加するという傾向を見出した。また、他の回数を用いて整理しても同様の傾向が見られた。

そこでこれら膜面に複数回衝突する粒子が汚泥堆積開始時間の差を生じさせるのではないかと考え、複数回膜面に衝突する粒子と汚泥堆積開始時間との関係に関するモデル化を行った。

汚泥堆積開始時間のモデル化

前節の計算結果から、総衝突頻度は膜間距離によって変わらないものの、複数回衝突する粒子の個数は膜間距離によって変わり、山なりの変化をすることが分かった。そこでこの違いが汚泥堆積開始時間の違いに反映されていると考え、汚泥堆積開始時間に関してさらに以下の3つの仮定をおいた。

(1) 膜面に複数回衝突する粒子は、その一部は膜面との接触で運動量を有意に失う結果として膜面に付着をする。

(2) 剥離頻度 (初期状態における可能最大値) は水理条件 (クロスフロー流速) 一定のもとでは一

定とする。

(3) 付着した汚泥粒子が、膜表面を薄く覆うことで膜面の性状が変化し汚泥粒子が非常に付着しやすくなることで、汚泥堆積の進行が開始される。

膜面に付着を起こす粒子数は前節で計算した複数回衝突する粒子数に一定の比率を掛けて得られる。前節のモデルでは粒子は膜面への接触の際に運動量を失わないと仮定し、一方ここでは付着は運動量を失う結果起きるとしており矛盾している。

この点に関しては次のように仮定した：

濾過はクロスフローで行っており膜面に接触する粒子数は膨大である。そして、ほとんどの粒子は膜面に複数回接触しても失う運動量はごく僅かである。一方、ごくわずかの、流速分布の裾野にあたるもともと運動量の少ない粒子は、相対的により有意に運動量を失う結果として付着を起こす。しかし、運動量を失う割合は全体と比較すると非常に少なく衝突分布にはほとんど影響を与えない。それゆえ複数回衝突分布は弾性衝突の仮定から出る衝突分布にほぼ従う。また複数回衝突する粒子に対する、運動量を失い付着をおこす粒子の比率は一定である。

衝突頻度と汚泥堆積開始時間は以下のような関係を持つ。

衝突頻度はC、付着係数をA、剥離頻度をD、流路断面を単位時間に通過する総粒子数をN、粒子一個の体積をv、膜面を覆うときの汚泥付着層体積をVとすると、汚泥堆積開始時間Tは、

$$V = Nv(AC-D)T \quad (10)$$

から求められる。汚泥堆積が開始されるきっかけとなるのは汚泥粒子がちょうど膜面を単層相当覆った時とし、そのときの付着層厚さは汚泥粒子の平均粒径に等しい40 μmとして汚泥付着層堆積Vを計算した。

図-2-2に図-2-1の結果に基づき式(10)を用い汚泥堆積開始時間を計算した結果を示した。λが0.7~1.2の実験データを用いパラメータフィッティングを行い、λが0.5で急に汚泥堆積開始時間が大きくなる領域で、実測値とシミュレーションとの適合性を見た。その結果、最も実験結果と適合性のよかった、3回以上衝突する粒子数を用いて計算した結果を同様に例として示した。複数回の衝突分布に基づく数値シミュレーションは実験結果をある程度再現しうるものであることが分かる。

膜間距離が小さい領域では実験結果とのずれが大きい。図-2-2は粒子が膜糸に3回以上衝突する頻度の分布を用いてシミュレーションをおこなっているが、衝突回数を変えてシミュレーションをおこなっても膜間距離λが0.5近傍のところでは実験結果

とシミュレーションをこれ以上適合させることはできなかった。図-22に示した結果はそのなかでも比較的、膜間領域が小さいところでの適合性がよいものである。膜間距離が非常に小さくなると膜糸に囲まれた領域における境界領域などの影響が無視し得なくなるため、境界領域の存在を無視している本シミュレーションでは実験値とのずれが生じているのではないかと推測される。

4. 結論

本研究で得られた結果をまとめると以下のようになる。

(1) 中空糸膜による外圧式の濾過においては、クロスフロー流速がある値、限界クロスフロー流速以下になると汚泥堆積を引き起こす。汚泥堆積が起きる条件における汚泥付着量も限界クロスフロー流速から説明でき、その値は $0.7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ であった。

(2) 限界クロスフロー流速における汚泥堆積層表面の剪断応力は $2\times 10^2\text{Pa}$ と見積もられた。

(3) 汚泥堆積が起きうるクロスフロー流速下では汚泥堆積開始時間は膜間距離に大きく影響される。しかしいったん汚泥堆積が開始されると汚泥堆積速度は膜間距離に大きく影響を受けない。

(4) 膜間距離の違いによる汚泥堆積開始時間に与える影響を調べるために膜間流速を測定した。膜間距離によらず膜間流速は一定であった。また乱れ強度に関する考察も行ったが、乱れ強度も大きく異なっているとはいえなかった。汚泥堆積開始時間の違いは水理学的な差によらず生じることが分かった。

(5) そこで膜糸に囲まれた領域の汚泥粒子の、膜糸への衝突分布をシミュレートすることによって汚泥堆積開始時間を説明することを試みた。汚泥粒子の衝突頻度、付着係数、剥離頻度を定式化し、汚泥堆積は膜面を単層分汚泥粒子が覆ったとき膜表面の性状が変化し汚泥堆積が開始されたとしたモデルにより、各膜間距離による汚泥堆積開始時間がある程度再現することができた。

以上の結果を応用すると、あるクロスフロー流速下で汚泥堆積しうるかどうかが判定することができ、また汚泥堆積が起きうるクロスフロー流速下でも、膜間距離によってある濾過時間内に汚泥堆積の進行が開始されるかを判定することができる。適切な設計条件を得るには汚泥堆積を起こさないためのクロスフロー流速、洗浄間隔、膜糸配置を決定する必要があり、そのための基礎的な知見を得ることができ

た。

付録

①Taylor scale の導出

Taylor scale は、

$$\lambda_T = \sqrt{30 \frac{\nu u'^2}{\varepsilon}} \quad (1)$$

と表される¹³⁾。ここに λ_T : Taylor scale[m], ν : 動粘性係数 $[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$, u' : 乱れ強度 $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$, ε : 乱れエネルギー散逸 $[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}]$, である。また、 ε は円管流においては

$$\varepsilon = gUI = f \frac{U^3}{2D} \quad (2)$$

と表される。ただし、 g : 重力加速度 $[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$, U : 平均流速 $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$, I : エネルギー勾配[-], f : 摩擦損失係数[-], D : 管径[m]である。式(1), 式(2)より λ_T が求められる。自己相関係数は熱線流速計による測定によって膜モジュールのヘッド部の有無ではほとんど変わらなかった。そこで、Taylor scaleはモジュールの存在の有無にかかわらず一定であると考えヘッド部が存在しない円管流の測定結果から導出し、 $\lambda_T = 1.2 \times 10^{-4}[\text{m}]$ という結果を得た。これよりTaylor scaleは数百 μm のオーダーであることが分かる。

②膜表面の剪断応力の評価

膜表面の剪断応力は、円管壁面の剪断応力に等しいとして計算する。

すると剪断応力は乱れエネルギー散逸を用いて表すと、

$$\tau_b = \frac{1}{8} f \rho U = \frac{\rho D}{4} \frac{\varepsilon_m}{U} \quad (3)$$

となる。ただし τ_b : 剪断応力 [Pa], ε_m : ヘッド部が存在する場合の乱れエネルギー散逸 $[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}]$ である。 ε_m はヘッド部の存在によって異なると考えられ直接式(2)から導出することはできない。そこでTaylor scaleはヘッド部の存在によらず一定であることを用いて ε_m を導出する。Taylor scale 一定より、

$$\frac{\lambda_{Tm}}{\lambda_T} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m}} \sqrt{\frac{u_m'^2}{u'^2}} = 1 \quad (4)$$

となる。 λ_{Tm} : 膜モジュールを設定した場合のTaylor scale [m], ε_m および u_m' は膜モジュールを設定している場合の乱れエネルギー散逸および乱れ強度である。 u_m' および u' は実験により既知であるので式(4)より ε_m を定めることができる。

こうして求められた ε_m を式(3)に代入してせん断応

力を求めると、 $\tau_b = 2 \times 10^4$ [Pa] となった。

③膜表面の粘性底層厚さの評価

粘性底層厚さは

$$\delta = 11.6 \frac{v}{u_*} \quad (5)$$

となる。ただし δ : 粘性底層厚さ [m], v : 動粘性係数 [$m^2 \cdot s^{-1}$], u_* : 摩擦速度 [$m \cdot s^{-1}$] である。

u_* は

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad (6)$$

である。ただし ρ : 懸濁液密度 [$kg \cdot m^{-3}$] である。また、 τ_b は(3)式から計算できる。

これより δ を計算すると、 $\delta = 0.09 \sim 0.1$ mm となる。

参考文献

- 1) 長岡裕, 綾日出教, 持田悦夫, 屋井裕幸: 中空糸膜分離活性汚泥法の処理特性—膜モジュール, 運転条件の相違による—, 第30回下水道研究発表会講演集, pp.569-571, 1993.
- 2) 二村修, 小島良三, 竹内清: 膜分離一体型活性汚泥法による連続処理試験, 第29回下水道研究発表会講演集, pp.435-437, 1992.
- 3) 大熊那夫紀, 奥野裕, 青井透, 真柄泰基: 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) 松本伸吾, 松田恒男, 鳴上善久, 徳島幹治: 浸漬型セラミック膜分離を用いた活性汚泥排水処理システムの開

発, 第30回環境工学研究フォーラム講演集, pp.16-18, 1993.

- 5) 後藤光亀, 土方隆, 平田強, 田口勝久, 佐藤敦久: クロスフロー型限外ろ過の逆洗浄過程に関する基礎研究, 衛生工学研究論文集, Vol. 28, pp. 131~138, 1992.
- 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) 柳根勇, 桃井清至, 原田秀樹: 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, 衛生工学研究論文集, Vol. 30, pp. 303-310, 1993.
- 8) 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, 衛生工学研究論文集, Vol. 29, pp. 85-91, 1992.
- 9) Wong, Y. K., Yamamoto, K., Ohgaki, S.: Optimal fiber spacing in externally pressurized hollow fiber module for solid liquid separation, *Water Sci. and Tech.*, Vol. 26, pp. 1246-1254, 1992.
- 10) Pennell, W. T., Sparrow, E. M., Eckert, R. G.: Turbulence intensity and time-mean velocity distributions in low Reynolds number turbulent pipe flows, *J. Mass transfer*, Vol. 15, pp. 1067-1074, 1972.
- 11) 長岡秀男, 入谷英司, 村瀬敏朗: 精密ろ過特性に及ぼすケーク構造の影響, 化工年会講演要旨集, No. 56, p. 419, 1991.
- 12) Schmitz, P., Houli, D.: Statistical model of particle accumulation on a membrane during a cross-flow microfiltration operation, *I. C. O. M '90*, pp. 767-769, 1990.
- 13) 中村育雄: 乱流現象, 朝倉書店, pp. 78-105, 1992.

(1995. 8. 16 受付)

A STUDY ON SLUDGE ACCUMULATION PROCESS IN THE EXTERNALLY PRESSURIZED FILTRATION OF ACTIVATED SLUDGE SUSPENSION USING HOLLOW FIBER MEMBRANES

Noritatsu OZAKI and Kazuo YAMAMOTO

The dependency of accumulation process of sludge on the arrangement of membrane threads and on the crossflow velocity is investigated. The results showed that above a certain crossflow velocity, the accumulation do not occur. Further, threads arrangement was found to be influencing the sludge accumulation. But velocity and turbulence intensity in the space between membrane threads are constant independent of threads arrangement. So, a model is proposed that can explain beginning of sludge accumulation. This simulation is based on the collision of sludge particles onto the surface of membranes.

「土木学会論文集購読のお願い」

1944年（昭和19年）に土木学会誌の臨時増刊号として第1号が発行されてより1947年第2号、1949年第3号が発行されました論文集は、1949年より正式に「土木学会論文集」と呼称することとなりました。

その後紆余曲折を経て1985年（昭和59年）4月より部門制となり現在に至っております。この間購読者数も増減を繰り返しておりますのが現状です。

購読者の増減は直接論文集発行経費に影響を与えております。

先に学会誌会告にてお知らせ致しましたように、本年より第Ⅶ部門が発足することとなりました。これを期に、下記の表をご参照いただきまして是非関連部門の「土木学会論文集」をご購読賜りたくご案内申し上げます。

購読ご希望の方は、会員番号・氏名・購読希望部門を適宜用紙にお書きのうえ郵送、またはFAXにて土木学会事務局会員課までお申し込み下さい。

なお、定期購読者は本会個人会員に限ります。会員以外の方で購読を希望される方は書店経由丸善(株)へお申し込み下さい。

記

(社)土木学会事務局会員課 〒160 東京都新宿区四谷1丁目無番地 FAX 03-5379-2769

本件に関するお問い合わせは、土木学会事務局会員課までお願い申し上げます。

論文集購読料

部 門	内 容	発 行 月	購読料
第Ⅰ部門	応用力学、構造工学、鋼構造、耐震工学など	4月、7月、10月、1月	4,000円
第Ⅱ部門	水理学、水文学、河川工学、水資源工学、港湾工学、海岸工学、海洋工学、環境水理など	5月、8月、11月、2月	4,000円
第Ⅲ部門	地盤工学、基礎工学、岩盤工学、土地地質など	6月、9月、12月、3月	4,000円
第Ⅳ部門	土木計画、地域都市計画、国土計画、交通計画、交通工学、鉄道工学、土木史、測量など	4月、7月、10月、1月	4,000円
第Ⅴ部門	土木材料、土木施工法、舗装一般、コンクリートおよび鉄筋コンクリート工学など	5月、8月、11月、2月	4,000円
第Ⅵ部門	建設マネジメント、設計・施工・補修技術、環境公害対策、労務、契約・積算など	6月、9月、12月、3月	4,000円
第Ⅶ部門	用排水システム、廃棄物、環境保全、環境管理、環境システムなど	11月、2月（平成8年度のみ）	2,000円

注：第Ⅶ部門は平成9年度より年4冊の発行（発行月：5月、8月、11月、2月）となり、購読料は4,000円となります。

地盤の非線形解析プログラム

■開発元 Dr.Cundall (ITASCA社)

FLAC-2D/3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua)

- 幾何学的大変形及び材料非線形を取り扱うことができます。陽解法のため歪み軟化解析が容易です。
- 複雑な3次元地盤をモデル化するため、優れたジェネレーター機能をそなえています。
- 機能追加のための開発ツールFISHプログラミング言語を備えていますので、機能追加が容易です。

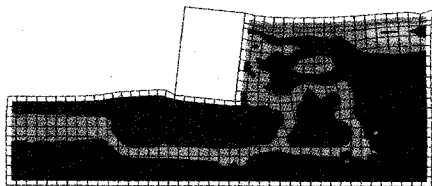
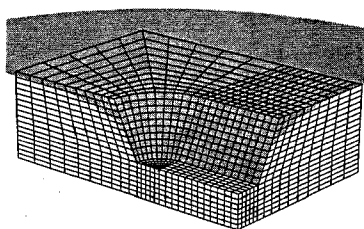
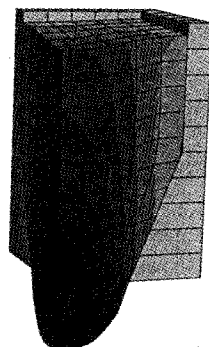


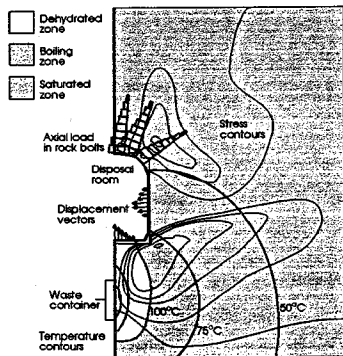
Figure 2. Distorted grid and contours of pore pressure ratio after shaking applied at base



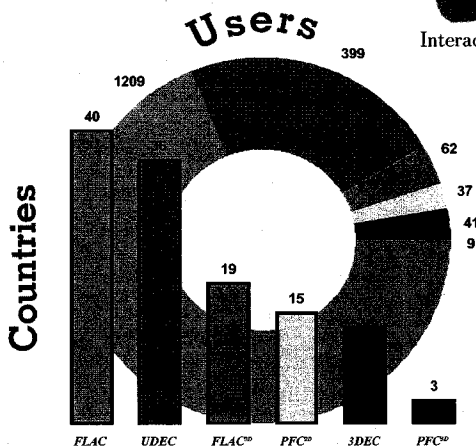
Water flow analysis



Interaction analysis



Thermomechanical conditions five years after nuclear waste emplacement.



■価格(ロード・モジュール)

- FLAC-2D SUN/IBM-PC(標準バージョン)90万円
(Dynamic, Creep, Thermal Optionを含む場合) 140万円
- FLAC-3D SUN/IBM-PC(標準バージョン)190万円
(Dynamic, Creep, Thermal Optionを含む場合)250万円

Itasca Software & Windows 95

Yes, Itasca codes do run under Microsoft Windows95. *Windowsは米国マイクロソフト社の商標です。

* 当社は1988年7月からITASCA社の販売代理店をしています。

OKL 株式会社 応用工学研究室

TEL.03-3437-2164 FAX.03-3437-2652
〒105 東京都港区虎ノ門5-1-4 東都ビル6F
株式会社システムネットワーク内

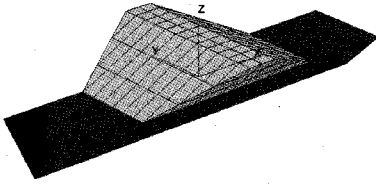


Figure 1. Grid for earth dam and foundation

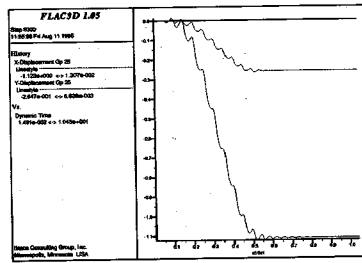


Figure 2. Displacement records (in x- and y-directions) at crest of dam

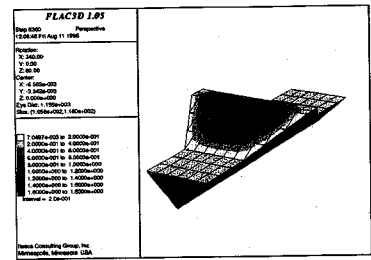
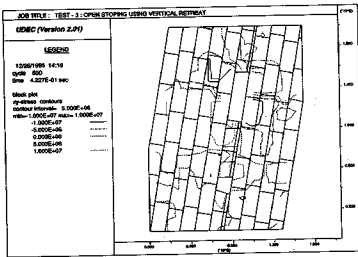


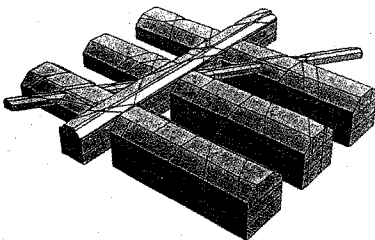
Figure 3. Contours of final displacement magnitude

Dynamic analysis

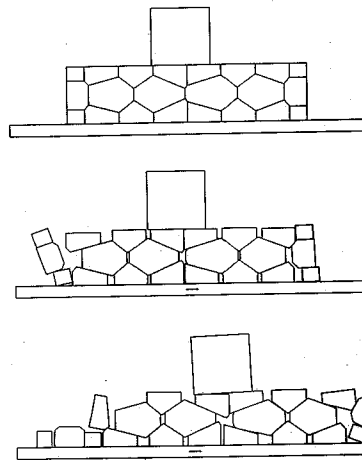
個別要素法プログラムシリーズ



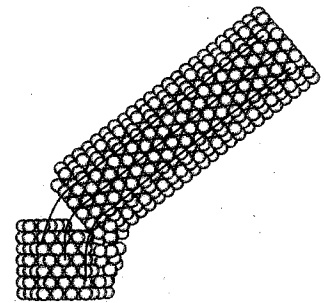
UDEC



3DEC

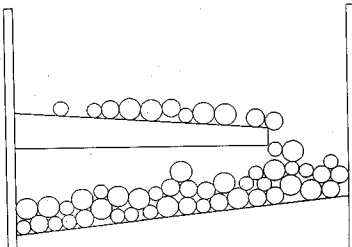


BFLOW



Toppling of pier after horizontal crack forms near base, (reinforcement has pulled out of concrete)

PFC-3D



BALL-Poly

■価格

●ロード・モジュール

- UDEC 3.0 Version SUN.....140万円
- IBM-PC.....130万円
- Barton-Bandis Option.....45万円
- 3DEC SUN/IBM-PC550万円
- PFC-2D SUN/IBM-PC70万円
- PFC-3D SUN/IBM-PC250万円

※尚、UDEC 3.0 Version以前のVersionをお持ちの方は、本Versionに限りソース・コードを提供します。

- ◆FLAC、個別要素法コードとも導入時に移植費等の追加料金はありませぬ。将来のバージョン・アップ代金は初期購入価格の10~15%程度です。但し、比較的開発の新しいPFC-3Dを除きます。
- ◆当社ではこれらソフトによる解析コンサルタント、問題に応じた機能追加も行っています。

大好評！ パソコン用土木構造解析シリーズ

ツージー フロー

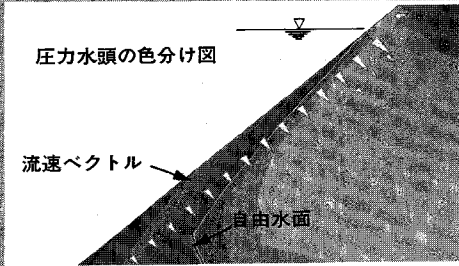
お待たせしました！
ソフトブレンが送る
浸透流解析システム。

2D-Flow

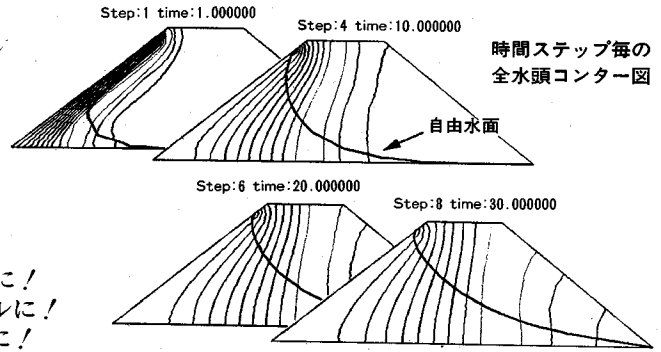
Copyright © SOFTBRAIN Co., Ltd.

新登場！

それぞれ無料体験版を
ご用意しております。



- 複雑な図面入力も、内蔵CADで簡単に！
- 工学的な条件は、画面上でビジュアルに！
- 解析結果も、画面上で手に取るように！



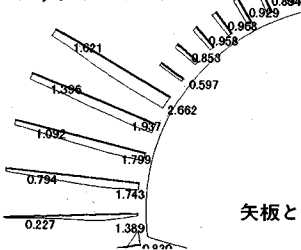
2D-6

for Windows

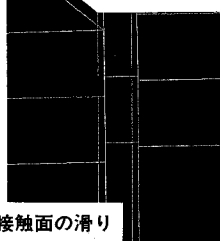


トンネル周辺の応力

ロックボルトの軸力

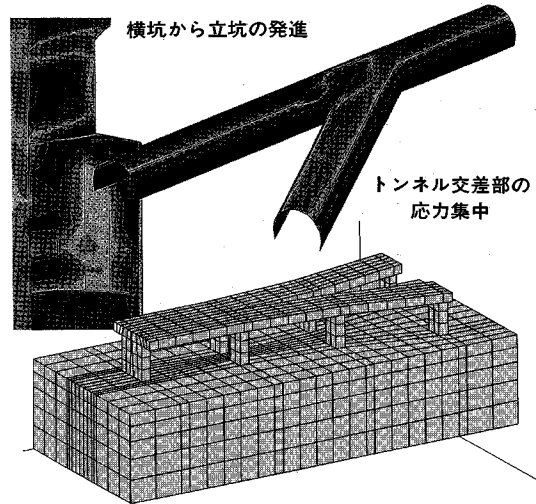


矢板と接触面の滑り



3D-6

Copyright © SOFTBRAIN Co., Ltd.



高架橋合流部分のメッシュ図

- 有限要素の概念は表に出ない、誰にでも使えるシステム。
- 膨大な解析容量と高速解析。5千節点は2、3分で完了。
- CADやワープロ、編集機能を内蔵。報告書作成までOK。

- 強力な3次元表示機能を豊富に実装。表示を自在設定。
- 要素や節点等の有限要素の概念に触れる必要は無し。
- 数万節点でも解析可能。6千節点に2時間の高速解析。

対応 OS: MS-Windows 95/NT3.51



ソフトブレン株式会社 お問合せは 03-5695-1009

本社：〒001 札幌市北区北37条西4丁目王陽ビル
東京営業所：〒103 東京都中央区日本橋茅場町3-8-5 308ビル

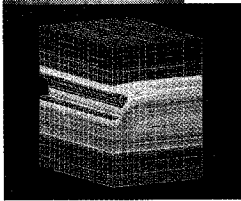
TEL:011-736-7009 FAX:011-736-7449
TEL:03-3663-7009 FAX:03-3663-7008

CIVAS; Civil Engineering Analysis Service

CRC総研がお届けする土木・建設分野向けサービス

地盤解析には 3次元地盤FEM解析プログラム for Windows®

Mr.SOIL-3D 95



【Mr.SOIL-3D for Windows 95】
【トンネル掘削による主応力コンター図】

450本を超える販売実績をもつ地盤FEM解析の定番ソフトです。3D解析を可能にしており、FEM解析初心者でも、使い易い3Dプリポストプロセッサも完備。もちろん2D解析も可能で非線形弾性解析（電中研法、Duncan-Chang法）、弾塑性解析（歪み軟化、硬化）等の多岐にわたる解析が選択できます。ステップ解析機能を有し、施工順序に従って地盤の挙動を把握できます。

'97.1シリーズ

'96.9シリーズ

地下水解析には 広域地下水変動解析プログラム for Windows®

PC/UNISSF 95



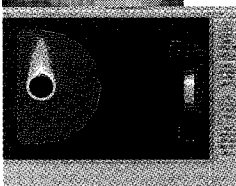
【UNISSF for Windows 95】
【掘削に伴う水位低下コンターと流速ベクトル図】

データ作成、結果の表示等のFEM解析に必要な諸作業がすべてマウスで行える強力なプリポスト機能を備えた浸透流解析ソフトです。準3次元解析版と断面2次元解析版があります。工事施工時の周辺地下水影響解析等の定常/非定常解析が可能です。降雨・揚水井・浸出面が取り扱え、水位・流量の経時変化に加え、浸出点の位置、流量を求めることができます。

実力の解析ツール群 続々登場!

連成解析には 応力・浸透・熱連成解析プログラム for Windows®

CONHEAT 95



【CONHEAT for Windows 95】
【地中温排水パイプ周りの温度と流速分布図】

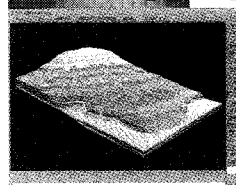
圧密解析から、応力・浸透・熱の連成問題まで解析が可能な2次元FEM解析ソフトです。多段掘削・盛土や降雨条件が扱え、経時観測記録より、変形・透水係数を逆解析で求めることができます。弾性・非線形弾性・弾塑性・弾粘塑性を示す地盤に適用でき、凍結についても適用可能です。プリポスト完備で優れたユーザーインターフェースを実現しています。

'96.11シリーズ

'96.11シリーズ

地質解析には 3次元地質解析プログラム for Windows®

GEORAMA 95



【GEORAMA for Windows 95】
【3次元地質モデル図】

EWS版で好評を得た3D地質解析ソフトのWindows95対応版です。地形データやボーリングデータ等の情報から地質面を3次的に推定後、3D地質モデルを構築し、任意断面及び、3Dの各種地質関連図面を出力表示します。人手に頼っていた地質図作成、地質モデルデータベース管理等に大幅なコストダウンをもたらします。計画立案等のプレゼンテーションを強力にサポートします。

未来設計企業

CRC

株式会社CRC総合研究所

東京本社 〒136 東京都江東区南砂2-7-5
科学システム事業部 営業第1部
TEL:03-5634-5790 FAX:03-5634-7337
西日本事業部 〒541 大阪市中央区久太郎町4-1-3
科学システム営業部
TEL:06-241-4730 FAX:06-241-4188

新製品リリース時に発売キャンペーンを実施!
キャンペーン期間中、新規ユーザー向け特別価格
と旧バージョンとの価格差を縮小し、ご検討
ください。

日本技術開発株式会社

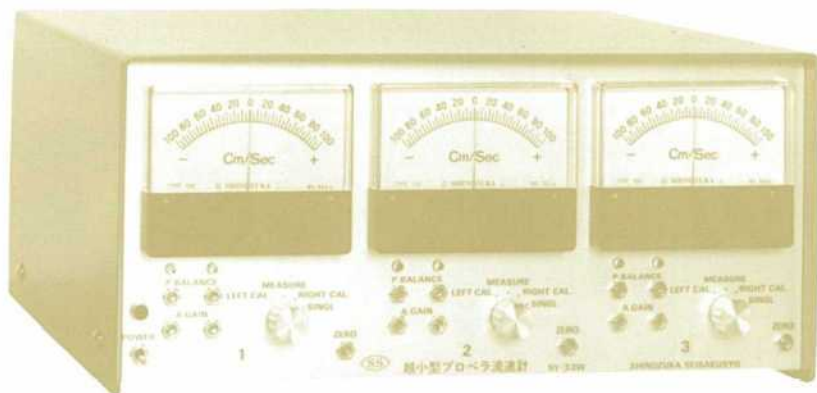


* 8 0 1 5 1 2 0 *

直径3ミリ

水理実験用に理想的

超小型プロペラ流速計 3チャンネル SV-33W型



米粒とプロペラ

● プロペラ検出器軸長

30~50cm, 軸の曲ったものも製作致します。

特 徴

- ◎ 赤外線回転検出で水温や水質に影響されません。
- ◎ 往復流の正逆判別は高感度で確実です。
- ◎ 正逆判別のないシングルのプロペラも使用出来ます。
- ◎ 独自の楕円軸に依り流れを乱すことが非常に小さくて済みます。
- ◎ プロペラが小さいので流速100cm/secで800~900パルスと高い分解能です。

水理実験用測定器専門



篠塚製作所

〒196 東京都昭島市玉川町2-8-21 電話 0425-44-1731