

〈研究発表〉

膜分離活性汚泥法における膜面洗浄の高効率化のための実験的検討

山野井 一郎¹⁾, 陰山 晃治¹⁾

(株)日立製作所 エネルギー・環境システム研究所 (茨城県日立市大みか町 7-2-1, E-mail: ichiro.yamanoi.rt@hitachi.com)¹⁾

概要

膜分離活性汚泥装置の課題である膜面洗浄の高効率制御を目的とした解析技術の構築に向けて、膜面の洗浄効果に大きく影響するせん断応力に対する、装置仕様、運転条件の影響を検討する実験を実施した。その結果、1) ガス空塔速度の増加に伴いせん断応力が向上する、2) 気泡径が平膜間距離より大きい場合、小さい場合と比較してせん断応力は増加する、3) せん断応力が極大となる平膜間距離と気泡径の関係が存在することが明らかとなった。これらより、送風量、気泡径、平膜間距離の適正化により、膜面洗浄を最適化できることが示唆された。

キーワード: 膜分離活性汚泥法 (MBR)、平膜、洗浄、気泡径、せん断応力

1. はじめに

標準活性汚泥法では、生物反応槽の後段に最終沈殿池が設けられており、重力により活性汚泥を沈降させ、上澄液を処理水として分離している。この方式は、水質、流量の影響を受けやすく、汚泥の越流対策など、清澄な処理水を得るための運転管理に多くの労力が費やされてきた。

膜分離活性汚泥法は、これらの問題を解消する方式で、活性汚泥より小さい孔のろ過膜で処理水と活性汚泥を分離する。このため、汚泥や濁質の流出がなく、さらに高 MLSS 濃度 (従来比で 4~10 倍) での運転が可能であり、処理時間の短縮、装置の小型化といった利点がある。一方で、膜面の目詰まり防止のために、常時、曝気洗浄する必要があり、曝気に用いるブロウの電力消費量が大きい点が課題となっている。現状のブロウの送風量は経験的に決定されているが、膜面の洗浄効果を保ちつつ送風量を最適に制御するためには、曝気と膜面洗浄の関係を解明する必要があり、そのための研究¹⁾がなされている。

本研究では、膜面洗浄の高効率制御を目的とした解析技術の構築に向けて、膜面洗浄に関係するせん断応力への影響因子 (送風量、平膜間距離、気泡径) を、模擬平膜間流路を用いた可視化実験により明らかにした。

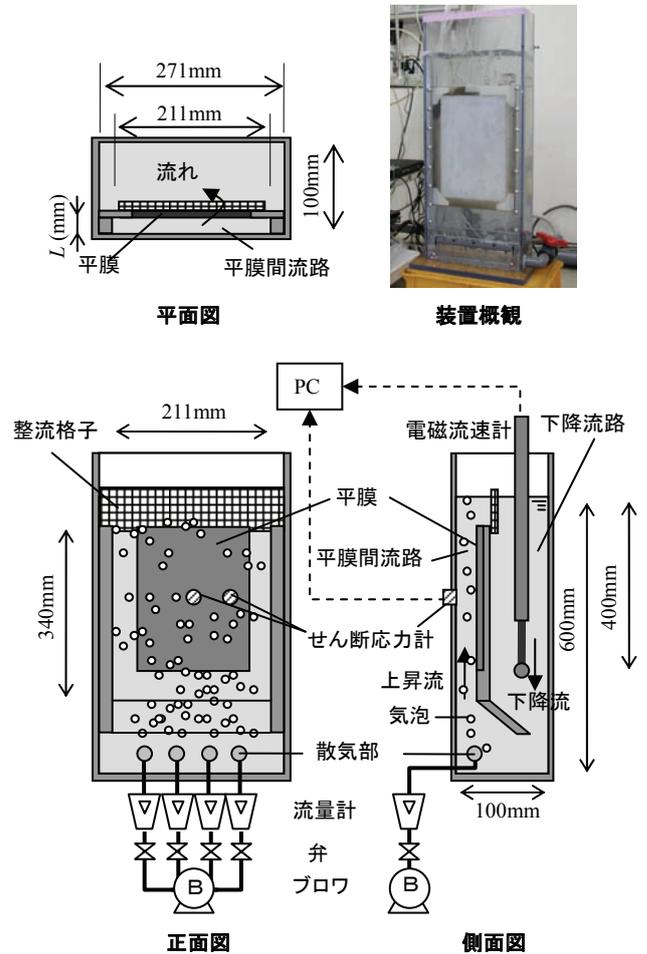


Fig.1 Experimental apparatus

Table 1 Experimental conditions

送風量 Q(L/min)	平膜間距離 L(mm)	散気部
1.2, 2.4, 4.8, 9.6	5, 7, 10	散気孔 (φ6mm), 散気球 (粒子径100~120μm)

Table 2 Average bubble diameter D(mm) effected by aeration conditions

		散気部1箇所あたりの送風量 Q/4			
		0.30 L/min	0.60 L/min	1.2 L/min	2.4 L/min
平均気泡径 D(mm)	散気孔	11	14	18	21
	散気球	3.7	4.2	6.5	10

2. 実験装置および方法

実験装置の概要を Fig.1 に示す。271W×100D×700H(mm)の水槽に、高さ 600mm まで水道水(水温 8.0~13.0℃)を満たし、水槽下部に設置した4箇所の散気部から空気を曝気した。弁の開度を調整することで4箇所の散気部からの送風量を等量とし、水平方向の気泡分布を均一化した。散気部より噴出した気泡と、その浮力で上昇する槽内水は、211mm×L(mm)の平膜間流路へと流入する(L:平膜間距離)。平膜間流路を上向流で通過した槽内水は、下降流路で下降流となり水槽内を循環する。

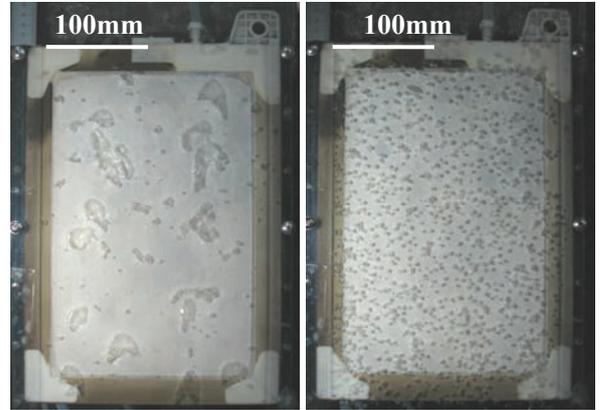
実験パラメータとして、送風量 Q(L/min)、平膜間距離 L(mm)、散気部を変化させた。実験パラメータの詳細を Table 1 に示す。

本実験では、平膜間流路内の流動特性を解析するため、平膜間流路を上昇する気泡の撮影と、膜面のせん断応力の測定、下降流流速の測定を実施した。せん断応力の測定には、水槽壁面側に設置したせん断応力計(S10W-02、エス・エス・ケイ)を用いた。測定面はφ10mm である。膜全体の平均的なせん断応力を求めるため、せん断応力の測定箇所を平膜間流路の中央部、右に100mm離れた右部の2箇所とし、サンプリング周波数 10Hz、測定時間 30 秒で3回測定した。下降流流速の計測には、電磁流速計(ACM3-RS、アレック電子)を用いた。電磁流速計での計測箇所は水深400mm、水槽奥面から35mmの点で、正面中心線上と、中心から左右45mm、左右90mmの5箇所とし、サンプリング周波数 1Hz、測定時間 60 秒での平均を測定値とした。

3. 実験結果と考察

3.1 平均気泡径

撮影した画像例を Photo 1 に示す。平膜間流路に設置された平膜上を気泡が通過しており、φ6mmの散気孔からは平膜間距離よりも大きな気泡が、粒子径 100~120μmの散気球からは平膜間距離以下の気泡が生成した。これらの画像の気泡部分を二値化処理し、気泡の体積累積頻度が50%となる気泡径を、平均気泡径 D(mm)とした。Table 2に散気部1箇所あたりの送風量 Q/4と平膜間流路内の平均気泡径 Dの関係を示す。送風量の増加にともない平均気泡径は大きくなっており、



(a) 散気孔 (b) 散気球

Photo 1 Bubble shapes through the channel between simulated flat-sheets (L=5mm, Q=4.8L/min)

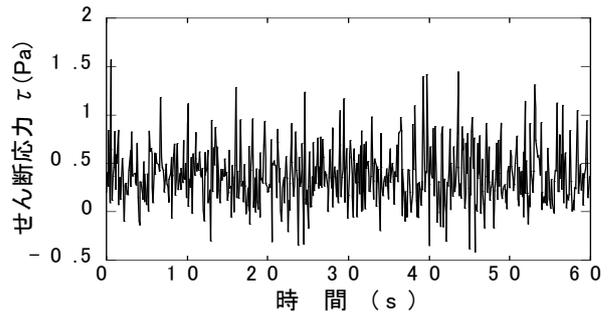


Fig.2 An example for a measured shear stress profile (Measured at middle, L=10mm, Q=4.8L/min, Glass ball filter)

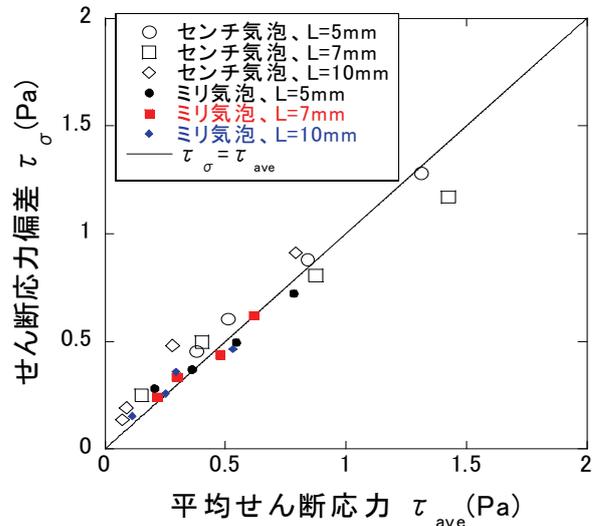


Fig.3 Average shear stress and shear stress deviation

散気球では3.7~10mm、散気孔では1.1~2.1cmであった。以後、散気球から生成する気泡をミリ気泡、散気孔から生成する気泡をセンチ気泡と呼ぶ。

3.2 セン断応力

せん断応力の実測例を Fig.2 に示す。せん断応力の測定値は、気泡の通過やそれに誘起される液体流れの乱れによって激しく振動した。その平均値と偏差はいずれも膜面の洗浄効果に影響する可能性があり、これらの関係を求めた。水平方向のせん断応力の平均値を求めるため、中央部の平均を τ_c (Pa)、右側の平均を τ_r (Pa) として、平均せん断応力を $\tau_{ave}=(\tau_c+2\tau_r)/3$ (Pa) と定義した。また、中央部のせん断応力の偏差を $\tau_{\sigma c}$ (Pa)、右側の偏差を $\tau_{\sigma r}$ (Pa) として、せん断応力偏差を $\tau_{\sigma}=(\tau_{\sigma c}+2\tau_{\sigma r})/3$ (Pa) と定義した。

平均せん断応力 τ_{ave} とせん断応力偏差 τ_{σ} の関係を Fig.3 に示す。平均せん断応力 τ_{ave} とせん断応力偏差 τ_{σ} は、気泡径、平膜間距離によらずほぼ一致した。洗浄効果に対する平均せん断応力とせん断応力偏差の寄与分は不明であるが、その値は同程度であることから、一方が既知であれば洗浄力を推測できると考えられる。したがって、これより先、平均せん断応力 τ_{ave} のみを示す。

ガス空塔速度 U_g と平均せん断応力 τ_{ave} の関係を Fig.4 に示す。ここでのガス空塔速度 U_g は送風量 Q を平膜間流路の断面積で除した値である。センチ気泡、ミリ気泡いずれの場合もガス空塔速度 U_g の増加にともない平均せん断応力 τ_{ave} は増加した。平均せん断応力 τ_{ave} は、センチ気泡の場合で、ミリ気泡の場合よりも増加した。また、ミリ気泡の場合では、平膜間距離 L によらず、ガス空塔速度の関数により表現できたが、センチ気泡の場合では、例えば平膜間距離 $L=7\text{mm}$ 、ガス空塔速度 $U_g=0.054\text{m/s}$ のように、平均せん断応力 τ_{ave} が、 $L=5\text{mm}$ 、 $L=10\text{mm}$ で類推される値よりも大きくなる条件が見られた。

3.3 ボイド率と液体上昇速度

ガス空塔速度 U_g (m/s) とボイド率 α (-) の関係を Fig.5 に示す。ボイド率 α は平膜間流路に占める気泡体積比率である。ボイド率 α は平膜間距離 L によらず、ガス空塔速度 U_g にほぼ比例した。

ガス空塔速度 U_g (m/s) と液体上昇速度 u_l (m/s) の関係を Fig.6 に示す。液体上昇速度 u_l は、下降流流速より求めた平膜間流路内の見かけの液体速度である液空塔速度を、 $(1-\alpha)$ で除した値である。液体上昇速度 u_l はガス空塔速度 U_g の増加にともない増大し、センチ気泡の場合よりミリ気泡の場合で大きくなった。

エネルギーの保存より、気泡の浮力によるエネルギーは、主に壁面のせん断応力と液体速度に分配されていると考えられる。実際、Fig.4 で示したとおり、平均せん断

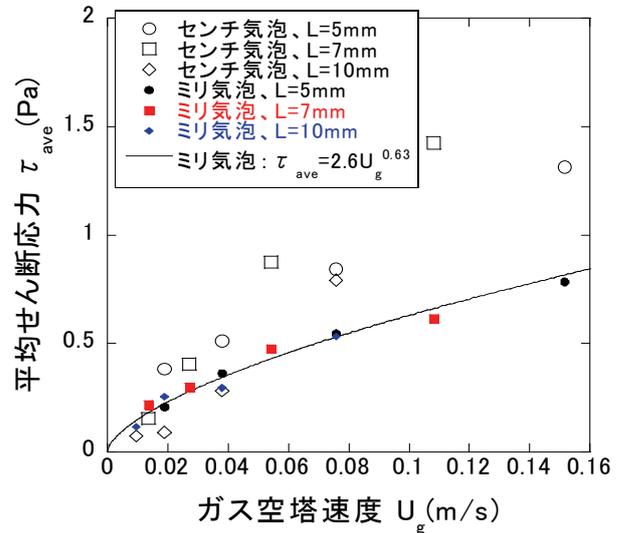


Fig.4 Gas superficial velocity and average shear stress

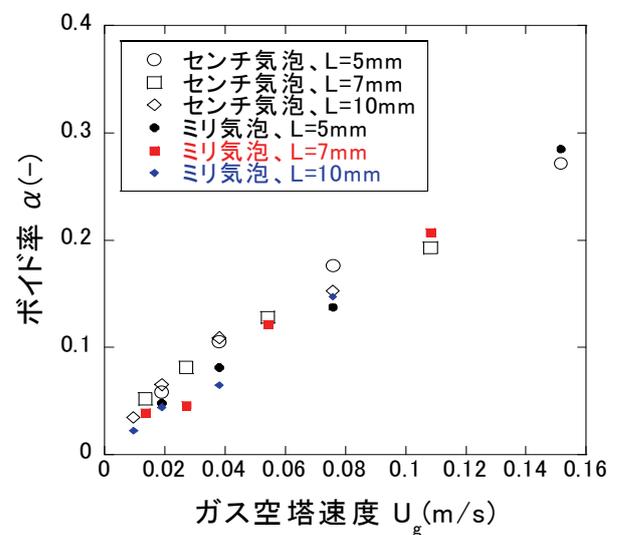


Fig.5 Gas superficial velocity and void fraction

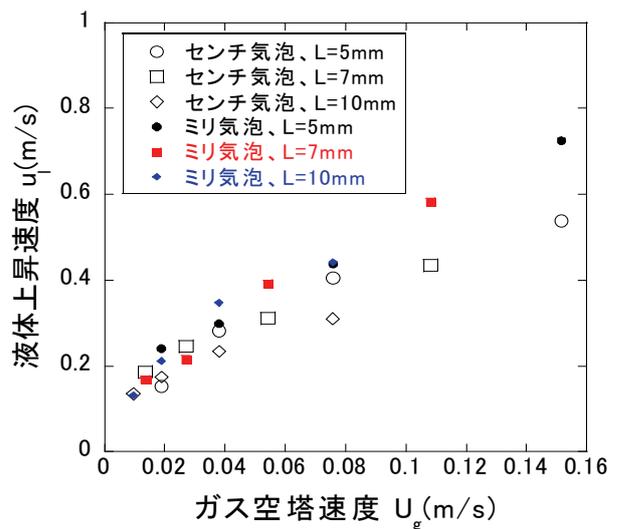


Fig.6 Gas superficial velocity and liquid upward velocity

応力 τ_{ave} は、液体上昇速度 u_l とは逆に、センチ気泡の場合で、ミリ気泡の場合より大きくなっており、センチ気泡の場合では、壁面のせん断応力、すなわち壁面摩擦を増大するメカニズムが働いていると考えられる。

3.4 摩擦係数

気泡による壁面摩擦の影響を把握するため、平膜間流路を流れる気液二相流の液体上昇速度 u_l と、ボイド率 α から、膜面に作用する推算せん断応力 τ_{est} (Pa) を導出する。

平膜間流路のような二平板間流れにおける单相流の摩擦係数 λ は、以下の実験式(1)で与えられる²⁾。

$$\lambda = \begin{cases} \frac{96}{Re} & (\text{層流}) \\ 0.3164 Re^{-0.25} & (\text{乱流}) \end{cases} \quad (1)$$

二平板間流れにおけるレイノルズ数 Re は、次式(2)で与えられる。

$$Re = \frac{ud_h}{1000\nu} \quad (2)$$

ここで、 ν (m^2/s) は流体の動粘度で、 d_h (mm) は流路断面面積と流路周囲長さの比の4倍で定義される水力直径である。また、 $Re \leq 2300$ を層流、 $Re > 2300$ を乱流とみなした。

気液二相流である平膜間流路内流れでの流体密度を、液体密度 ρ_l (kg/m^3) とボイド率の関数 $(1-\alpha)$ との積とみなし、膜面にかかる推算せん断応力 τ_{est} を次の式(3)で定義する³⁾。

$$\tau_{est} = \frac{\lambda_l}{8} \rho_l (1-\alpha) u_l^2 \quad (3)$$

$\lambda_l(-)$ は気液二相流の摩擦係数である。以後の解析には、 $10^\circ C$ の水の物性値 $\rho_l = 999.7 kg/m^3$ 、 $\nu_l = 1.307 \times 10^{-6} m^2/s$ ⁴⁾ を用いた。

推算せん断応力 τ_{est} と平均せん断応力 τ_{ave} の関係を Fig.7 に示す。推算せん断応力 $\tau_{est} > 0.5 Pa$ の領域に着目すると、ミリ気泡の場合では、平均せん断応力 τ_{ave} は推算せん断応力 τ_{est} よりも小さく、センチ気泡の場合では大きくなる事が分かる。

ここでの平均せん断応力 τ_{ave} と推算せん断応力 τ_{est} の比を式(3)の摩擦係数 λ_l に乗じた値が、気液二相流の真の摩擦係数とみなせる。すなわち、液体上昇速度 u_l 、ボイド率 α の気液二相流が、平膜間流路に垂直に流入する際、平膜間距離と気泡径が同程度あるいは気泡径が小さい場合では、気液二相流の真の摩擦係数は单相流の摩擦係数よりも小さくなる。一方、気泡径が平膜間距離より大きな気泡の場合、真の摩擦係数は、单相流の摩擦係数よりも大きくなる事が明らかとなった。

以上をまとめると、平膜間距離と同程度あるいは小さい気泡径であるミリ気泡の場合では、壁面のせん断応力、すなわち壁面摩擦が低減することにより、液体上昇速度が大きくなったと考えられる。一方、平膜間距離より大きなセンチ気泡の場合では、壁面摩擦が大きいため、液体上昇速度が小さくなったと考えられる。これらより、平膜間距離よりも大きな気泡を用いることで、せん断応力を増大できることが分かった。

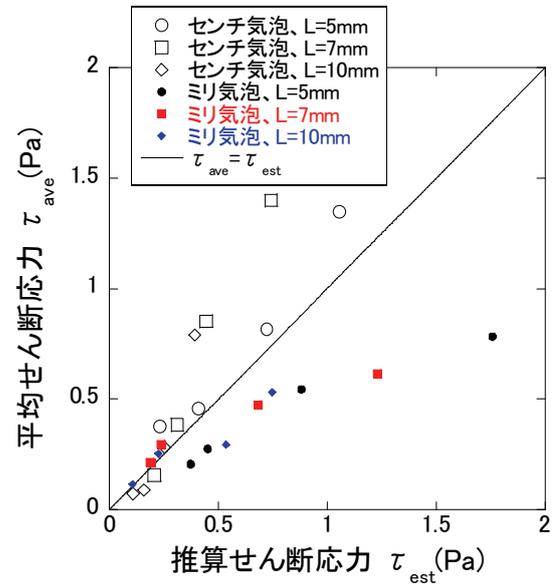


Fig.7 Estimated shear stress and average shear stress

4. 結言

膜分離活性汚泥装置の課題である膜面洗浄の高効率制御を目的とした解析技術の構築に向けて、膜面の洗浄効果に大きく影響するせん断応力に対する、装置仕様、運転条件の影響を検討する実験を実施し、以下のことが明らかとなった。

- (1) 気泡流に曝される膜面上のせん断応力は激しく変動し、その平均値と偏差の比は、送風量、気泡径、平膜間距離によらず、同程度であった。
- (2) ガス空塔速度(送風量/平膜間流路面積)の増加に伴い、平膜間流路内のボイド率、液体上昇速度、膜面のせん断応力が増加した。
- (3) 気泡径が平膜間距離より大きい場合で、小さい場合よりも液体上昇速度が小さくなった。一方、せん断応力は逆の関係となり、気泡径が平膜間距離より大きい場合にせん断応力が大きくなった。
- (4) 気泡径が平膜間距離より大きい場合に、せん断応力が極大となる平膜間距離と気泡径の関係が存在した。

以上より、送風量、気泡径、平膜間距離を適正化することで、膜面に作用するせん断応力を最適に制御でき、運転コスト、環境負荷、メンテナンス頻度を削減できることが示唆された。

[参考文献]

- 1) 李、長岡: 浸漬型平膜を用いた膜分離活性汚泥法における気泡流が膜面洗浄力に与える影響、第44回下水道研究発表会講演集、pp.145-147(2007)
- 2) 日本機械学会編: 機械工学便覧 A5 流体工学、p.76(1986)
- 3) 松永成徳、富田侑嗣、西道弘、塚本寛: 流れ学—基礎と応用—、pp.74-77(1991)
- 4) 国立天文台編: 理科年表、pp.442-447(1993)