

# 膜分離活性汚泥法（MBR）における曝気による 膜面洗浄高効率化へ向けた研究

水圏環境工学・長岡研究室

丸林 修

浸漬型膜分離活性汚泥法における施設の省エネルギー化実現に向け、膜ユニットに邪魔板を設置し、流体の挙動を制御することによるファウリング低減の可能性を検討した。散気管より発生したエアを邪魔板に溜めてから放出させることにより、粗大気泡を発生させることができ、膜面空間平均せん断応力が通常の曝気方法よりも 1.5 倍程度大きくできることが示された。また、邪魔板より発生した気泡は、スラグ流に近い状態で膜間へと侵入し、瞬間的に大きなせん断応力を膜面に与えることが示され、スラグ流がファウリング抑制に効果的である可能性が示唆された。本研究により、MBR への邪魔板適用の有用性が示唆された。

**Key Words :** *membrane bioreactor, flat-sheet membrane, membrane baffles, bubble flow, shear stress*

## 1. はじめに

膜分離活性汚泥法（MBR, Membrane Bioreactor）は処理プロセスに沈殿分離を含まないことから施設の省スペース性に優れ、また膜孔径と懸濁物質の分画サイズの違いを利用して分離を行うため、ある一定以上の処理水質を安定して確保できるといった特徴を有しており、近年世界中で導入実績が増えている<sup>1)</sup>。

しかしながら、継続運転に伴い、膜面や膜内部に濁質や細菌が蓄積することにより、膜の閉塞・目詰まりであるファウリングが発生する<sup>2)3)</sup>。膜ファウリングは圧力損失、透過性能の低下を引き起こすため、定期的に膜の薬品洗浄や物理洗浄を行う必要があるが、廃液の処理や手間などコストの面で指摘がされている。

浸漬型膜分離活性汚泥法において、ファウリングを抑制する方法として広く利用されているのが曝気によるクロスフロー流速により、膜面にせん断応力を発生させ、濁質物質の付着・堆積を抑制する方法である。曝気によるエアスクラビングがファウリング抑制に効果的であることは知られているが、一方で、MBR の電力消費の約

60%が曝気によるものという報告もあり<sup>4)</sup>、MBR を今後普及させていく上で、曝気設備の省エネルギー化が重要な課題である。

曝気により発生する膜面せん断応力の評価はこれまでに多くの研究がなされてきた。Yamanoi ら<sup>5)</sup>や李ら<sup>6)</sup>は、せん断応力に影響を与える因子として、気泡径、曝気強度、膜間距離を挙げ、これらの因子には最適な設定条件があることを示唆した。また、MBR に固形担体を投入することで膜面せん断応力を大きくし、ファウリング低減

が可能であることも報告されている<sup>7)8)</sup>。これらの研究報告から膜面せん断応力が膜ファウリングの発生機構と密接に関係していることがわかる。

本研究では、これらの研究報告を踏まえ膜面へのエア供給方法がファウリング低減に重要であると考え、エアの発生源である散気装置そのものに改良を加えることで膜洗浄に効果的な水理学的条件を膜面上に発生させることできないかと考えた。改良を加える上で重要となるのが、施設のコスト増加につながるようなものでないこと、また、すでに納入されている既存のユニットにも対応が可能であることとし、これらを考慮した結果、邪魔板（バップルプレート）を設置することによる気泡径や流れ場等の流体条件の制御という方法を考案した。MBR への邪魔板導入を検討した例は現在のところ非常に少ないが、Ndinisa らは<sup>9)</sup>、浸漬平膜型膜分離活性汚泥法において、平膜間流路を上昇する気泡流は、平膜間流路の中央に向かって上昇し、膜面上において不均一な気泡分布をもたらす空間的なファウラントの堆積を引き起こすことを指摘した。膜面上における不均一な気泡分布を改善するため、平膜 (210mm × 297mm) と膜ユニット壁面の間に、幅 10mm、奥行き 7mm、高さ 297mm の長方形の曝気流路を 10mm 間隔で 13 個設けた邪魔板を挿入することで、膜面上における不均一な気泡分布を改善でき、膜間差圧の上昇速度を半減できることを報告した。また、Yan らは<sup>10)</sup>浸漬平膜型膜分離活性汚泥法において、ファウリングを抑制するために効果的な邪魔板の設置場所を CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析により検討し、邪魔板を用いることにより、せん断応力が 10~30%増加し、また、邪魔板は低曝気量の時、効力を発揮する報告している。これらはいずれも邪魔板がファウリング抑制に効

果的であると報告しているが、邪魔板の形状や設置する場所の検討、また、邪魔板が流体条件に与える影響など、まだまだ知見が乏しいのが現状である。

本研究では、ラボスケールの浸漬型平膜ユニットに水道水を満たし、気泡径や液相流速、せん断応力といったファウリング抑制に影響を及ぼす因子を解析することにより、MBR への邪魔板導入の有用性を検討した。

## 2. 実験装置・実験方法

### (1) せん断応力測定方法

図-1 に実験装置概略図を示す。有効容積 262 mm×95 mm×980 mm のアクリル水槽に水道水を入れ、セラミック平膜を 4 枚浸漬させた。膜間距離はすべての曝気流路で 15 mm になるよう設計した。平膜の下方から 200mm の位置に、ABS 樹脂の円管に φ3mm の空気穴を 5 個空けた散気管を 2 本、2 列平行に設置した。すべての曝気流路に気泡が均等に行き渡るようにするため、空気穴を 20 mm 間隔で開けた。ブロワーから発生させた空気は、空気流量計で調整したあと散気管に送り込み曝気を行った。水槽には循環流路を設けており、曝気の上昇流によるエアリフト効果により、ユニット下部からの液相の流入がスムーズに起こる。

せん断応力測定時は、水槽底部から高さ 550 mm の位置の壁面にせん断力センサー (SSK 社製 : S10W-1) を 5 個設置し、正面から見て左から、センサー1、センサー2、センサー3、センサー4、センサー5 とした。せん断応力は、平膜ユニット内の一つの曝気流路のみ測定した。センサーの感度部は直径 10 mm の円形である。せん断力センサーにより得られた信号は、コンディショナーを経由し PC に取り込み、A/D 変換を行った。せん断応力は、サンプリング周期 100Hz、サンプリング数 81.92 秒で測定を 3 回行った。応答周波数 20 Hz 以上の成分はノイズとみなしローパスフィルターでカットした。

せん断応力による膜面堆積・付着物の剥離効果を評価する指標として、時間平均せん断応力が有効である。せん断応力の時間平均値は式 (1) より求めた。

$$\tau_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T \tau(t) dt \quad (1)$$

ただし、 $\tau_{avg}$  : 時間平均せん断応力 (Pa)、 $T$  : 測定時間 (s)、 $\tau(t)$  : 時間  $t$  におけるせん断応力 (Pa) である。

曝気の強さの指標として、エアフラックス (曝気量/流路断面積) を用い、0.009 m/s から 0.067 m/s の範囲で測定を行った。

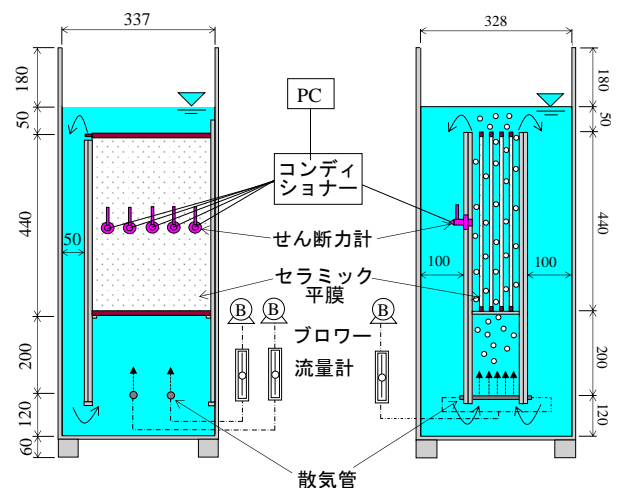


図-1 せん断応力測定時の実験装置概要

### (2) PIVによる液相流速測定方法

図-2 に液相流速測定時の実験装置概略図を示す。実験に使用した水槽、膜ユニットは図-1 に示すせん断応力測定時に使用した装置と同じものである。気泡流の液相流速は PIV (Particle Image Velocimetry : カトウ光研社製) を用いて計測した。液相流速は、側面図から見て、最もハイスピードデジタルカメラ (カトウ光研社製 : k4) に近い曝気流路の壁面から 7.5 mm の位置を測定した。正面図から見て、左右から 2 台の可視化用レーザーシート光源 (カトウ光研社製 : G シリーズ) で流れ場に投入された粒子系 60~150 μm のトレーサー粒子に照射し、ライトシートで切り出された流れ場中の二次元断面内の粒子位置をハイスピードデジタルカメラで撮影し、動画を PIV 解析ソフト Flow Expert (カトウ光研社製) で解析す

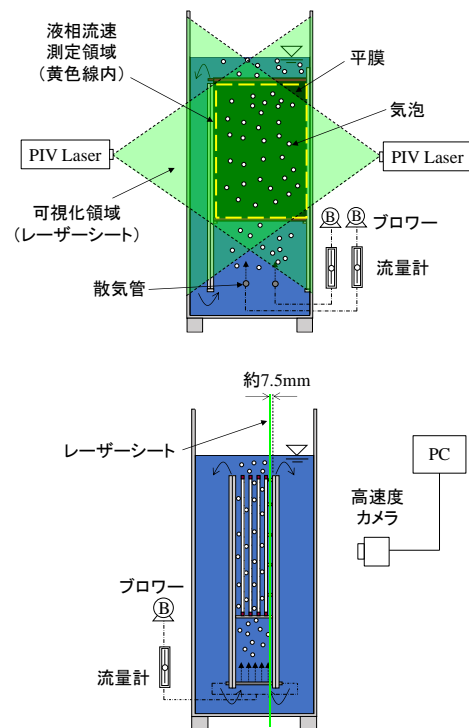


図-2 PIV を用いた液相流速測定時の実験装置

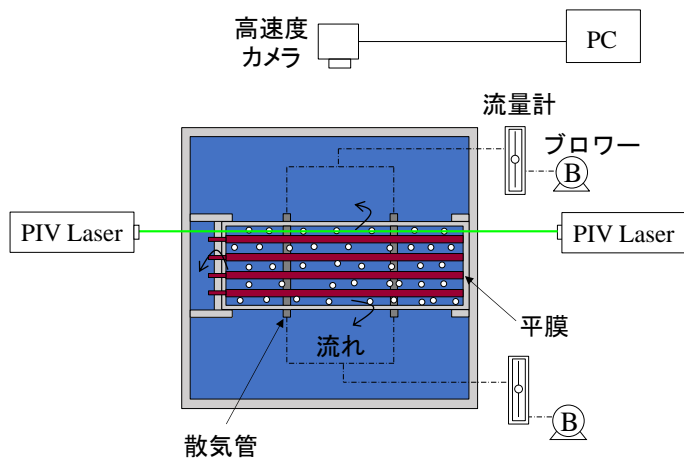


図-2 PIV を用いた液相流速測定時の実験装置 (続き)

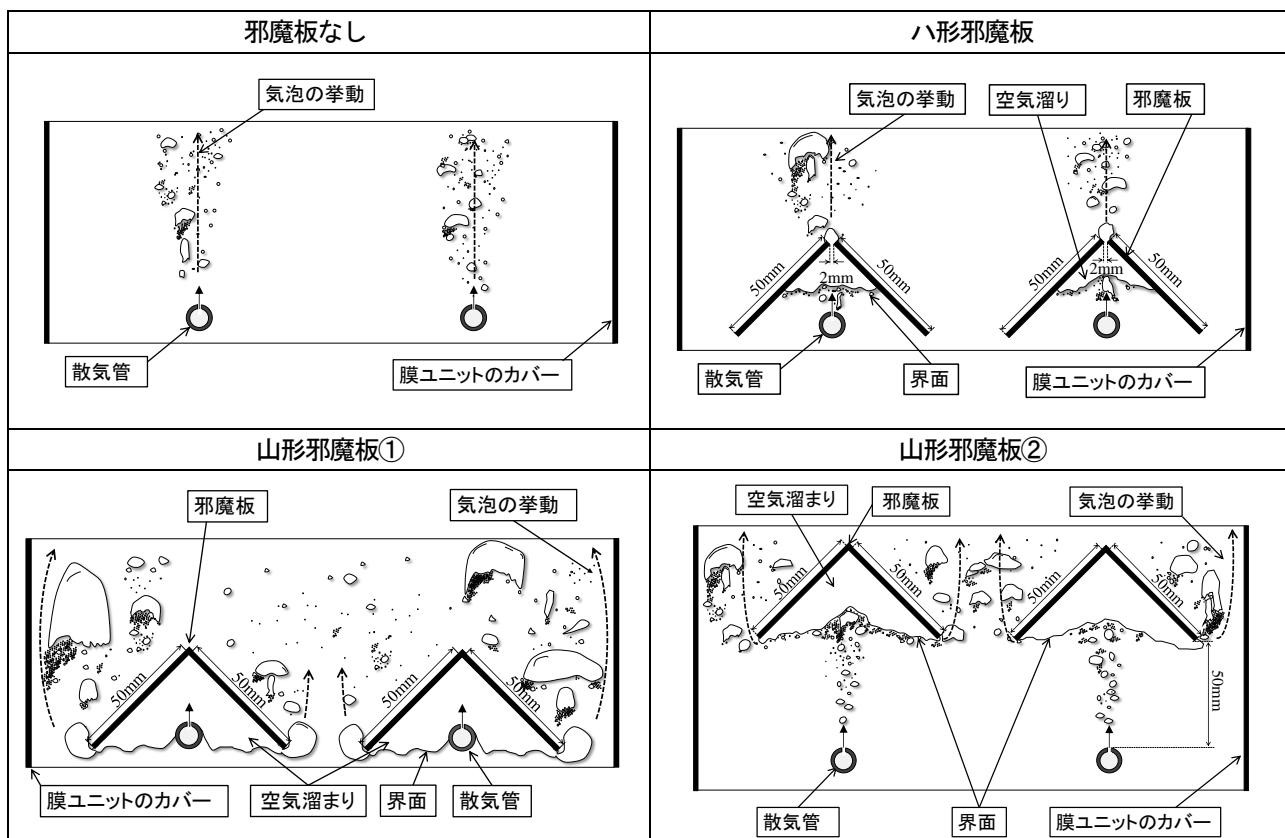
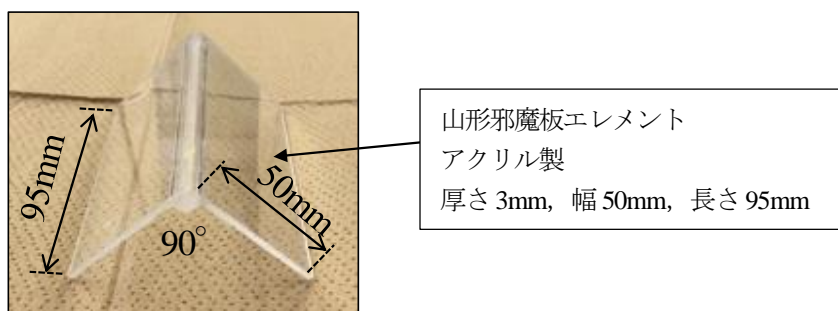


図-3 邪魔板の概要

ることにより測定した。計測はシャッタースピード 500 fps (frame per second) で 10 秒のサンプリングを 3 回行った。エアーフลักスは 0.009 m/s, 0.015 m/s, 0.022m/s, 0.030 m/s で測定した。

### (3) 気泡径測定方法

気泡径の測定は、デジタルカメラ (Casio 社製, Exilim EX-F1) を用いて、300fps で約 40 秒ほど撮影した動画から、任意に画像を 4 枚抽出し、画面上の気泡の面積を 2 次元で測定し、式 (2) より気泡径を算出した。気泡径はエアーフลักス 0.015 m/s, 0.022 m/s で測定した。

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (2)$$

ただし、 $r$ : 気泡径 (mm),  $A$ : 気泡断面積 (mm<sup>2</sup>) である。

### (4) 邪魔板の概要

図-3 に実験に用いた邪魔板の概要図を示す。邪魔板は散気管 1 本につき 1 個設置した。山形邪魔板の寸法は、厚さ 3mm, 幅 50mm, 長さ 95mm で材質はアクリルである。

山形邪魔板①は、散気管を山形邪魔板で覆い被せて曝気を行う方法である。この方法で曝気を行うことで、邪魔板に空気溜りを発生させ、膜面上に粗大気泡を流入させ、スラグ流のような状態を作ることが狙いである。Wei ら<sup>14)</sup>によると、周期的に発生するスラグ流は、気泡後方の熱物質移動能力に長けており、ファウリング抑制効果があることが報告されている。また、山形邪魔板の左右から気泡を放出させることで、膜面上において、気泡を広範囲に拡散させるのが狙いである。

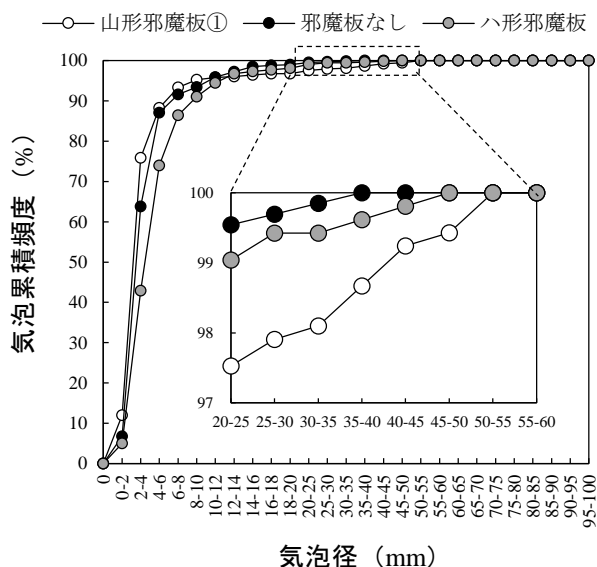
山形邪魔板②は、山形邪魔板を、散気管から距離 50mm 上方の位置に設置して曝気を行う方法である。この方法も山形邪魔板①と同様に、曝気を行うことで、邪魔板に空気溜りを発生させ、膜面上に粗大気泡を流入させ、また、邪魔板の左右から気泡を放出させることで、膜面上において、気泡を広範囲に拡散させるのが狙いである。

ハ形邪魔板は、厚さ 3mm, 幅 50mm, 長さ 95mm のアクリル板二枚を用いて 2mm の隙間を作り曝気を行う方法である。曝気による気泡流を邪魔板に衝突させることで、気泡上昇速度を低下させ、膜面上の流れ場における流速の乱れを低減させるのが狙いである。

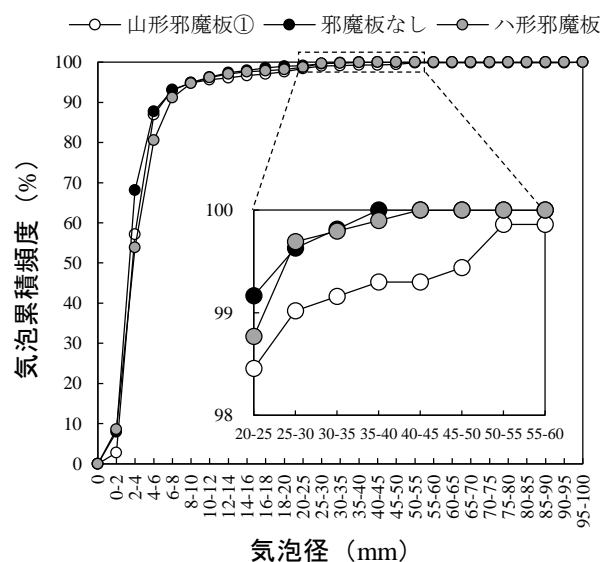
## 3. 実験結果及び考察

### (1) 気泡径解析結果

図-4 に気泡径と気泡累積頻度の関係を示す。図-4 よ



(a) エアーフลักス 0.015 m/s



(b) エアーフลักス 0.022 m/s

図-4 気泡径と気泡累積頻度の関係

り、膜面上に分布する気泡径は不均一であるのがわかる。本研究では、気泡径を分類するため、気泡径 20mm 以上のものを粗大気泡と定義した。

山形邪魔板①は他の条件に比べ、膜面上において、粗大気泡が発生しやすいのがわかる。これは、散気管を山形邪魔板で覆い被せて曝気を行うことで、空気溜まりが発生し、散気管から送風される空気の勢いで、邪魔板に溜まっていた空気が液相に放出される際、粗大気泡が発生するからである。ハ形邪魔板を設置して曝気を行う場合、膜面上で発生する気泡の径は、邪魔板なしと比べて大きな違いは見られなかった。このことから、ハ形邪魔板は粗大気泡を発生させる効果は低く、山形邪魔板①のような、曝気を行うことで空気溜りを発生させるような

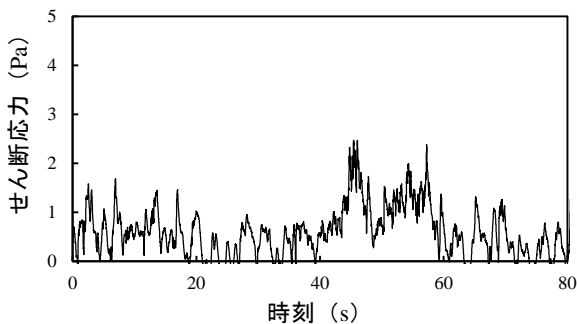


図-5 邪魔板なしにおけるせん断応力の経時変化 (センサー3, エアーフラックス 0.022 m/s)

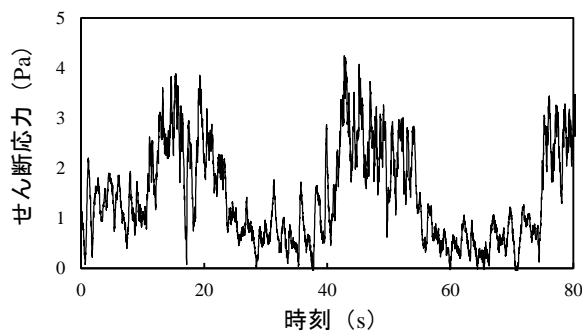


図-6 山形邪魔板①におけるせん断応力の経時変化 (センサー1, エアーフラックス 0.022 m/s)

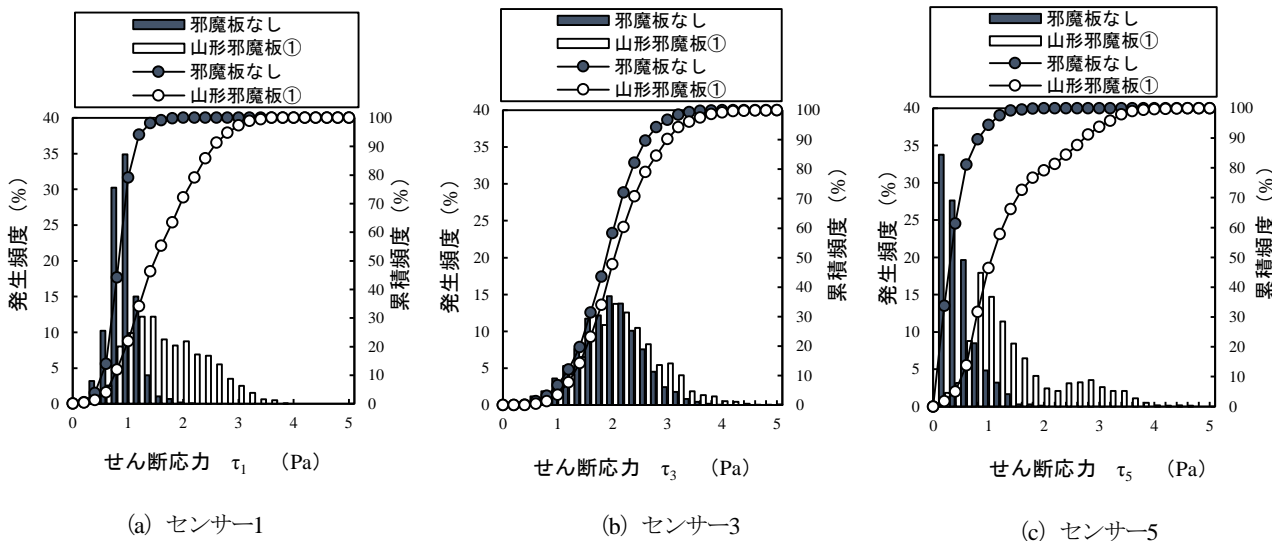


図-7 邪魔板なしと山形邪魔板①におけるせん断応力の発生頻度と累積頻度

邪魔板を設けることで粗大気泡が発生することが示唆された。

## (2) 気放流による膜面せん断応力の評価

図-5 に邪魔板なしにおけるせん断応力の経時変化を、図-6 に山型邪魔板①におけるせん断応力の経時変化の一例を示す。図-6 より、山形邪魔板①のせん断応力の変動は、邪魔板なしに比べ大きいことがわかる。これは、粗大気泡がセンサー上を通過する時、局所的に大きい値のせん断応力が作用したからであり、また、粗大気泡がセンサー上を通過する周期は約 20 秒間隔であった。

図-7 に、センサー1、センサー3、センサー5 における、邪魔板なしと山形邪魔板①のせん断応力の発生頻度と累積頻度を示す。

図-7 より、すべてのセンサーにおいて、山形邪魔板①を設置することで、大きい値のせん断応力の発生頻度が増加することがわかる。特に、センサー1、センサー5 において、せん断応力の値に顕著な違いが確認できる。センサー1 において、1Pa 以下のせん断応力の累積頻度は、邪魔板なしの場合約 80% を占めているのに対し、山形邪

魔板①は約 21% であった。センサー5 では、1Pa 以下のせん断応力の累積頻度は、邪魔板なしでは、約 97% なのに対し、山形邪魔板①では 46% であった。また、センサー1、センサー3 におけるせん断応力の発生頻度より、山形邪魔板①を設置することで、膜面に作用するせん断応力の値の変動が大きいことが確認できる。

図-8 にエアーフラックス 0.022 m/s における、邪魔板なし、山形邪魔板①、山形邪魔板②及びハ形邪魔板を設置したときの、各センサーの時間平均せん断応力と標準偏差を示す。せん断応力の変動の標準偏差はエラーバーで表示した。

邪魔板なしの場合、時間平均せん断応力はセンサー3で最も大きくなり、センサー1、センサー5の値は小さくなった。このことから、平膜エレメント間に流入した気泡が、膜面上の中央に偏って分布しており、膜面両端には気泡がほとんど通過していないことが示唆され、気泡の空間的な分布を考えた場合、ファウリング抑制効果はあまり期待できない。

一方、山形邪魔板①の時間平均せん断応力は、邪魔板なしと比較して、センサー1、センサー5で大きくなった。

これは、平膜エレメント間に流入した気泡が、邪魔板なしでは、膜面の中央を偏って通過していたのが、山形邪魔板①を用いることで、図-3の邪魔板概要図に示すように、邪魔板の左右から気泡が放出され、膜面端部にも通過するようになったからである。また、山形邪魔板①の標準偏差を見ると、すべてのセンサーで大きい値を示している。これは、図-6に示したせん断応力の経時変化から、山形邪魔板①のせん断応力の変動は大きく、粗大気泡がセンサー上を通過する周期が約 20 秒間隔であるため、せん断応力の標準偏差が大きくなった。

山形邪魔板②の時間平均せん断応力は、すべてのセンサーで、邪魔板なしよりも大きくなり、センサー3で最も大きな値を示した。これは、山形邪魔板②を用いると、邪魔板の左右から気泡が放出されるので、膜面上において、気泡が広範囲に分布し、膜面端部にも気泡が存在するようになったからである。また、壁面近傍の流速は、摩擦抵抗を受けるため小さくなり、抵抗の影響が最も小さい膜面中央の流速が大きくなるため、膜面上の流れ場で速度分布が生じており、気泡は膜面中央に集中しやすい状態なので、膜面中央の液相流速はいつも大きくなる。このことから、センサー3の時間平均せん断応力が最も大きくなったと考えられる。邪魔板なしにおいても、同様の理由から、流速は膜面中央で最も大きくなり、壁面に行くほど小さくなった。

ハ形邪魔板の時間平均せん断応力は、センサー1、センサー5で小さな値を示し、センサー4で最も大きくなった。これは、ハ形邪魔板から気泡が放出される際、気泡が不規則方向に放出され、気泡が膜面中央より少しずれた位置を通過したことで、センサー4の流速が大きくなるような流速分布が生じ、また、気泡は流速が大きい場所へと集中的に流入しやすくなるので、センサー4の時間平均せん断応力が大きい値を示した。

また、膜面に作用するせん断応力の空間的な平均値を評価する指標として空間平均せん断応力を用いた。せん断応力の空間的平均値は式(3)より算出した。

$$\bar{\tau} = (\tau_{avg1} + \tau_{avg2} + \tau_{avg3} + \tau_{avg4} + \tau_{avg5}) \quad (3)$$

ただし、 $\bar{\tau}$ : 空間平均せん断応力 (Pa) である。

図-9にエアーフลักスと空間平均せん断応力の関係を示す。図-9より、エアーフลักスを増加させると、空間平均せん断応力も増加する傾向にあり、邪魔板を設けることで、空間平均せん断応力は約 1.5 倍程度増加することが示された。

### (3) 液相流速解析結果

図-10に各邪魔板と邪魔板なしの場合におけるエアーフลักスと空間平均液相流速との関係を示す。空間平

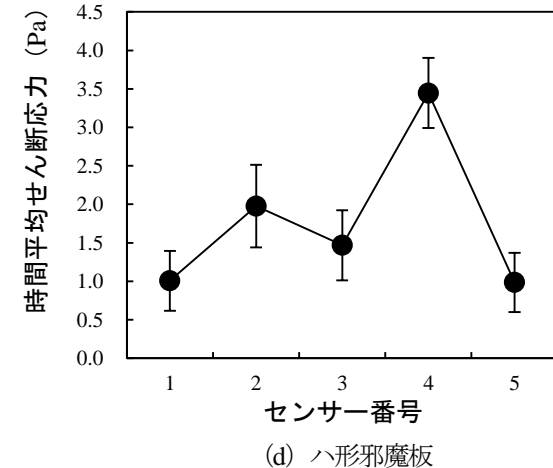
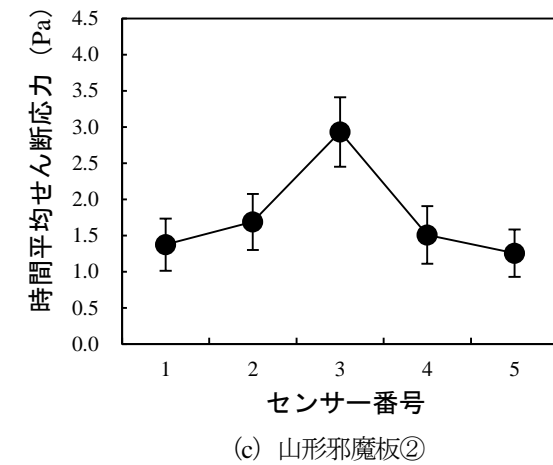
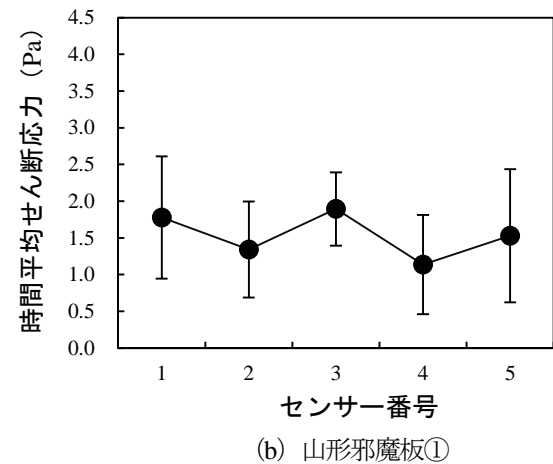
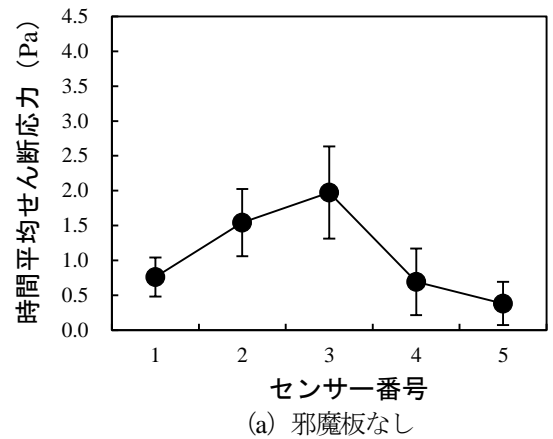


図-8 時間平均せん断応力とエアーフลักスの関係, エアーフลักス 0.022 m/s



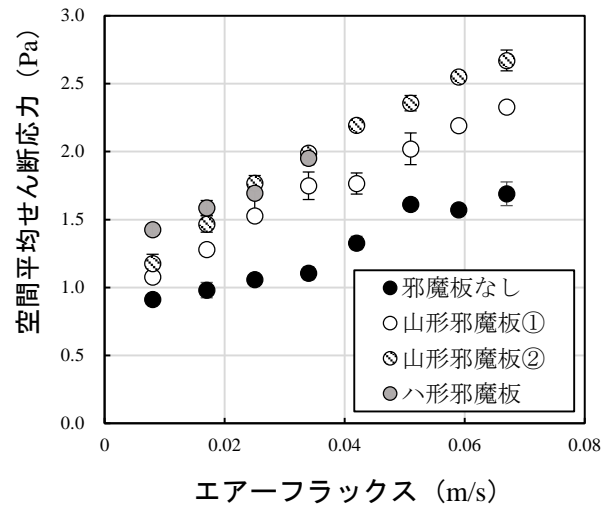
均液相流速は、**図-11** から**図-14** に示す速度ベクトルマップの  $y=200\text{mm}$  の位置における時間平均液相流速を、水平方向で平均することにより算出した。図中赤矢印は流速が  $1\text{m/s}$  以上を示す。

エアーフลักスが  $0\text{ m/s}$  の時、空間平均液相流速は発生せず、エアーフลักスを増加させるにつれて、空間平均液相流速も増加していき、エアーフลักスが  $0.022\text{ m/s}$  を越えると、それ以降は、空間平均液相流速は頭打ちになる傾向が示された。なお、今回の空間液相流速の測定は、PCのメモリの関係上 10 秒間の測定を実施したが、**図-6** より、山形邪魔板①のせん断応力の変動は大きいことが示されており、液相流速の変動も測定時間による影響が大きい可能性が示唆される。そのため、空間平均液相流速は測定時間による誤差が生じており、エアーフลักスが  $0.030\text{ m/s}$  の時、空間平均液相流速の値にばらつきが発生したと考える。また、**図-9**、**図-10** の結果から、空間平均せん断応力はエアーフลักスを増加させると大きくなったが、空間平均液相流速は、エアーフลักスが  $0.022\text{ m/s}$  以降は増加しなかった。このことから、空間平均せん断応力も増加するのは、液相流速による影響だけではない可能性も考えられる。その他の影響を及ぼす因子として、鉛直応力とせん断応力との力のバランスや振動による影響、また渦などが報告されている。<sup>12), 13), 14)</sup>

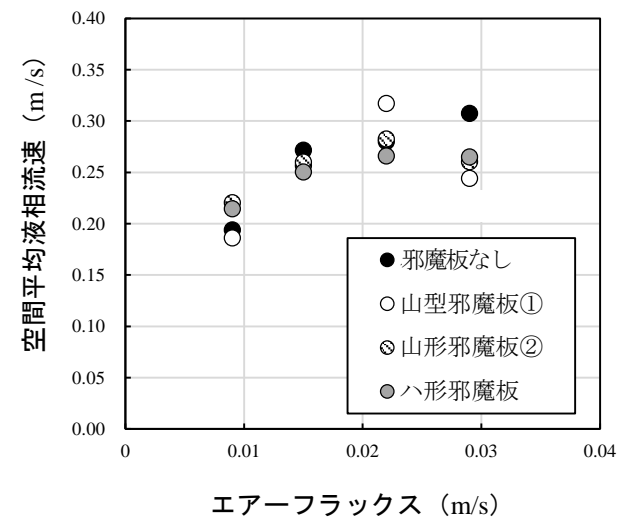
**図-11**、**図-12**、**図-13**、**図-14** に、PIVにより解析した膜面上の流れ場における気泡画像と速度ベクトルマップを示す。図の縦横軸の数値は画像の座標値を表示している。

PIVを用いて液相流速を解析するには、気泡が存在する箇所の速度ベクトルを除去しなければならない。気泡の気相部分にはトレーサー粒子は存在しないので、気泡部分の輝度情報は液相領域と比較して相関的に低くなり、気泡部分のトレーサー粒子の輝度情報は、PIVカメラで撮影した動画からはほとんど取得できないので、液相領域との輝度相関を取ることで、気泡部分の速度ベクトル成分を除去し、液相流速を解析した。そのため、**図-11**、**図-12**、**図-13**、**図-14** に示す、膜面上の流れ場における速度ベクトルマップで、ベクトルが除去された部分が存在する。気泡径が  $1\text{mm}$  以下の微細なものに関しては、気泡の挙動は液相とほとんど同じであるため、液相とみなして解析した。

邪魔板なしの場合、**図-11** の気泡画像と速度ベクトルマップより、気泡流は膜面中央に存在し、液相流速も膜面中央で大きくなっている。一方、膜面端部には気泡が存在せず、液相流速も  $0.1\text{ m/s}$  以下の小さな値が分布している。流れ場における速度ベクトルの向きは、概ね同じ方向を示しており、流れ場における液相流速の乱れが小さいことがわかる。また、**図-8** の時間平均せん断応力の



**図-9** 時間平均せん断応力とエアーフลักスの関係



**図-10** 空間平均液相流速とエアーフลักスの関係

結果をみると、液相流速が大きい場所と時間平均せん断応力が大きい場所が概ね一致しているのがわかる。

山形邪魔板①は、**図-12** の気泡画像と速度ベクトルマップより、膜面上で粗大気泡が発生しており、スラグ流が発生しているのがわかる。粗大気泡の後方には、径の小さな気泡が気泡群となって連なっているのが確認でき、小さな気泡が存在する箇所の液相流速は  $1.0\text{ m/s}$  以上であった。粗大気泡の周辺の数ベクトルをみると、粗大気泡が膜面上を上昇する時、気泡によるエアリフト効果により、気泡周辺の液相が、気泡の上昇する方向に大きく輸送されているのが確認でき、また、流れ場における流速の乱れが大きいのがわかる。

山形邪魔板②は、**図-13** の気泡画像と速度ベクトルマップより、膜面上で気泡が広範囲に分布しているのがわかり、 $0.5\text{ m/s}$  以上の液相流速が広範囲に分布している。膜面上での気泡の径は、山形邪魔板①で発生したような粗大気泡は発生しなかったが、これは、曝気の仕方の違

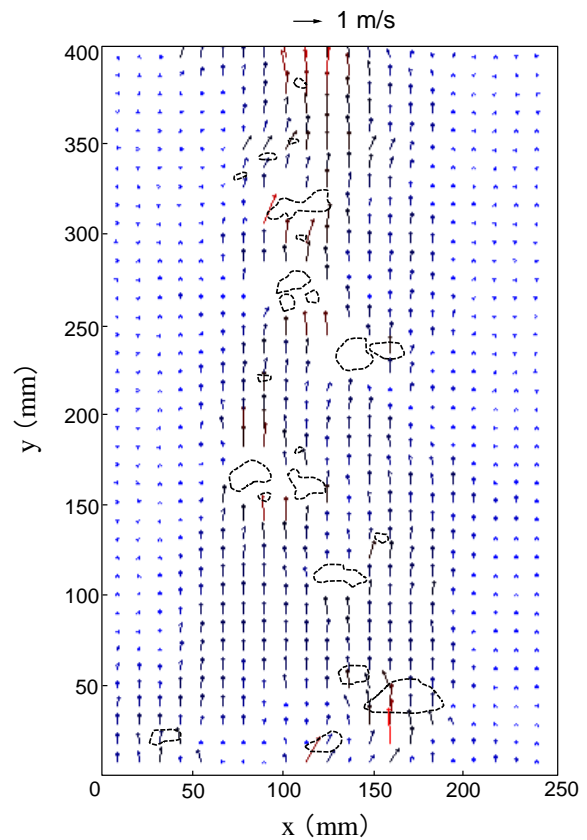
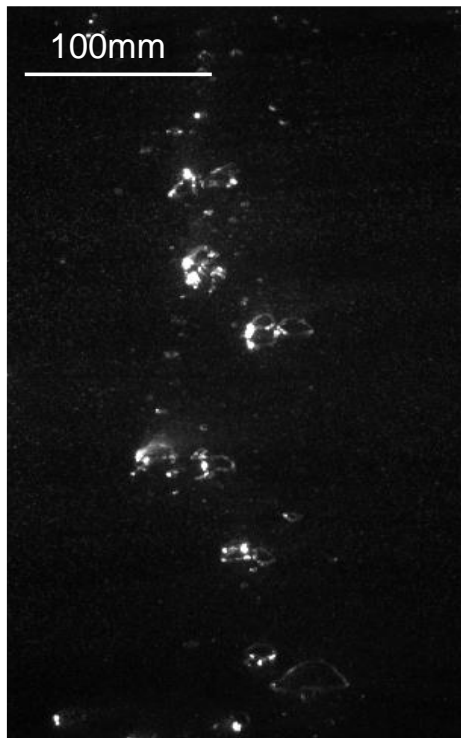


図-11 邪魔板なしにおける気泡画像と流速ベクトルマップ，エアーフลักス  $0.022 \text{ m/s}$

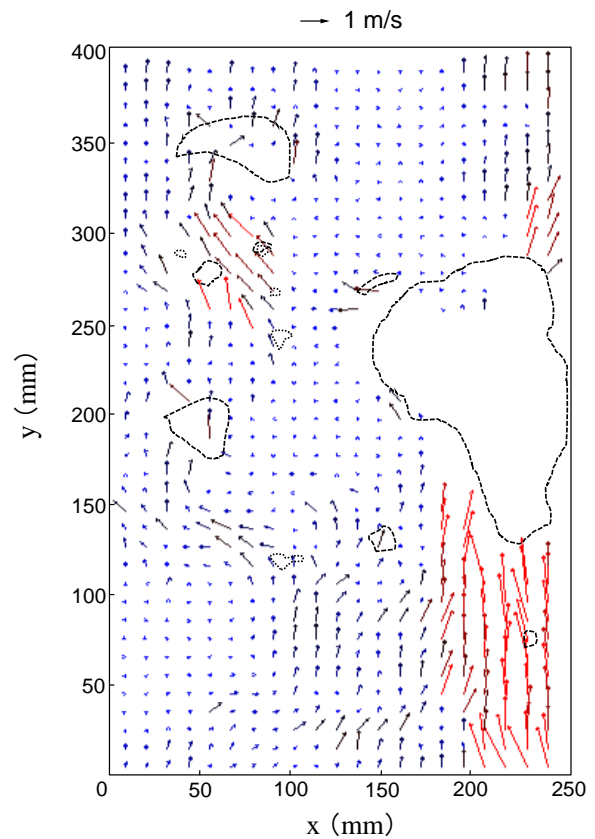
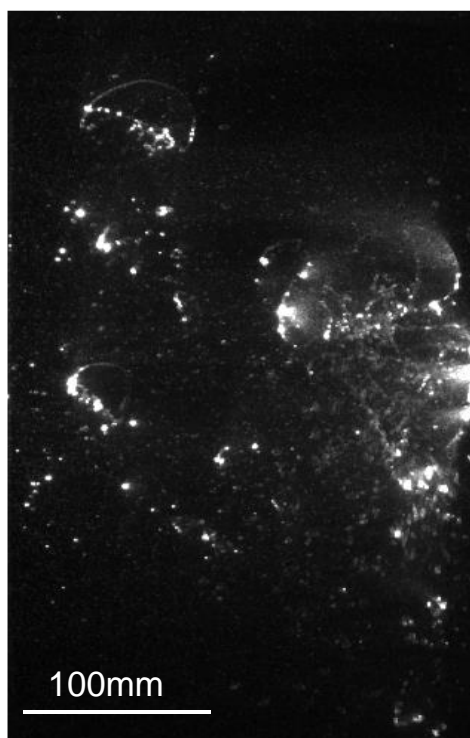


図-12 山形邪魔板①における気泡画像と速度ベクトルマップ，エアーフลักス  $0.022 \text{ m/s}$

いが影響している。山形邪魔板①のような、空気溜りの中から曝気を行う方法は、空気が邪魔板から放出される

際、曝気によって気泡が勢い良く押し出されるため、粗大気泡が発生した。一方、山形邪魔板②のような、散気



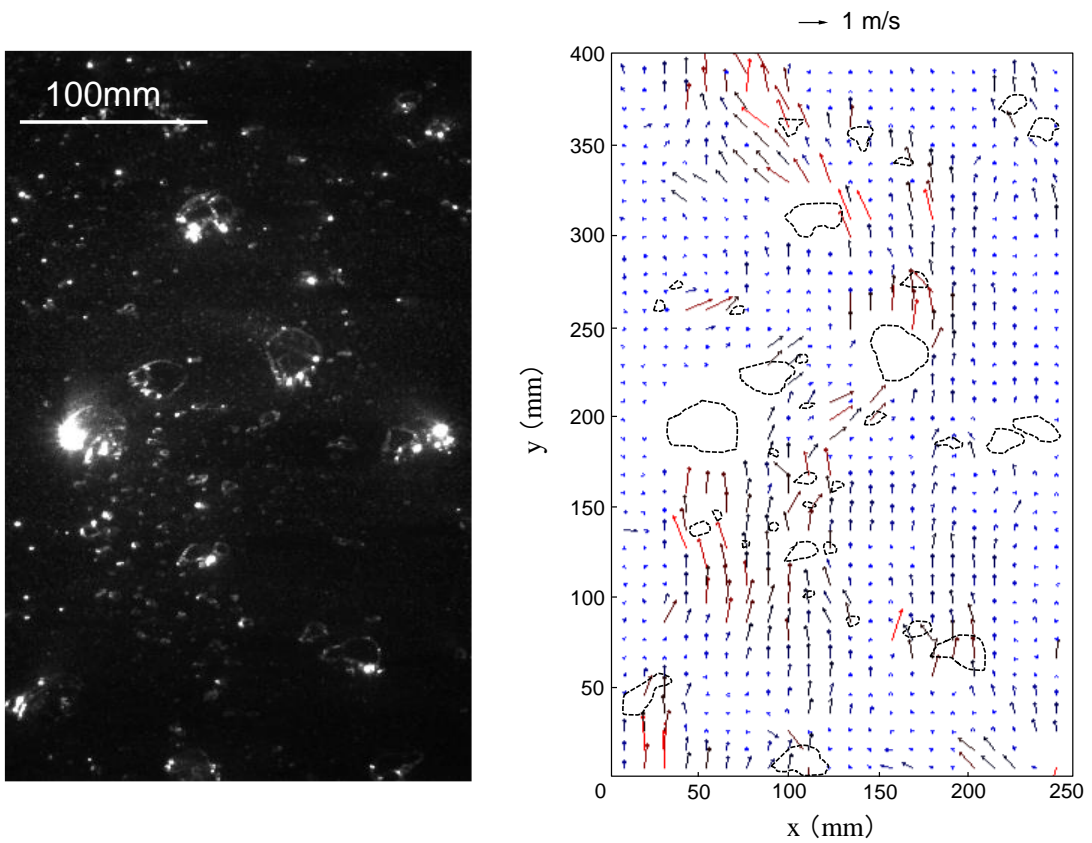


図-13 山形邪魔板②における気泡画像と速度ベクトルマップ，エアーフลักス 0.022 m/s

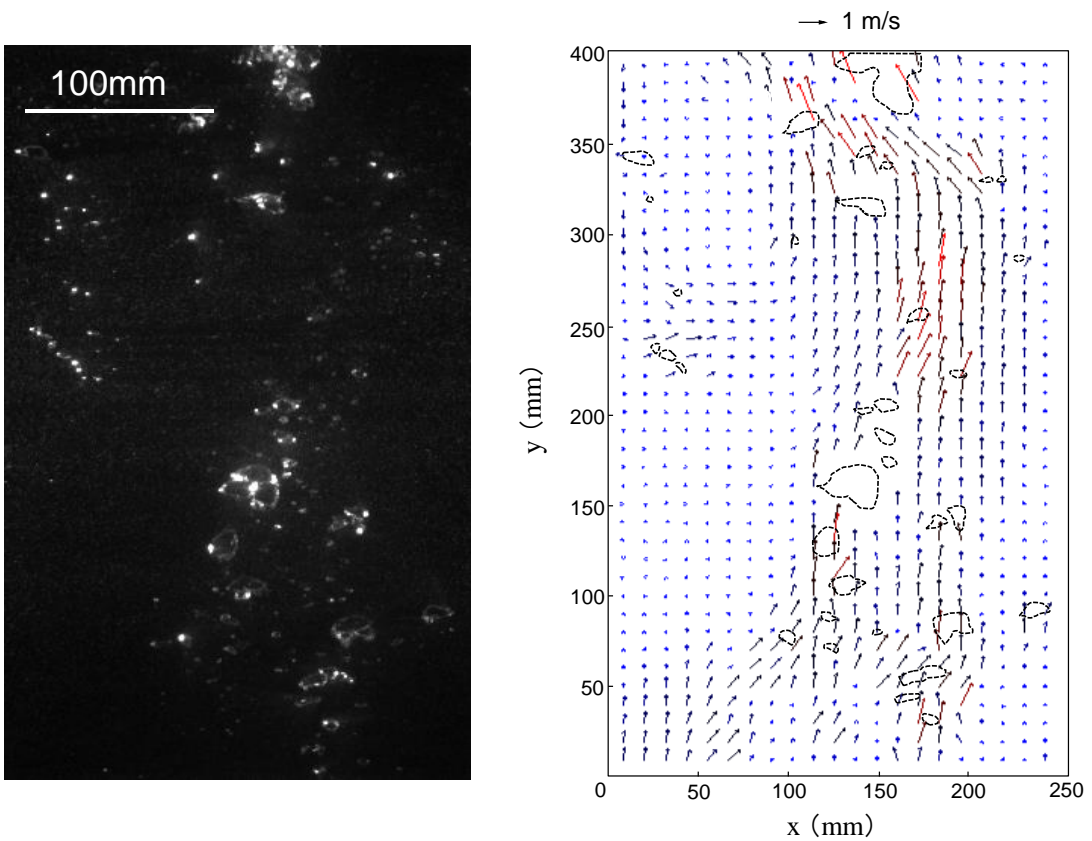
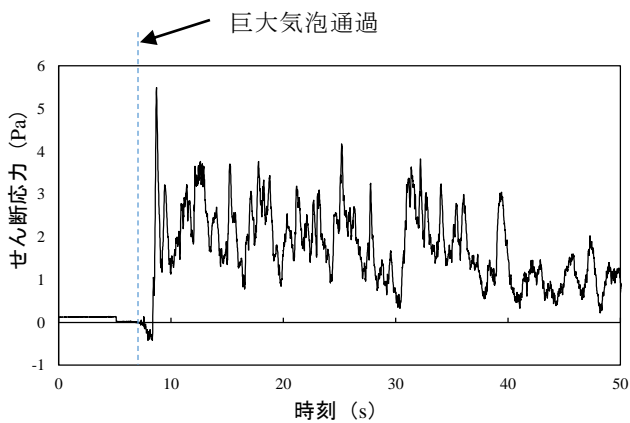


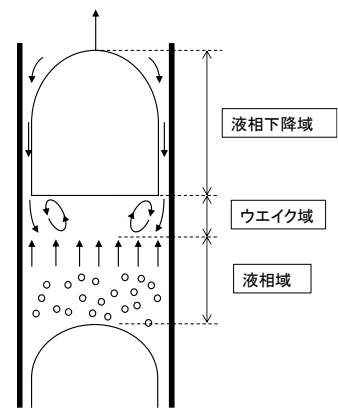
図-14 ハ形邪魔板における気泡画像と速度ベクトルマップ，エアーフลักス 0.022 m/s

管から距離 50mm 上方の位置に邪魔板を設置し，散気管から発生した気泡流を邪魔板の空気溜まりに衝突させる

方法では，邪魔板で覆い被せて曝気をする時よりも，粗大泡が発生しにくいことが示唆された。



(a) セン断応力の経時変化 (センサー3),  
エアーフラックス 0.022 m/s



(b) 曝気開始時に見られるスラグ流れと液相流速のメカニズム (文献 16 を参考)

図-15 曝気開始前から気泡がせん断力計を通過し流れが発生するまでのせん断応力の経時変化  
→ 1 m/s

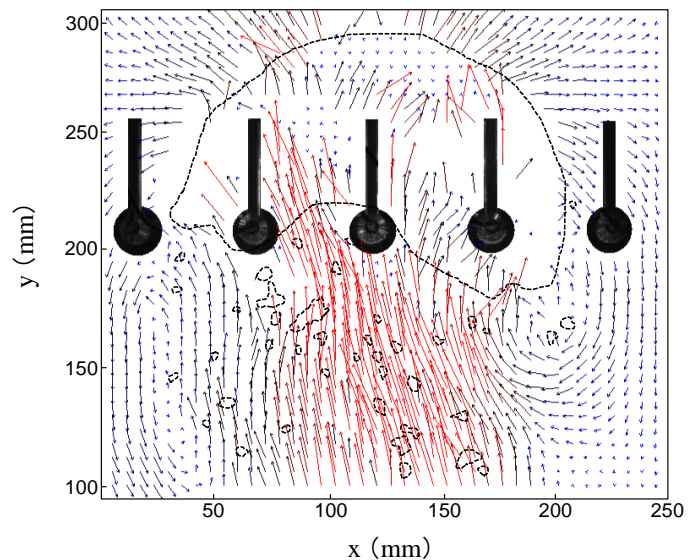
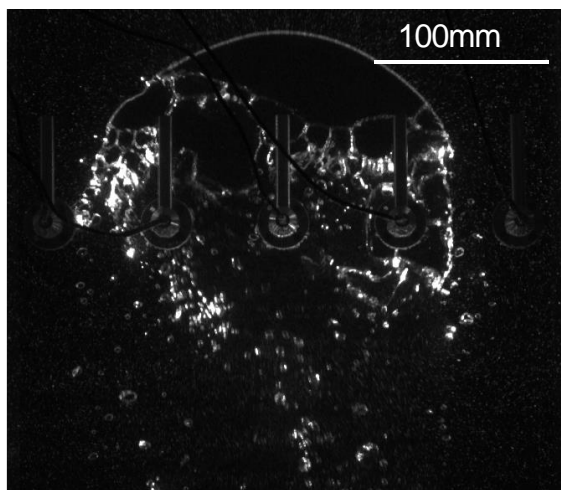


図-16 山形邪魔板①における曝気開始時の巨大気泡画像と流速ベクトルマップ, エアーフラックス 0.022 m/s

ハ形邪魔板は、図-14の気泡画像と速度ベクトルマップより、気泡流は膜面中央から少しずれた位置を上昇しているのがわかる。また、膜面上の流れ場の乱れは山形邪魔板①、②ほど大きくないことがわかる。

#### (4) 曝気開始直後に発生する気泡がせん断応力に及ぼす影響

図-15に曝気開始前から気泡がせん断力計を通過し流れができるまでのせん断応力の経時変化を、図-16に曝気開始直後に発生した気泡の画像と速度ベクトルマップを示す。図-16の速度ベクトルを解析する際、せん断センサー設置位置でのトレーサー粒子の輝度情報は、カメラで撮影した画像から取得することができず、そのまま解析を行うと計算結果に影響を及ぼすため、センサー箇所は流体解析ソフトでマスク画像として処理してから、速度ベクトルの解析を行った。

曝気開始直後に発生する気泡は、パルス気泡であることが知られており<sup>14),15)</sup>、そのパルス気泡がせん断応力に及ぼす影響を解析した。

せん断応力の値を見ると、気泡がせん断力センサーを通過する直前に、一度マイナスの値になった後、大きな値が作用することが確認できた。これは、図-15(b)に示すように、静止液中を気泡が上昇すると、壁面近傍の液相は気泡の上昇とは逆向きに輸送される現象によって、せん断応力はマイナスの値になったと説明できる。その後、気泡がセンサー上を通過すると同時にせん断応力はプラスの値を示す。曝気による上昇流ができてからのせん断応力は絶えず変動し続け、気泡が通過するときに大きく反応すると考えられる。

図-16から、巨大気泡通過後の液相が大きく移動しているのがわかる。発生する気泡は半球殻形状で、気泡による上昇流により、気泡後方の液相が輸送され、流速が

大きくなっているのが確認できる。この現象はJankhahら<sup>16)</sup>によっても報告されている。この結果から、膜間で潰れながら上昇する粗大気泡、すなわちスラグ流は膜面洗浄に有効である可能性が示唆された。

#### 4. まとめ

浸漬型膜分離ユニットに邪魔板を設置することによる槽内の流体条件に及ぼす影響を検討した結果、以下のことが示された。

- (1) 邪魔板で空気溜りを設けて曝気を行うことで、邪魔板から気泡が放出する際に、粗大気泡が発生し、また、邪魔板の左右から気泡が放出されるため、膜面上に気泡を広範囲に拡散させることが出来る。
- (2) 邪魔板によって発生した粗大気泡が平膜エレメント間に流入する時、粗大気泡は押しつぶされながら上昇し、粗大気泡が通過した直後の液相は、気泡を追随して輸送され、液相流速が大きくなった。
- (3) 邪魔板を用いることで、壁面に作用する空間平均せん断応力を 1.5 倍程度増加させることが出来ることが示された。

本研究により、MBR へ邪魔板を設置することで膜面洗浄に効果的な条件を生み出すことが可能であることが示された。今後は活性汚泥を用いて実験を行い、引きつづき邪魔板の有用性について検討していく。

#### 参考文献

- 1) Judd, S. : The MBR BOOK, Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment, Elsevier, Second Edition, pp.1-52, pp.209-288, 2011
- 2) Nagaoka, H. , Ueda, S. and Miya, A. : Influence of bacterial extracellular polymers on the membrane separation activated sludge, *Water Science and Technology* , Vol.34, No.9, pp.165-172, 1996
- 3) 中村一穂 : 膜ファウリングと膜面における現象, 膜 (MEMBRANE), 39(1), pp.28-34, 2014
- 4) 山本和夫 : MBR(膜分離活性汚泥法)による水活用技術, サイエンス&テクノロジー, pp.321-332, 2010
- 5) Yamanoi, I. and Kageyama, K. : Evaluation of bubble flow

- properties between flat sheet membranes in membrane bioreactor, *Journal of Membrane Science*, Vol.360, pp.102-108, 2010
- 6) 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力に与える影響, 環境工学研究論文集, 第44巻, pp.143-149, 2007
- 7) ランムゾー, 李泰日, 長岡裕, 見島伊織 : 平膜浸漬型 MBR における担体投入による膜面有効せん断応力の評価, 土木学会論文集 G (環境) , Vol.67, No.4, pp.170-177, 2011
- 8) Kurita, T. , Kimura, K. and Watanabe, Y. : Energy saving in the operation of submerged MBRs by the insertion of baffles and the introduction of granular material, *Separation and Purification Technology*, Vol.141, pp.207-213, 2015
- 9) Ndinisa, N.V. , Fane, A.G. and Wiley, D.E. : Fouling Control in a Submerged Flat Sheet Membrane System : Part1-Bubbling and Hydrodynamic Effects, *Separation Science and Technology*, Vol.41, pp.1383-1409, 2006
- 10) Yan, X. , Xiao, K. , Liang, S. , Lei, T. , Liang, P. , Xue, T. , Yu, K. , Guan, J. and Huang, X. : Hydraulic optimization of membrane bioreactor via baffle modification using computational fluid dynamics, *Bioresource Technology*, Vol.175, pp.633-637, 2015
- 11) Wei, P. , Zhang, K. , Gao, W. , Kong, L. and Field, R.W. : CFD modeling of hydraulic characteristics of slug bubble flow in a flat sheet membrane bioreactor, *Journal of Membrane Science*, Vol.445, pp.15-24, 2013
- 12) Xu, M. , Wen, X. , Huang, X. , Yu, Z. and Zhu, M. : Mechanisms of membrane fouling controlled by online ultrasound in an anaerobic membrane bioreactor for digestion of waste activated sludge, *Journal of Membrane Science*, Vol.445, pp.119-126, 2013
- 13) Kola, A. , Ye, Y. , Le-Clech, P. and Chen, V. : Transverse vibration as novel membrane fouling mitigation strategy in anaerobic membrane bioreactor applications, *Journal of Membrane Science*, Vol.445, pp.320-329, 2014
- 14) Zamani, F. , Chew, J.W. , Akhondi, E. , Krantz, W.B. and Fane, A.G. : Unsteady-state shear strategies to enhance mass-transfer for the implementation of ultrapermeable membranes in reverse osmosis, *Desalination*, Vol.356, pp.328-348, 2015
- 15) R. Ghosh, Z. F. Cui : Mass transfer in gas-sparged ultrafiltration:upward slug flow in tubular membranes, *Journal of membrane science*, Vol.162, pp.91-102, 1999
- 16) Jankhah, S. and Berube, P.R. : Power induced by bubbles of different sizes and frequencies on to hollow fibers in submerged membrane systems, *Water Research*, Vol.47, pp.6516-6526, 2013

### Effects of Setting of Baffle Plates to Submerged Membrane Modules on the Production of Larger bubbles and Change of Fluid Flow Field

Osamu Marubayashi, Hiroshi Nagaoka, Kazuhiro Toyooka and Sachiko Sibuya

This study aims at elucidating fouling mitigation effect by setting of baffles to submerged flat-sheet membrane modules. Bubble size, shear stress and liquid-flow velocity were measured using laboratory scale MBR. It was found that L-shape baffles can generate larger size bubbles causing larger shear stress, whose value was 1.5 times larger than that in the no-baffle case. Velocity field measurement revealed that slug flow is more effective than bubble flow in producing larger shear stress on membrane surface and that setting of baffle plate to submerged membrane modules is effective in producing larger shear stress on membrane surface. Thereby causing instantaneous large shear stress on membrane surface resulting in mitigating of membrane fouling.