

(75) 平膜状浸漬型MBRモジュールの膜間距離および混合液粘度が膜面せん断応力に与える影響

ラン ム ゴー^{1*}・李 泰日¹・長岡 裕²

¹ 東京都市大学大学院工学研究科都市基盤工学専攻 (〒158-8557東京都世田谷区玉堤1-28-1)

² 東京都市大学工学部都市工学科 (〒158-8557東京都世田谷区玉堤1-28-1)

* E-mail: g0991702@tcu.ac.jp

本研究は、平膜モジュールを用いた浸漬型膜分離活性汚泥法において、膜間距離および混合液粘度が膜面せん断応力に与える影響を明らかにすることを目的として実験を行った。その結果、膜間距離が膜面平均せん断応力に与える影響は小さかったが、膜間距離の拡大により膜面せん断応力の変動がやや大きくなった。膜面平均せん断応力およびその変動は粘度が大きくなると増大した。これらの現象は膜面近傍の液相流速分布および対数分布則に基づく解析により説明された。せん断応力の平均値および変動が大きいほど膜面洗浄効果が増大すると考えられ、混合液の粘度が大きくなるほど膜面での活性汚泥の堆積が抑制されると考えられたが、膜間距離の影響は明らかでなかった。

Key Words: Submerged membrane bioreactor, bubbly flow, shear stress, distance of membrane channel, viscosity

1. はじめに

膜分離活性汚泥法 (MBR; Membrane Bioreactor) は、下水処理過程において活性汚泥と処理水の固液分離に膜を用いて行う方法である。MBR は汚泥の沈殿性に左右されない完全な固液分離が可能であるため、バルキングの影響を受けないほか、最終沈殿池が不要となり、施設の省スペース化が可能であることや、良好な水質の高度処理水を安定して得られることなど多くの長所を有している。現在、主に産業排水処理やし尿処理などに MBR の導入が進んでおり、大規模の下水処理システムにおいてもその適用の検討が進められている。

しかし、MBR は膜の濾過作用によって処理水を得るため、運転の継続に伴って汚泥フロクの膜面堆積や、菌体外高分子ポリマーの膜面および膜内部への吸着により¹⁾、膜の目詰まりが発生して膜の透過性能が低下し²⁾、十分な処理水量が得られなくなるという問題点がある。膜面での汚泥の堆積速度は主に膜面せん断応力に依存し^{3), 4)}、膜面せん断応力が膜の目詰まりに影響を与えることが様々なモデルによって解明されている^{2), 5), 6)}。MBR のより高い運転効率を実現するためには膜面せん断応力を正確に評価する必要がある。

浸漬型膜分離活性汚泥法は、曝気によって発生する気泡流を膜面に堆積する汚泥の洗浄に直接利用できる。中でも平膜モジュールは構造が単純で、取り扱いが容易であるために注目されている。平膜モジュールを用いた浸漬型膜分離活性汚泥法において膜面せん断応力と曝気量の関係が定量化され⁷⁾、時間平均膜面せん断応力は曝気による壁面近傍の液相流速に依存することが明らかにされている⁸⁾。また、気泡流によって生じる膜面せん断応力を数値流体力学 (CFD; Computational Fluid Dynamics) 手法を用いて予測評価する方法などが提案されている⁹⁾。

しかし、これらの気泡流による膜面せん断応力の研究は膜間距離を一定に設定し、水道水を用いて行われており、膜間距離が異なる時の膜面に働くせん断応力については検討されていない。また、活性汚泥のような高粘性液で膜面に働くせん断応力についての研究が少ない。Nagaoka ら¹⁰⁾が行った、曝気による気泡の上昇速度との関係を検討した例はあるが、曝気によって発生する液相流速を正確に測定して行った研究がないのが現状である。

本研究は、平膜モジュールを用いた浸漬型膜分離活性汚泥法において、膜間距離および粘度が膜面せん断応力に与える影響を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

2.1 実験装置及び実験方法

実験は、20℃の水道水（粘度 $1\text{mPa}\cdot\text{s}$ ）および水道水に粘性剤（ソアギーナ ML380, キンダ化学株式会社）を混合し、粘度を $12\text{mPa}\cdot\text{s}$ 及び $20\text{mPa}\cdot\text{s}$ に調整した混合液を用いて行った。活性汚泥と本研究で用いた混合液は性質が異なるが、活性汚泥の粒径は極めて小さいため、それによって生じる見かけの粘性は、本研究で用いた混合液の粘性に似たような挙動を示すと考えた。

実験装置の概略図を図-1 に示す。容積 $30\times 27.2\times 182\text{cm}$ のアクリル板の水槽内に水および混合液を満たし、槽の壁面を平膜モジュールに見立て、せん断応力測定センサーを埋め込んだ。水槽壁面から y （10mm 及び 22mm）の奥行きでアクリル板を設置し、気泡流を上昇させるための曝気領域を設定した。曝気は、エアポンプからの空気を空気流量計で $5\sim 44\text{L}/\text{min}$ の間で調整し、散気管から曝気領域内に発生させた。曝気量の指標としてのエアフラックスは曝気量を気泡の上昇断面積で割って算出した。散気管は、外径 8mm、内径 4mm の塩化ビニル製管に $\phi 0.5\text{mm}$ の穴を 53 箇所あけたものを使用した（図-2）。なお、曝気により散気管の全ての穴から気泡が均等に発生するのを目視で確認してから実験を開始した。

膜面せん断応力の測定は、水槽の底から 68.5cm の位置に設置したせん断応力計（SSK 社製、S10W-1）を用いて行った。せん断応力計の感度部は直径 10mm の円盤である。上昇する気泡によるせん断応力のデータをアンプと A/D コンバータを経由してパーソナルコンピュータに取り込んだ。せん断応力計の最大反響周波数は 30Hz であるため 30Hz 以上の成分は FFT ローパスフィルタでカットした。

液相流速の測定は、DANTEC DYNAMICS 社製レーザー Doppler 流速計（LDV）を用いてせん断応力測定位置の上約 3cm で、水槽の壁面から線方向へ $0.14\sim 11\text{mm}$ の位置で測定し、全てのデータはホールド信号を除去せずに処理した。なお、膜面せん断応力と液相流速の測定は 100Hz、81.92sec のサンプリングを行なった。

3. 結果および考察

3.1 せん断応力の経時変化

せん断応力の経時変化の一例（エアフラックス $0.08\text{m}/\text{s}$ ）を図-3 に示す。せん断応力はいずれも大きく変動しており、粘度 $1\text{mPa}\cdot\text{s}$ でのせん断応力の変動（変動の標準偏差）は膜間距離 10mm で 0.29Pa 、膜間距離 22mm で 0.42Pa で、膜間距離が大きい方が変動が大きかったが、平均せん断応力は膜間距離が小さい方がやや大きかった。

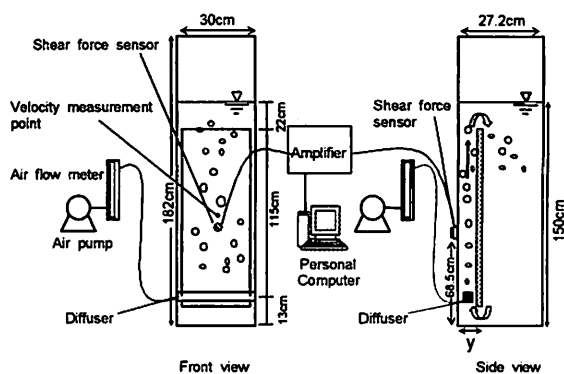


図-1 実験装置概略

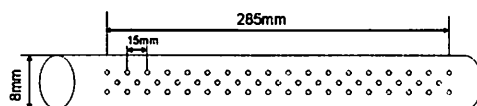


図-2 散気管

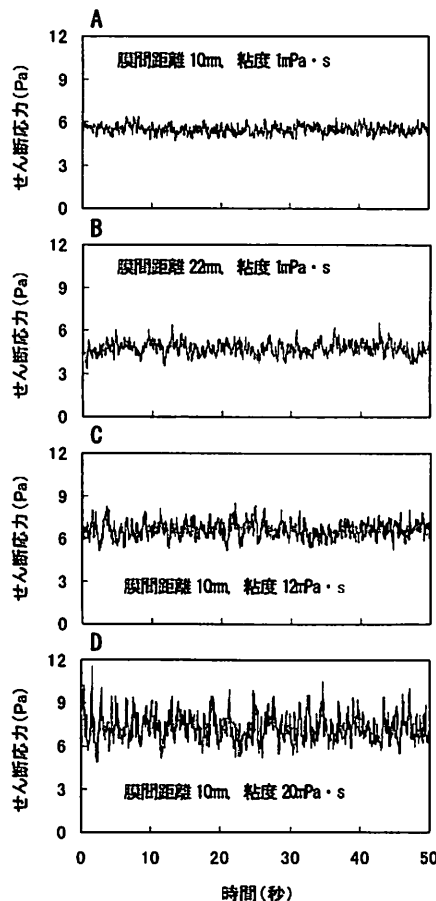


図-3 せん断応力の経時変化の一例
(エアフラックス $0.08\text{m}/\text{s}$)

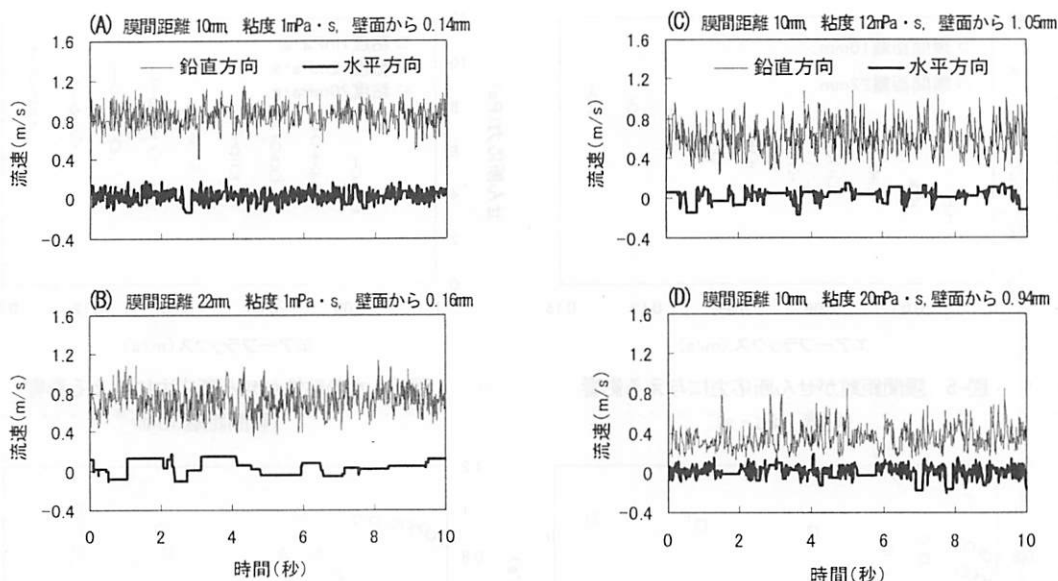


図-4 液相流速の経時変化の一例
(エアーフลักス 0.08m/s)

(図-3A, B) . 膜間距離10mmでのせん断応力の変動のは、粘度 1mPa・s で0.29Pa, 粘度 12mPa・s で0.56Pa, 粘度 20mPa・s で0.92Paであった。平均せん断応力も粘度が大きい方が大きく、水の粘性が上昇するにつれて平均せん断応力とその変動が大きくなった (図-3A, C, D) .

3.2 液相流速の経時変化

図-4に壁面近傍における液相流速の経時変化の一例 (エアーフลักス0.08m/s) を示す。図-4Aと図-4Bを比べると、膜間距離10mm・水での流速は 0.85 ± 0.11 m/s, 膜間距離20mm・水での流速は 0.71 ± 0.13 m/sで、膜間距離が小さい方が液相平均流速はやや大きかったが、その変動はやや小さかった。

膜間距離10mmで、壁面から距離約1mm・粘度20 mPa・sで測定された液相流速は 0.36 ± 0.13 m/sで、粘度12mPa・sでの液相流速 (0.61 ± 0.16 m/s) と比べて約半分程度で、変動もやや小さかった (図-4C, D) . 粘度が高くなると液相平均流速とその変動は小さくなるが、図-3に示したように平均せん断応力と変動が増大して膜面洗浄ヘブラスに働くと考えられる。水平方向の平均流速はそれぞれ約0.02m/sで小さいが、いずれも大きく変動しており、気泡による影響であると考えられる。

3.3 膜間距離がせん断応力に与える影響

図-5に膜間距離がせん断応力に与える影響について、縦軸に膜間距離10mmと膜間距離22mmの粘度 1mPa・sにおける膜面せん断応力を、横軸にエアーフลักスを示した。膜間距離10mmと22mmともに、平均せん断応力はエアーフลักスが大きくなると増大した。平均せん断応力

は膜間距離10mmと22mmの間で差が小さかったが、変動の標準偏差は膜間距離22mmの方が全体的にやや大きかった。膜面平均せん断応力に膜間距離が及ぼす影響は少ないと推定された。その要因として、後述するように膜間距離が異なっても壁面近傍での液相流速の勾配がさほど変わらないからであると考えられる。

3.4 水の粘性がせん断応力に与える影響

混合液の粘性が膜面せん断応力に及ぼす影響について図-6に示し (膜間距離10mm), 縦軸にせん断応力, 横軸にエアーフลักスを示した。各粘度における膜面せん断応力はエアーフลักスが大きくなると増大した。粘度20mPa・sでの膜面平均せん断応力が最も大きく、次に粘度12mPa・sと粘度1mPa・sであった。

粘度1mPa・sにおいて、エアーフลักス0.03m/sでの膜面せん断応力は 3.5 ± 0.3 Pa, エアーフลักス0.14m/sで 6.9 ± 0.4 Paであったが、粘度20mPa・sでは、エアーフลักス0.03m/sで膜面せん断応力は 5.0 ± 0.8 Pa, エアーフลักス0.14m/sでは 9.3 ± 1.4 Paであった (図-6) . 混合液の粘度が高くなるにつれて平均せん断応力だけでなく、その変動も増大した。混合液の粘度が膜面せん断応力に影響を与えることが示唆され、このような現象を解明するため、液相流速分布とせん断応力の関係を調べた。

3.5 液相流速

図-7に膜間距離10mmと22mmにおける液相平均流速分布を示した (粘度1mPa・s, エアーフลักス0.08m/s) . 膜間距離10mmと22mmにおける壁面近傍での液相平均流速は壁面からバルク側に向かって上昇する傾向を示したが、

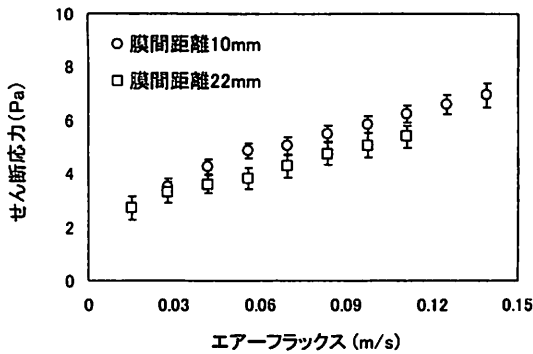


図-5 膜間距離がせん断応力に与える影響
(粘度 1mPa・s)

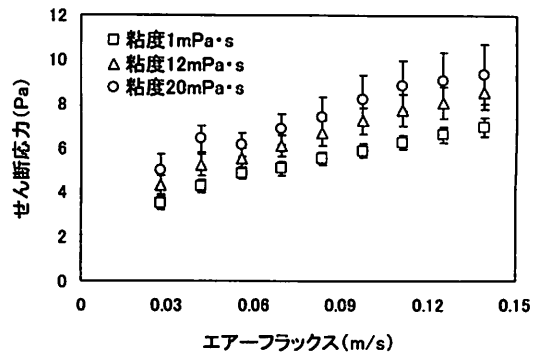


図-6 水の粘性がせん断応力に与える影響
(膜間距離 10mm)

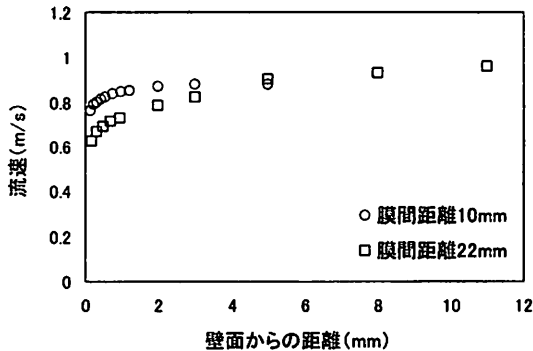


図-7 液相平均流速分布
(粘度 1mPa・s, エアフラックス 0.08m/s)

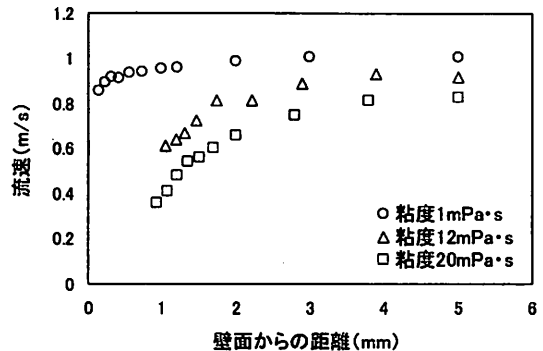


図-8 液相平均流速分布
(膜間距離 10mm, エアフラックス 0.08m/s)

単相流の分布¹¹⁾に比べ、液相平均流速の上昇は比較的に緩やかである。また、このグラフからは壁面近傍における液相平均流速とその勾配に全体的には膜間距離による差が少なかったが、膜間距離が小さい方が壁面近傍での液相平均流速がやや大きかった。膜面平均せん断応力は壁面近傍における液相平均流速分布に依存することが報告されていることから⁹⁾、膜間距離10mmにおける膜面平均せん断応力が膜間距離22mmでの膜面平均せん断応力よりやや大きい結果になったと考えられる。

図-8に粘度1mPa・s、12mPa・sと20mPa・sにおける液相平均流速分布を示した(膜間距離10mm, エアフラックス0.08m/s)。粘度1mPa・sでの液相平均流速が最も早く、次に粘度12mPa・sと20mPa・sであった。壁面から距離約1.1mmの流速測定点で、粘度1mPa・sでの液相平均流速は0.84m/sで、粘度12mPa・sと粘度20mPa・s(0.52m/sと0.33m/s)に比べて差が大きかったが、壁面から距離5mmの流速測定点での液相平均流速は、各々0.88m/s、0.83m/sと0.78m/sで壁面近傍に比べて平均流速の差が少なかった。

膜面平均せん断応力の定義から、式(1)を用いて膜面平均せん断応力と壁面近傍の液相平均流速および液相の

粘度の関係を表せる。

$$\bar{\tau} = \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (1)$$

ただし、 $\bar{\tau}$: 膜面平均せん断応力(Pa), μ : 液相粘度(mPa・s), $\bar{u}$: 液相平均流速(m・s⁻¹), y : 壁面からの距離(mm)である。

混合液の粘性が壁面近傍の液相平均流速の勾配に影響を与えないと仮定した場合、粘度12mPa・sと20mPa・sでの膜面平均せん断応力は、粘度1mPa・sの12倍及び20倍の値を示すと予測される。しかし、本研究の実験結果では、粘性の影響により図-8に示したように壁面近傍における液相平均流速分布とその勾配が著しく小さくなり、その結果、粘性が12倍および20倍になっても膜面平均せん断応力はそれほど値にはならず、図-6に示すような傾向になったと考えられる。以上のことから活性汚泥のような高粘性液で、膜面に働くせん断応力の予測には、壁面近傍の液相平均流速分に及ぼす粘性の影響を考慮する必要があると考えられる。

膜面せん断応力は壁面近傍の液相平均流速勾配に依存することから、膜面せん断応力を正確に把握するために

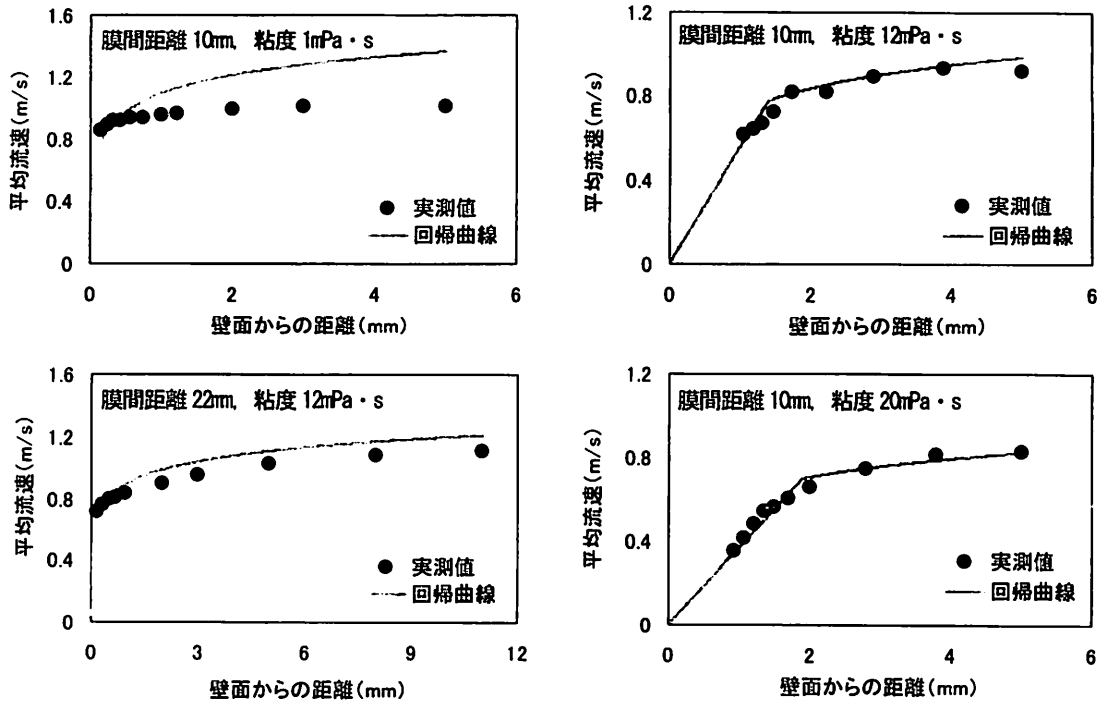


図-9 平均流速分布と回帰曲線（エアーフラックス 0.08m/s）

は各条件下での液相平均流速を正しく評価する必要がある。本研究において、膜間距離、特に粘度の違いによる液相平均流速分布の形状が異なり、その要因は気泡流における混合距離の影響であると考えられ、その現象を説明するためには対数分布則におけるカルマン定数（ k ）を調べる必要があると考えられる。

気泡流における液相流速分布を粘性底層内においては式(3)を、その外側では対数分布則の式(4)を用いて回帰した。気泡流を単相流と仮定して粘性底層の厚さの評価には単相流の式(5)¹³を用いた。なお、液相流速の回帰においては A_s の値を5とし、 k を修正しながら行った。 A_s は壁面上の対数分布側に関する定数であり、実験によって滑面では5.5、粗面では8.5になると報告されており、滑面の狭いチャネルの流れでは5.0が用いられている¹³。本研究における流れ場はアクリル板に囲まれた狭い領域であるため A_s の値を5.0と仮定して解析を行った。

$$\tau = \rho U_*^2 \quad (2)$$

$$\frac{\bar{u}(y)}{U_*} = \frac{U_* y}{\nu} \quad (3)$$

$$\frac{\bar{u}(y)}{U_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{U_* y}{\nu} + A_s \quad (4)$$

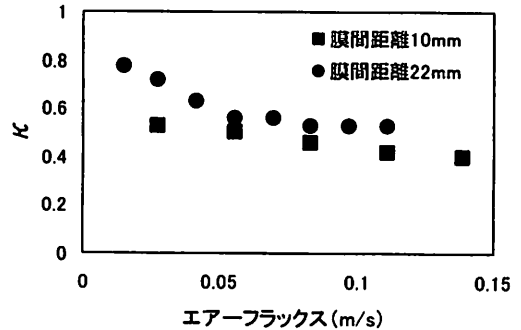


図-10 膜間距離が k （カルマン定数）に与える影響

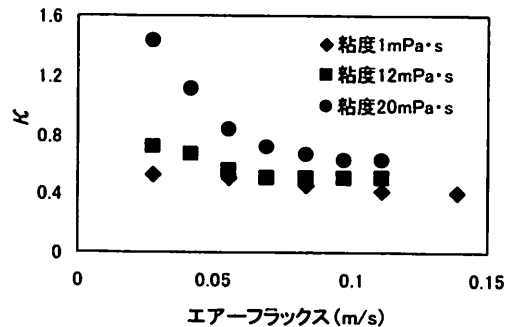


図-11 粘度が k （カルマン定数）に与える影響

$$\delta = 11.6 \frac{\nu}{U} \quad (5)$$

ただし、 ρ : 水の密度、 k : カルマン定数、 U : 摩擦速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、 ν : 液相動粘性係数 ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)、 δ : 粘性底層の厚さ (mm) である。解析により得られた回帰曲線と液相平均流速分布の一例を図-9に (エアーフลักス 0.08 m/s)、エアーフลักスと k の関係を図-10および図-11に示した。なお、水を用いた実験における液相流速分布は極めてなだらかな特性を示しており、回帰曲線によってすべての分布をあわせることが困難であった。したがって、それらのケースの回帰には膜面から 2 mm 以内のデータを用いた。

すべての実験条件においてエアーフลักスが大きくなると k が小さくなった (図-10, 図-11)。膜間距離 22 mm での k は膜間距離 10 mm の k に比べてやや大きかった (図-10)。粘度 $20 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ の k が最も大きく、次に粘度 $12 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ と粘度 $1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ の順であった (図-11)。式 (6) により k と混合距離の関係と考えた場合、本実験の結果により、膜間距離および粘度が大きくなると k が大きくなり、その結果として混合距離が増大すると推定された。混合距離は液相の渦のスケールを表すパラメータで、膜間距離および粘度が大きくなると渦のスケールが大きくなり、その結果として膜面せん断応力の変動が増大すると考えられる。また、エアーフลักスが大きくなると k が小さくなったのは、曝気領域内で気泡の割合が増大して渦のスケールが小さくなったためであると考えられる。

$$l = ky \quad (6)$$

ただし、 l : 混合距離 (mm)、 k : カルマン定数、 y : 壁面距離 (mm) である。

本研究において気泡径は均等な分布特性を示しており、その平均値が約 4 mm であったため、気泡径と膜面せん断応力の平均値および変動との関係を解明するには別途研究が必要であると考えられる。

3.6 液相流速の変動

膜面せん断応力による膜面付着物の堆積抑制の効果を評価する場合、膜面せん断応力の平均値だけでなく膜面せん断応力の変動の標準偏差も重要なパラメータになると予想される。

膜間距離及び粘度による流路断面における液相流速の乱れ強度の一例を図-12に示し (エアーフลักス 0.08 m/s)、縦軸に液相流速の変動の標準偏差と横軸に壁面からの距離 (y) を膜間距離 (d) の 0.5 倍で割って無次元化した。液相流速の変動は膜間距離 10 mm ・粘度 20

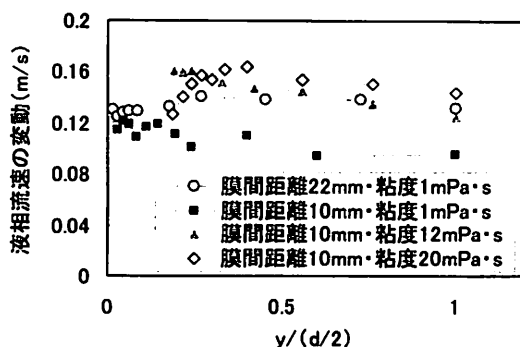


図-12 液相流速の変動の標準偏差分布

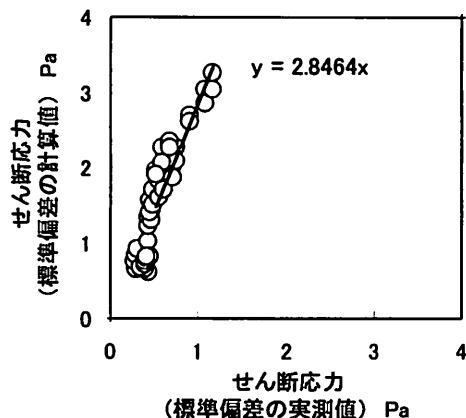


図-13 せん断応力の実測値と計算値の変動の比較

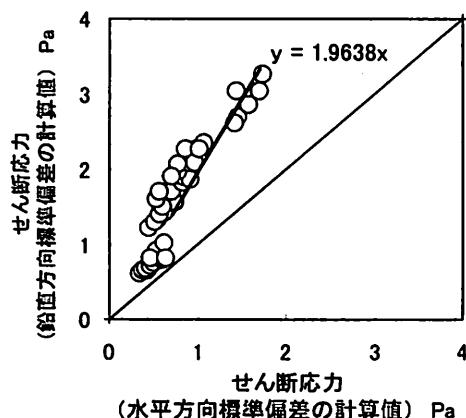


図-14 水平方向と鉛直方向のせん断応力の変動の比較

$\text{mPa} \cdot \text{s}$ で最も大きく、次に膜間距離 10 mm ・粘度 $12 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 、膜間距離 22 mm ・粘度 $1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ と膜間距離 10 mm ・粘度 $1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ であった。膜間距離及び粘度が大きくなると液相流速の変動が増大することが確認された。

単相流の流れ場における流速の乱れ強度の分布は、粘性底層の外縁付近でピークをもつような分布になる。しかし、図-12 からは気泡流における液相流速の乱れ強度

は堅調なピークをもたず、流れ場全体において発生していることがえる。その要因として気泡の影響によって曝気領域内の流れ場全体で大きな乱れが生じているためであると考えられる。

3.7 膜面せん断応力の変動の評価

藤田ら¹⁰⁾は膜ファウリングの予測モデルにおいて膜面平均せん断応力を用いて膜面付着物の剥離効果を評価したが、そのような評価方法では膜間差圧の実測値と一致しないと報告し、膜面せん断応力の変動の重要性を指摘した。膜面せん断応力が膜面近傍の液相流速に依存することから、膜面せん断応力の変動と膜面近傍の液相流速の変動の関係は以下の式(7)を満たすと仮定できる。

$$\sqrt{\tau} = \mu \frac{\partial \sqrt{u}}{\partial y} \quad (7)$$

ただし、 τ : せん断応力の変動 (Pa), u : 液相流速の変動 (m/s) である。

せん断応力の変動の標準偏差は、各条件における壁面からもっとも近い測定点における液相流速の変動の標準偏差を用いて式(7)により計算した。その計算結果と実測値の変動の関係を図-13に示した。計算による膜面せん断応力の変動は実測値に比べて約2.8倍大きい値を示した。実測値の膜面せん断応力の変動が計算値より小評価されたのは、せん断応力センサーの計測部分におけるせん断応力の時間変動が相殺される現象による影響であり⁹⁾、本研究で得られた結果は妥当であると考えられ、せん断応力計によるせん断応力の変動が実際の変動より小さく評価されていることが確認された。

また、図-4に示したように液相流速の変動は水平方向にも現れていることから、膜面せん断応力の変動は、鉛直方向だけでなく、水平方向にも働くと考えられる。せん断応力の変動が膜目詰まりの評価において重要なパラメータであることから、鉛直方向の変動だけでなく、水平方向の変動も評価する必要があり、鉛直方向の計算と同様の手法を用いて水平方向におけるせん断応力の変動の標準偏差の計算を行った。得られたせん断応力の水平方向における変動の標準偏差の計算値と鉛直方向の変動の標準偏差の計算値を比較したものを図-14に示した。せん断応力の水平方向の変動は鉛直方向の約半分の値を示した。

膜面での吸引による汚泥の堆積とせん断応力による剥離を表したモデルにおいて、黒坂ら¹⁰⁾は有効せん断応力について式(7)を用いて示し、係数 η を3とした。しかし、係数 η の決定は実験に基づいたものではない。

$$\tau_{\text{effec.}} = \bar{\tau} + \eta \tau' \quad (7)$$

係数 η 決定には、鉛直方向、水平方向および膜面垂直方向の変動を考慮する必要がある。水平方向と膜面垂直方向の変動の標準偏差が等しいと仮定した場合、本研究で得られた水平方向と鉛直方向の変動の標準偏差との関係を用いて係数 $\eta \geq 2$ であると推定できる。

4. まとめ

本研究は、平膜モジュールを用いた浸漬型膜分離活性汚泥法において、膜間距離および混合液粘性が膜面せん断応力に与える影響をについて調べた。その結果、以下のような知見が得られた。

1. 膜間距離が膜面平均せん断応力に与える影響は小さかったが、膜間距離の拡大により膜面せん断応力の変動がやや大きくなった。また、混合液の粘度が高くなるにつれて膜面平均せん断応力およびその変動が増大した。これらの現象は膜面近傍の液相流速分布の解析により説明された。
2. 気泡流における液相流速分布は対数分布則におけるカルマン定数を修正することにより評価できることを示し、その結果から気泡流における混合距離は混合粘度および膜間距離に依存することが示された。
3. 液相流速の乱れ強度から膜面せん断応力の変動を計算する方法を提案し、計算値は実測値より約2.8倍大きいことが確認された。また、水平方向の変動の計算値は鉛直方向の計算値の約1/2になることから、水平方向の変動の重要性が示唆された。
4. せん断応力の平均値および変動が大きいほど膜面洗浄効果が増大すると考えられ、混合液の粘度が大きくなるほど膜面せん断応力とその変動が大きくなるため、膜面での活性汚泥の堆積が抑制されると考えられたが、膜間距離の影響は明らかでなかった。

参考文献

- 1) Nagaoka H., Ueda S., and Miya A.: Influence of bacterial extracellular polymers on the membrane separation activated sludge process, *Water Science and Technology*, Vol.34, No. 9, pp. 165-172, and 1996.
- 2) Nagaoka H., Yamanishi S., and Miya A.: Modeling of biofouling by extracellular polymers in a membrane separation activated sludge system, *Water Science and Technology*, Vol. 38, No. 4-5, pp. 497-504, and 1998.
- 3) 尾崎則寛, 山本和夫: 平膜による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, 土木学会論文集, No. 587/VII-6, pp. 37-48, 1998.
- 4) Ozaki, N. and Yamamoto, K.: Hydraulic effects on sludge accumulation on membrane surface in crossflow filtration, *Water Research*, Vol. 35, No. 13, pp. 3137-3146, 2001.
- 5) Cho J. W., Ahn K. H., Lee Y. H., Lim B. R. and Kim J. Y.:

- Investigation of biological and fouling characteristics of submerged membrane bioreactor process for wastewater treatment by model sensitivity analysis, *Water Science and Technology*, Vol. 49, No. 2, pp. 245-254, 2004.
- 6) LiX. Y., and Wang, X. M.: Modeling of membrane fouling in a submerged membrane bioreactor, *Journal of Membrane Science*, Vol. 278, pp. 151-161, 2006.
- 7) Nagaoka H., Kurosaka M., Shibata N. and Kobayashi M.: Effect of bubble flow velocity on drag-force and shear stress working on submerged hollow fibre membrane, *Water Science and Technology*, Vol. 54, No.10, pp. 185-192, 2006.
- 8) 李泰日, 長岡裕: 浸漬型膜分離活性汚泥法において気泡径及び曝気量が膜面せん断応力に与える影響, 環境工学研究論文集, Vol. 44, pp. 143-149, 2007.
- 9) 李泰日, 長岡裕: 数値流体力学(CFD)手法を用いた浸漬型膜分離活性汚泥法における膜面せん断応力の評価, 土木学会論文集G, Vol.65, No.1, pp. 8-15, 2009.
- 10) H. Nagaoka, A. Tanaka and Y. Torizuka : Measurement of effective shear stress working on flat-sheet membrane by air-scrabbling *Water Science and Technology*, Vol.3, No. 5-6, pp. 423-428, 2003.
- 11) 大場謙吉: 気液二相流の微細構造とレーザ測定, 混相流の流動特性と測定法, 第4回混相流シンポジウム講演論文集, pp. 45-67, 1985.
- 12) 日野幹雄: 明解水理学, pp. 81-101, 丸善株式会社出版, 1983.
- 13) 日野幹雄: 流体力学, pp. 318-329, 株式会社朝倉出版, 1996.
- 14) 藤田泰弥, 長岡裕: 膜面せん断力を考慮した浸漬型膜分離活性汚泥法の膜間差圧上昇モデルの検討, 下水道研究発表会講演集, Vol.44, pp. 154-156, 2007.
- 15) 黒坂正和, 有裕輔, 長岡裕, 柴田規孝, 小林真澄: 浸漬型膜モジュール近傍の流速が膜壁面応力に与える影響, 日本水環境学会年会講演集, Vol. 40, pp. 362, 2006.

(2009. 5. 22受付)

Effect of distance of membrane channel and sludge viscosity on membrane surface shear stress in MBRs

Hlwan Moe Zaw¹, Tairi LI¹, Hiroshi NAGAOKA²

¹ Graduate School of Civil Engineering, Tokyo City University

² Dept. of Urban and Civil Engineering, Tokyo City University

This study was carried out to clarify the effects of distance of membrane channel and sludge viscosity on shear stress in flat sheet membrane of MBRs. As a result, the influence that the distance of membrane channels on time-averaged upward-direction shear stress on the membrane surface was small. However, shear stress variation values have increased with the increase of distance of membrane channel. About the influence of the viscosity, time-averaged shear stress and shear stress variation values increased with the increase of viscosity. These phenomena were explained by analyzing water flow velocity distribution of near the membrane surface. Large scale eddies induced by bubbly flow were observed through analyzing water velocity distribution using logarithmic law in the reactor. The results from logarithmic analysis were suggesting that the eddy scale in bubbly flow depend on distance of membrane and liquid phase viscosity.