

粒子画像流速測定法を用いた浸漬型中空糸膜モジュール運用における流動特性の検討

東京都市大学 学生会員 ○遊佐 大介
 東京都市大学大学院 学生会員 井上 美穂
 東京都市大学 正会員 長岡 裕

1. はじめに

膜を用いた下水処理方法である膜分離活性汚泥法(MBR)は標準活性汚泥法に比べ、様々な利点を持っている。膜技術を導入するメリットとしては処理施設がコンパクトであること、維持管理が容易であること、汚泥の沈殿性に依存しない固液分離が可能であることが挙げられる。

一方で、MBRの問題点は膨大な電力消費にある。継続的な過運転によって膜表面及び膜細孔内に汚泥が堆積することによるファウリング(膜目詰まり)が引き起こされる。ファウリングを抑制するために膜面に対して平行に流れるクロスフロー流を曝気により膜面に大きいせん断応力を発生させ膜面に堆積した汚泥を剥離させることが実現する。速いクロスフロー流を発生させるためには必要となるポンプの動力が大きくなり、膨大なランニングコストの要因となる。

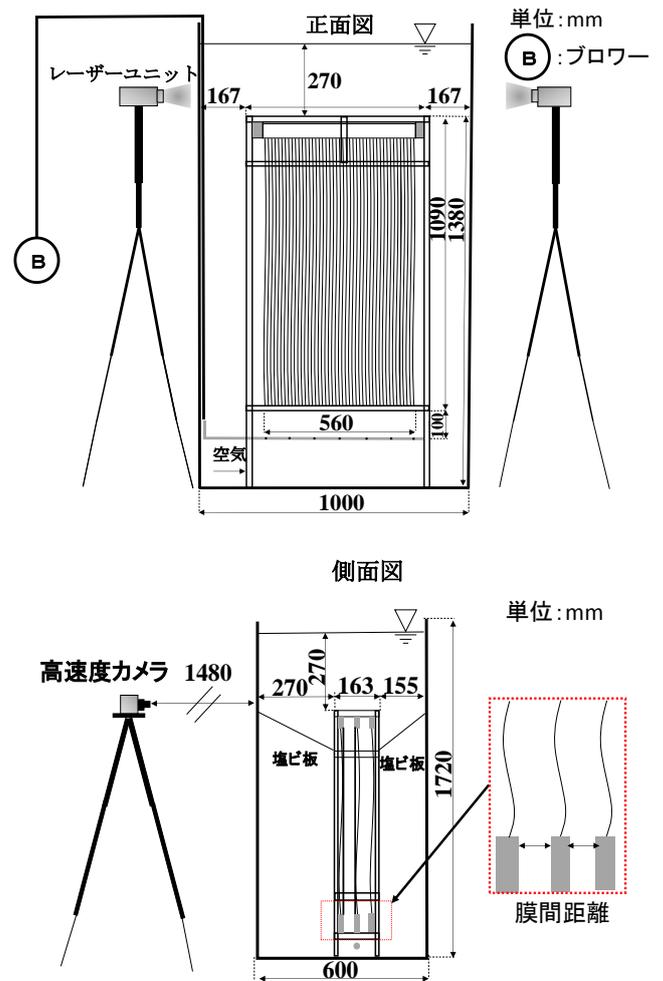
膜ろ過技術を用いたMBRにおける膜モジュールの一種である中空糸膜はMBRの課題であったファウリングを膜同士の揺動作用により抑制できる上に、膜面積が広いこと同敷地面積でより多くの汚水を処理できる。曝気によるファウリング抑制効果に関しては気泡と膜の間に発生する膜面せん断応力が影響していると考えられており、ランムゾーら²⁾は中空糸膜1本を用いて実験を行い膜面せん断応力はエアフラックスに比例することを示した。しかし、平膜と違い揺動作用がある中空糸膜ではせん断応力のみを基準として膜面の洗浄力やファウリング抑制効果を評価することは難しく、中空糸膜モジュール内部の流体の挙動を検討した事例は少ない。

本研究では、実スケールの浸漬型中空糸膜モジュールを使用し、膜内部における気泡の流路が変わると気泡と膜の接触の頻度が変化し気泡の拡散具合が変わることが考えられるため膜モジュールの膜間距離を変化させ粒子画像流速測定法(PIV)による液相流速で検討した上で、内部における気泡の挙動の予測を行い、効率的な運用方法の指標を確立させることを目的とする。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験装置概略図を図-1に示す。容積1720mm×1000mm×600mmの亚克力水槽に膜ユニットが中心位置になるよう設置し、浸漬させた。膜間距離は3mmと15mmに設定して、中空糸のたわみ具合の指標となる弛緩率は1%とした。膜エレメント下端から250mmの位置にΦ2.0mmの孔が10個空いた塩ビ管を設置して片側からのみ空気の供給を行い、エアフラックスは0.007m/s, 0.013m/s, 0.017m/sの3段階に設定した。また、撮影範囲を図-2に示す。



キーワード MBR, 中空糸膜, 膜間距離

連絡先〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 東京都市大学都市工学科 TEL 03-5307-0104

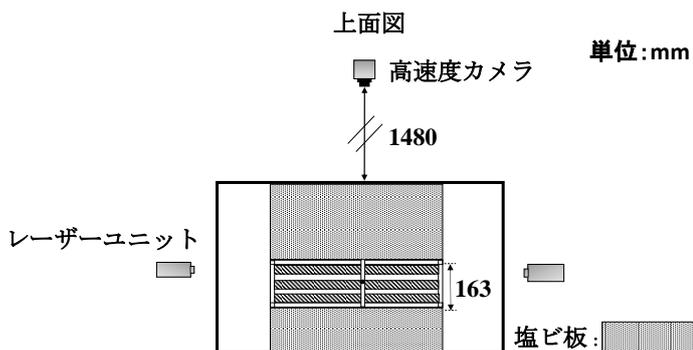


図-1 実験装置概略図

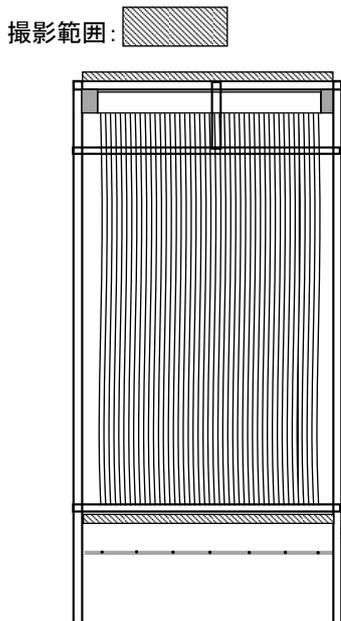


図-2 撮影範囲

2.2 実験方法

実験では粒子画像追跡流速測定法 (PTV, Particle Tracking Velocimetry) と粒子画像流速測定法 (PIV, Particle Image Velocimetry) を用いて解析を行った。数値の算出には取得した画像を PTV 解析を行った後に、PIV 解析に変換した。

中空糸膜のモジュールは3束に分かれていて、実験では高速度カメラ(K4 カトウ光研社製)側から向かって右側の膜モジュールと壁面の間に発生する循環流の計測を行うためにカメラ側の膜と膜の間に向けてレーザーを照射し、観測を行った。片側にレーザーユニット(G2000 カトウ光研社製)を設置した。側面図より水槽の正面に高速度カメラを水槽壁面から 1480mm の位置に設置した。カメラレンズは 12mm の高格レンズを用いて撮影画格を 800×600 ピクセルに設定して、シャッタースピード 500 fps で 20000 フレームの撮影を 2 回ずつ行った。撮影範囲は膜モジュールの直上、直下の 3 cm の範囲を撮影した。また、槽内にはマーカ用粒径 75~150 μ m 以下のイオン交換樹脂製のトレーサー(DIAION

SEPABEADS 三菱化学社製)を混入させて、レーザー光に反射させ画像の取得を行った。

エアーフラックスは 0.007m/s, 0.013m/s, 0.017m/s において液面から影響を考慮して膜モジュールから 270mm のところに水面を設定した。

2. 2液相流速の算出

測定によって取得した画像を解析ソフト(Flow expert 2D2C カトウ光研社製)を用いて PTV による解析を行った。

解析前に実際の距離と画像上の距離を一致させるためキャリブレーションを行った。測定開始前にレーザーシートを照射したエリアに寸法の記載されている定規を画像として撮影し、比率の設定から距離補正を行った。

PTV 解析で算出したデータを PIV で格子点を設定して、数値を算出した。撮影によって取得した 800×600 ピクセルの画像を 13×13 ピクセル間隔のメッシュ状に区切り、直接相互相関法によって各格子点の液相流速を解析した。総格子点数は 219 点、縦 1 点、横 73 点とした。

3. 気泡径の算出

長さ・面積測定ソフト lenara222 (古河勝/furu) を用いて測定を行った。

測定のために実際の距離と画像上の距離を一致させるためキャリブレーションを行い、撮影画像に写っている気泡をフリーフォームで囲むことで周長を算出して、気泡径を計算した。

測定する気泡は膜モジュール直上 240cm² の範囲を通過する気泡のみとした。

4. 結果及び考察

データの取得範囲は膜モジュールの直上と直下のデータのみで比較を行った。膜モジュールの膜間距離 3mm と 15mm の直上、直下の平均液相流速の分布の関係をエアーフラックスごとに図-3、図-4、図-5 に示した。

平均液相流速が中央で急激に減少しているのは、膜モジュール中央にあるエレメントの影響と考えられる。

膜間距離 3mm と 15mm の上部を比較するとすべての同曝気風量において膜間距離 3mm は変動が小さいが膜間距離 15mm では大きな空間変動が見られた。視覚的観点より膜モジュールから出てくる気泡の大きさが膜間距離 3mm では同程度の大きさの気泡が多く観測できたが、膜間距離 15mm では気泡の大きさは差が大きいことが見て取れた。これは膜間距離が狭い 3mm では気泡が膜に頻りに接触して大きい気泡が発生しないが、膜間距離 15mm では膜間

距離が大きいために膜との接触が少なく、気泡が拡散しなかったことが考えられる。

また、膜間距離 15mm の上部の平均液相流速の変動は下部の変動と類似点が見られるため散気管位置が関係していると考えられる。このことから膜間距

離 3mm では平均液相流速は下部から上部で減少しており、膜間距離 15mm では上昇している。

エアーフลักス 0.017m/s ではすべての条件において同程度の値を示しており、高曝気により膜内部で乱流が起き、曝間距離 15m でも低減が見られた。

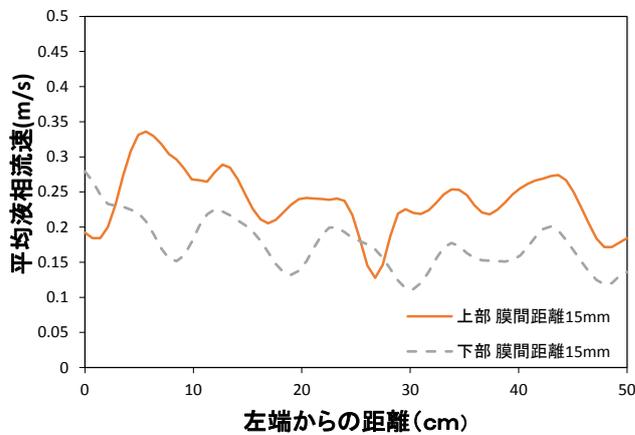
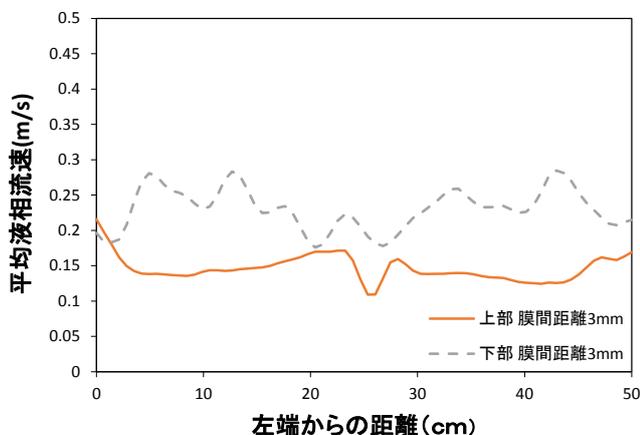


図-3 膜モジュール上部, 下部における流速分布(エアーフลักス 0.007m/s)

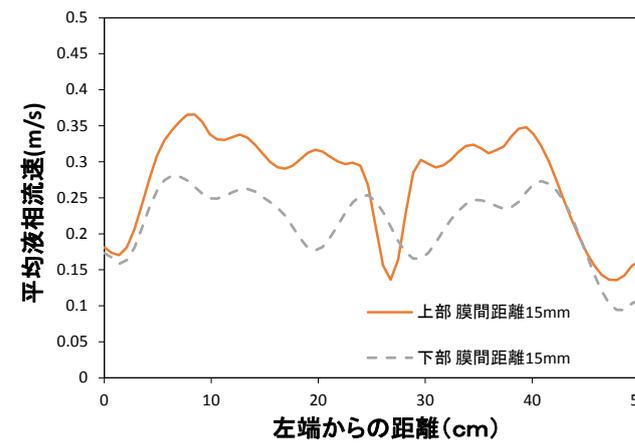
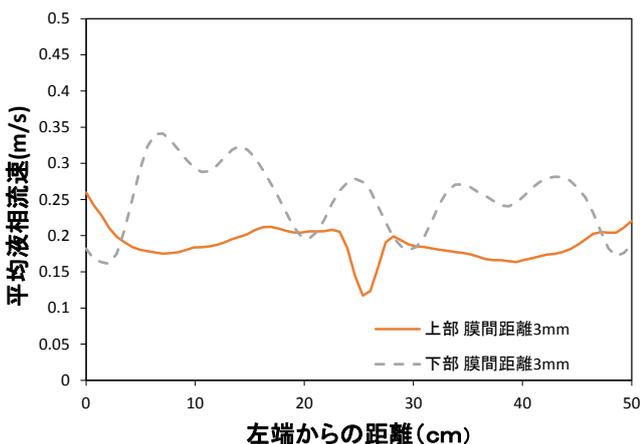


図-4 膜モジュール上部, 下部における流速分布(エアーフลักス 0.013m/s)

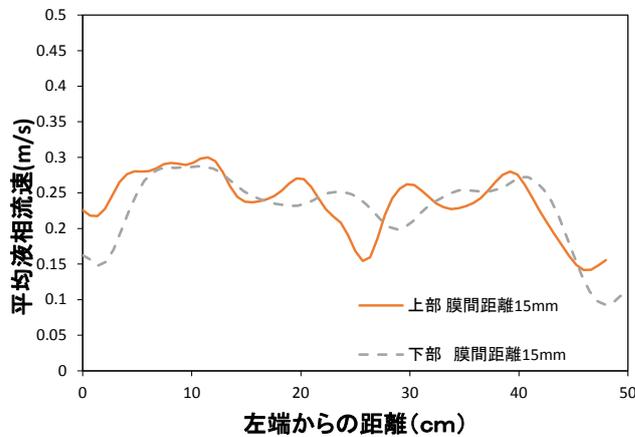
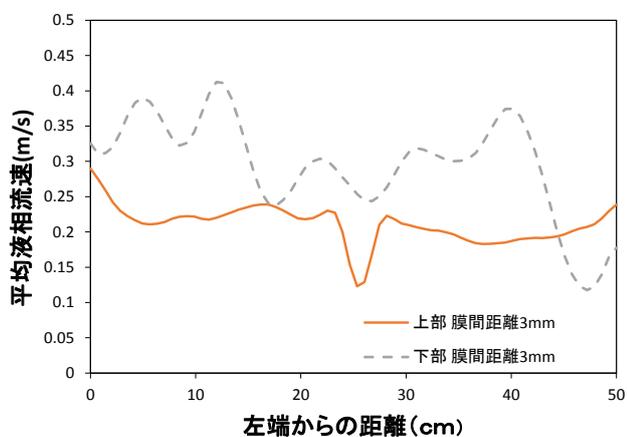


図-5 膜モジュール上部, 下部における流速分布(エアーフลักス 0.017m/s)

図-6, 図-7, 図-8 に気泡径の累積相対度数分布を示す。度数の基準は 10 秒間に撮影範囲を通過した気泡数とする。累積相対度数とは相対度数を気泡径の低い方から加算した値を示したもので傾きが大きいほどプロットの間にある気泡の数が多いことになる。

図-9 にエアーフลักス 0.013m/s における累積相対度数 70% までを示す。膜間距離 3mm の上部では径 0.3~1.1cm の気泡が約 70% を占めている。これは視覚的に膜間距離 3mm では同程度の大きさの気泡が多く存在するという推察と同じ結果が得られた。エアーフลักス 0.013m/s のとき、上部における膜間距離 15mm と下部での累積相対度数は最も近い挙動を示した。エアーフลักス 0.013m/s で値が類似している点が多いのは、エアーフลักス 0.017m/s では乱流が起こるため気泡が上方に向けて直線的な動きせず膜に接触し、気泡が分散したため曝気量を挙げても一致しなかったことが考えられる。

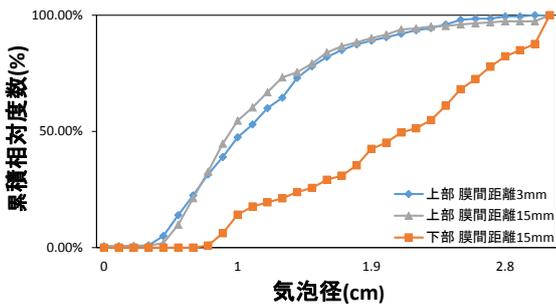


図-6 気泡径の累積相対度数分布 (エアーフลักス 0.007m/s)

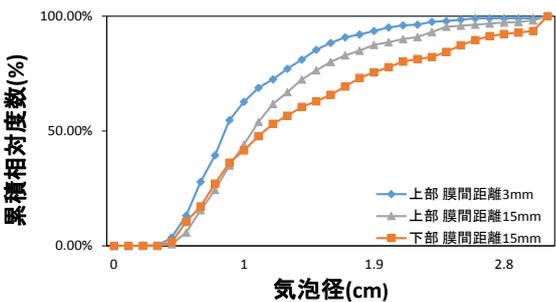


図-7 気泡径の累積相対度数分布 (エアーフลักス 0.013m/s)

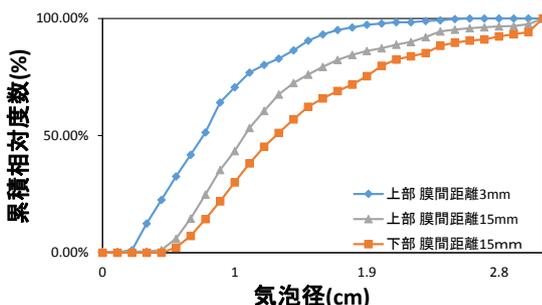


図-8 気泡径の累積相対度数分布 (エアーフลักス 0.017m/s)

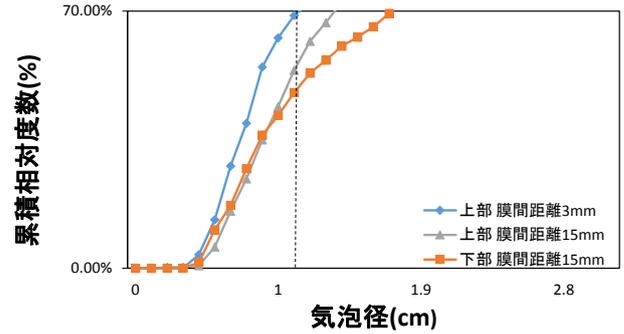


図-9 70%までの気泡径の累積相対度数分布 (エアーフลักス 0.013m/s)

5. まとめ

粒子画像流速測定法を用いて中空糸膜モジュール運用における流動特性の検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 膜間距離 3mm では膜内部で気泡が膜に頻りに接触して大きい気泡が発生しないが、15mm では膜間距離が大きいために膜に接触が少なく気泡が拡散しなかったことが考えられる。
- (2) 膜間距離 3mm では平均液相流速は下部から上部で減少しており、膜間距離 15mm では上昇している。
- (3) 膜間距離 3mm の上部では径 0.3~1.1cm の気泡が約 70% を占めている。膜間距離 15mm の上部と比べ、同程度の大きさの気泡が多く存在する。
- (4) 膜間距離 15mm の時、上部と下部を比べると、気泡径の累積相対度数がエアーフลักス 0.013m/s と下部でもっとも一致する挙動を示す。エアーフลักス 0.017m/s の膜内部では乱流が起こるため気泡が上方に向けて直線的な動きせず膜に接触したことが考えられる。

参考文献

- 1) 公益社協会 日本下水道協会 www.jswa.jp/suisuiland/3-3.html
- 2) ランムゾー, 李泰日, 長岡裕: 数値流体力学手法を用いた浸漬型 MBR における中空糸膜に働く膜面せん断応力の評価, 土木学会論文集 G(環境), Vol. 67, No 1, 30-38, 2011
- 3) PIV ハンドブック, 著者 森北 肇, 2002 年 7 月 20 日発行, 森北出版株式会社