平膜状浸漬型 MBR において 曝気によるモジュールの振動が ファウリング抑制効果に与える影響

井上 美穂¹・長岡 裕²・酒井 駿治³・森田 優香子⁴

¹学生員 東京都市大学大学院 工学研究科 都市工学専攻 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)
E-mail:g1581705@tcu.ac.jp

²正会員 東京都市大学教授 都市工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)
E-mail:hnagaoka@tcu.ac.jp

³学生員 東京都市大学大学院 工学研究科 都市工学専攻 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)
E-mail:g1481709@tcu.ac.jp

⁴株式会社クボタ 膜システム部 (〒104-8307 東京都中央区京橋2-1-3)
E-mail:yukako.morita@kubota.com

本研究では、MBR において曝気による平膜モジュールの振動がファウリング抑制効果に与える影響について検討するため、ろ板の厚さを変化させた 3 種類の平膜モジュールについて人工試料を用いて膜間差圧の上昇速度を測定するとともに、レーザー変位計を用いて振動変位を定量化した。ろ板厚さが大きい平膜モジュールほど振動の振幅が小さくなり、膜間差圧の上昇速度は小さくなることが示唆された。曝気により発生する膜面せん断応力は、平膜モジュールの厚さが大きくなるほど増加し、平膜モジュールの振動を抑制することによって膜間差圧の上昇を抑制する効果が促進されることが明らかになった。

Key Words : MBR, fouling, vibration, shearing stress

1. 緒言

現在、水処理に関する分野では膜分離技術の導入が急速に進められており、高度水処理技術である膜分離活性汚泥法(MBR: membrane bioreactor)は、産業排水処理に多数導入が進められている¹⁾。下水処理分野でも、以前は処理対象水量が他の排水処理と比べて大きい膜面積が多く必要となりコスト面で不利であったが、膜技術の普及に伴う膜価格の低下により、近年普及が進んでいる²⁾。

MBR は、膜ろ過により固液分離を行うため、従来の活性汚泥法と比べ、分離膜によって浮遊物質(SS)を完全に除去することが可能であり³⁾、パルキングのおそれが無いため処理水質が向上することや、沈殿池が不要となるため設備の省スペース化が可能となること、反応槽内の MLSS 濃度を高く維持できるため効率よく窒素除去が行えることなど、多くの利点を有している⁴⁾。

しかし、膜ろ過を行うという特徴から、ファウリングの発生が最も大きな問題点となっており、ファウリングを抑制するため、反応槽内において曝気による膜面の洗浄が行われている。しかしながら、日本

で下水処理に用いられている MBR の曝気にかかる消費電力は全電力使用量の 32.9%~90.7%と報告されており⁵⁾、曝気にかかる電力コストが大きいことが課題である。そのため、低曝気量でありながら高い洗浄力を有する高効率な洗浄が行える曝気条件を明らかにし、曝気量を削減して、MBR の普及拡大につなげることが求められている。

Anusha ら⁶⁾は、嫌気性 MBR において浸漬型中空糸膜モジュールに横振動を適用することによって臨界フラックスが増加したことを報告しており、膜の振動によりファウリング抑制効果を得ることが可能になると考えられる。

谷田ら⁷⁾は、平膜を水平方向に強制振動させると振動振幅及び振動周波数に比例してせん断速度が上昇することを報告しており、平膜モジュールの振動がファウリングの抑制効果に影響を与えることが考えられる。平膜モジュールが設置された膜ユニット内では、曝気を行うことにより常に流速が発生しているが、曝気の気泡は大きさや発生間隔が一定でないため、流速の空間的な時間変動は大きくなる。一

枚の平膜モジュールを挟んだ隣り合う曝気流路では流速の瞬間的な速度差から、常に圧力差が生じるため両側から圧力を受けた平膜モジュールは膜面に対し垂直な方向に振動する現象が発生する。その平膜モジュールの振動がファウリング抑制効果に影響を与えることが推測される。

また、間欠吸引によってフラックスの低下を抑制する効果が向上することが知られている⁸⁾。吸引時間帯においてろ板に吸着していた膜シートは、吸引を停止したときろ板から離れて振動するため、吸引停止時間帯の膜シートの自由振動が膜表面の洗浄に効果を与えていることが予想される。

酒井ら⁹⁾は、平膜モジュールの振動にはろ板の厚さが影響を与えると考え、3種類の厚さの平膜モジュールを用いてレーザー変位計による曝気中の平膜モジュールの振動特性について検討し、ろ板の厚さが大きくなるにつれて振動の振幅は小さくなり、振動の周波数は大きくなると報告している。

しかし、平膜モジュールの振動がファウリング抑制効果に与える影響については解明されていない。そのため、曝気による平膜モジュールの振動がファウリングに与える影響の定量的な評価を基礎的な実験により明らかにする必要がある。

また、気泡流によるせん断応力は膜面の洗浄に大きく寄与していると考えられている。李ら¹⁰⁾は、膜面平均せん断応力は、曝気による膜面近傍の液相流速に依存すると報告しているが、平膜モジュールの振動パターンの違いが膜間差圧の上昇速度に影響を及ぼしているとする、膜面近傍の液相流速の差が膜面に働くせん断応力の大きさを変化させ、ファウリングの進行速度を左右する要因となることが推測される。

本研究では、曝気の気泡流によって発生する圧力変動による平膜モジュールの振動がファウリング抑制効果に与える影響を比較するため、酒井らの研究と同様に3種類のろ板厚さの平膜モジュールを用いて、レーザー変位計によるろ板及び膜シートの振動変位を連続測定によって観測し、人工試料を用いて測定した膜間差圧の上昇速度との関係からファウリングの抑制に効果のある平膜モジュールの振動条件を検討した。また、平膜モジュールの振動がファウリングに影響を与える要因を解明するため、膜面に働くせん断応力を測定し、そのせん断応力を発生させると考えられる液相流速について検討することにより、平膜モジュールの振動が膜間の液相流速に与える影響と、それに伴うせん断応力がファウリング抑制に及ぼす効果を明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要

(1) 実験装置

図-1に実験装置概略図を示す。容積 1720 mm×530 mm×170 mm の塩化ビニル製の水槽に膜ユニットを浸漬させ、表面積 1020 mm×490 mm の塩化ビニル製のろ板を膜間距離 6 mm で3枚設置し、上部両端をゴム製の留め具で固定した。側面図より両外側に設置したろ板は模擬平膜モジュールとし、中央のろ板を測定用平膜モジュールとして使用した。

図-2に測定用平膜モジュールの構造を示す。塩ビ製のろ板の表面に厚さ 0.65 mm の菱目状のスペーサーをテープで固定し、その上から孔径 0.2 μm の膜シート(塩素化ポリエチレン製)を接着剤で貼付した。裏面にはノズルを取り付けノズルにチューブを接続し、吸引ポンプで透過水を排出できる構造とした。

散気管は Φ4 mm の散気口が中央の平膜モジュールの直下 180 mm の位置となるように 65 mm の間隔で6本設置した。また、平膜モジュールは異なる厚さにおける振動特性について比較するため、ろ板厚さ 4 mm、6 mm、8 mm の3種類を使用し、平膜モジュールの厚さに応じて平膜ユニットを変更した。

実際の MBR で用いられている膜厚の 6 mm を基準とし、薄い 4 mm の平膜モジュール、厚い 8 mm の平膜モジュールと比較することで、より高効率な膜面の洗浄が期待される平膜モジュールのろ板厚さを明らかにする目的である。平膜モジュールのろ板の剛性は、塩化ビニルのヤング率を $2.8 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ とする¹¹⁾と、4 mm では $1.52 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$ 、6 mm では $5.14 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$ 、8 mm では $1.22 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$ である。また、本研究で行った全ての実験において、図-1、図-2の実験装置を使用した。

図-1 実験装置概略図

図-2 測定用平膜モジュールの構造

(2) 人工試料ろ過による膜間差圧の測定

この実験は、3種類のろ板厚さの平膜モジュールにおいて膜間差圧を測定し、平膜モジュールの異なるろ板厚さによるファウリングの進行速度の違いを明らかにすることを目的としている。

人工試料によるろ過運転を行うにあたり、各ろ板厚さの平膜モジュールにおけるろ過性能を確認するため、水槽に水位 1440 mm まで水道水を満たし、吸引ポンプで 60 秒吸引したときの膜間差圧を測定した。圧力計(AP-C35 KEYENCE)はポンプと吸引ノズル間の水面高さに設置し、サンプリング周期は 100 Hz、吸引中の膜透過流速は 5 段階に設定した。

人工試料は水道水にペクチン及びゼラチンを溶解した 100 L の溶液を使用し水槽に満たした。全ろ板厚さの平膜モジュールにおいて連続曝気の条件下で 9 分吸引、1 分吸引停止の間欠吸引運転を行い、約 15 kPa となるまで 1 分間隔で膜間差圧を測定した。

測定用平膜モジュールから吸引された透過水は循環槽へ流入し、循環槽の水は吸引ポンプで再び装置内へ戻して循環させ、越流水は循環槽へ排出した。吸引中の膜透過流速は 0.6 m/d、エアフラックスを 0.021 m/s に設定し測定を行った。

人工試料は、活性汚泥ではなくファウリング原因物質を模擬したものであり、レーザー変位計で平膜モジュールを照射する際、水槽内の流体は無色透明である必要があるため、人工試料を使用した。ペクチンは多糖類、ゼラチンはタンパク質を主成分としており、実際の MBR で膜にファウリングを発生させる物質には、多糖類様物質、タンパク質様物質が多く含まれている¹²⁾。また、ペクチンとゼラチンは熱して溶かし、冷やすことでゲル化する性質を持っているため、ペクチン及びゼラチンによりファウリングを発生させる目的で使用した。人工試料は、30 L の水道水をヒーターで約 60℃に加温し、ペクチンを 3g 及びゼラチンを 3g ずつ完全に溶解させたもの

(0.02%溶液)であり、100 L に希釈した後(ろ過開始時)の水温は 15±2℃、粘度は約 1.3mPa・s となり、粘性は水道水とほぼ変わらないものである。

(3) 平膜モジュールの振動の測定

この実験は、3種類のろ板厚さの平膜モジュールにおいて曝気による平膜モジュールの振動の変位を測定し、ろ板厚さの違いによる振動特性を明らかにすることを目的としている。

水槽に 100 L の水道水を満たし、レーザー変位計(LK-G150 KEYENCE)を用いて、図-3 に示す測定サイクルで膜表面及びろ板の変位をサンプリング周期 100 Hz で測定した。測定開始後基準点を定めるため曝気と吸引を停止させた状態で 20 秒間の測定を行い、水槽内を攪拌させるため 1 分間曝気のみを行い、その後間欠吸引を開始させた。前述した間欠吸引のサイクルを 1 サイクルとした場合、4 サイクルの測定を行った。これをファウリングが発生していないろ板及び膜シートの変位とする。

人工試料を投入しファウリング発生後、再び図-3 に示す測定サイクルでろ板及び膜シートの変位を測定した。これをファウリングが発生したろ板及び膜シートの変位とする。平膜モジュールは、曝気による圧力変動によって振動するため、それぞれの平膜モジュールの振動は独立しており、隣り合う模擬平膜モジュールの振動による影響はほぼ受けないものであると考えられる。測定点は、平膜モジュールの左右から 245mm(中心線上)における下端から 510 mm(中心点)、730 mm、950 mm(吸引ノズル高さ)の 3 点の変位を測定した。レーザー変位計は、平膜モジュールの膜表面とろ板の測定を行うため、表面と裏面にそれぞれ 1 台ずつ設置し、表面(膜表面)と裏面(ろ板)の変位の差分を膜シートの相対変位とした。圧力計は、ノズルと吸引ポンプ間の水面高さに設置した。

曝気	OFF	ON	ON	ON	ON	ON
吸引	OFF	OFF	ON	OFF	ON	OFF

20 秒 1 分 9 分 1 分 9 分 1 分

図-3 測定サイクル

(4) PIV を用いた液相流速の測定

この実験は、ろ板厚さの異なる平膜モジュールの振動が曝気による膜面近傍の液相流速に及ぼす影響を明らかにするため行ったものである。

図-4 に液相流速の測定における実験装置概略図を示す。水槽内には粒子径 250 μm のトレーサーを約 7 g 投入し、水槽の側面方向にレーザーユニット

(G2000 カトウ光研)を2 台設置しレーザー光を照射した。レーザーユニットから発光される光は約 1 mm のスリット状となっており、縦方向に拡散していくものとなっている。光を照射した部分を正面から高速カメラ(K4 カトウ光研)で撮影した。エアフラックスを 0.021 m/s、カメラのシャッタースピードは 200 fps、測定時間は約 10 秒間とし、レーザーによって可視化した流体中におけるトレーサーの動きを解析することにより液相流速を測定した。また、図-4 に示す 9 点は解析点を表しており、測定は各ろ板厚さの平膜モジュールにおいて 2 回ずつ行った。

図-4 液相流速の測定における装置概略図

(5) 膜面せん断応力の測定

この実験は、ろ板厚さの異なる平膜モジュールの振動がファウリングに与える影響の要因を明らかにすることを目的としている。

図-5 にせん断応力の測定における装置概略図を示し、図-6 に側面図の拡大図を示す。せん断応力の測定は平膜モジュールのろ板に穴を開けてせん断応力計を埋め込むため、全ての平膜モジュールは平膜モジュールに見立てた塩ビ板を使用した。片側の模擬平膜モジュールにせん断応力計を設置するためスリットを入れ、中央の測定用平膜モジュールに取り付けたリングにせん断応力計(S10W-1S SSK)をネジで固定した。せん断応力計の先端部分に取り付けられたセンサーヘッドは膜面に凹凸ができないように設置した。せん断応力計はコンディショナーに接続し、データを PC に出力した。せん断応力計には逆流洗を行うためのノズルが取り付けられており、チューブを接続して一回の測定が終わるごとに水道水を逆流させることにより内部の洗浄を行った。

せん断応力計からのアナログ信号において応答周波数が 20 Hz 以上の成分は外部電源によるノイズで

あるため、ローパスフィルターによってノイズを除去した。

水槽に 100 L の水道水を満たし、振動実験と同様、平膜モジュールの左右から 245 mm、下端から 510 mm、730 mm、950 mm の 3 地点にせん断応力計を設置し同時系列でせん断応力の測定を行い、エアフラックスを 0.021 m/s に設定し測定を行った。測定は曝気状態で 81.92 秒行い、せん断応力の測定開始前後で 0 点基準を定めるため、無曝気状態で 5.12 秒の測定も行った。

図-5 膜面せん断応力の測定における装置概略図

図-6 側面図の拡大図

3. 実験結果及び考察

(1) 膜間差圧の測定結果

図-7 に水道水を用いて行った平膜モジュールのろ過性能確認実験における膜間差圧とフラックスの関係を示す。原点を通るよう測定点に対し累乗近似曲線を示すと、膜間差圧に対するフラックスの増加割合は徐々に低減した。圧力によって膜は圧密するため、透過流束が減少し、図-7 のような曲線を示すと考えられる。すべての厚さにおいて各フラックスに対する膜間差圧はほぼ同値となったため、ろ過性能はほぼ同等であると示唆された。

図-7 各厚さにおける膜間差圧とフラックスの関係

図-8 に人工試料を投入したろ過実験におけるろ板厚さ 4 mm, 6 mm, 8 mm の平膜モジュールの膜間差圧の経時変化を示す。間欠吸引のため、吸引をしている 9 分間の測定値を平均し、この測定値に対して近似線を引き、直線の傾きを膜間差圧の上昇速度として表した。膜にファウリングが発生すると膜間差圧は上昇するため、膜間差圧がファウリング進行速度の指標となる。

ろ板厚さ 4 mm の平膜モジュールでは、約 250 分から 500 分の間に膜間差圧の上昇速度が増していき、約 500 分で急速に下がるといった挙動が見られた。また、8 mm の平膜でも約 1000 分で膜間差圧が上昇し急速に下がるという結果となった。要因としてこの間曝気の気泡が偏ってしまい、膜面に当たっていなかったため洗浄力が低下し膜間差圧が上昇してしまったものの、また気泡が膜面に当たり始め、膜間差圧が下がり上昇速度が戻ったことなどが考えられる。膜間差圧の上昇速度は、厚さ 4 mm では 0.0129 kPa/min, 厚さ 6 mm では 0.0028 kPa/min, 厚さ 8 mm では 0.0002 kPa/min となり、平膜モジュールのろ板厚さが大きいほどファウリングが抑制されることが示された。

図-8 膜間差圧の経時変化

(2) 平膜モジュールの振動の測定結果

図-9 に 4 mm, 6 mm, 8 mm の 3 種類の平膜モジュールの下端から 510 mm 地点(中心点)における平膜モジュールのろ板の変位の経時変化の一部(600 秒～700 秒)を示す。基準点である変位 0 mm は、曝気開始前の変位の平均値とし、曝気開始後の変位は、曝気開始前の変位の平均値との差分を変位量として表している。膜ユニット内は、曝気によって不規則に瞬間的な流速が発生するため、1 枚の平膜モジュールを挟む両曝気流路には常に速度差が生じる。その速度差によって圧力差が発生するため両側から働く圧力の影響により平膜モジュールは振動していると考えられるが、全てのろ板厚さの平膜モジュールにおいて不規則な振動現象が確認された。

図-9 ろ板の変位の経時変化

ろ板を両端固定梁と仮定すると式(1)、式(2)より、厚い平膜モジュールは断面二次モーメントが大きくなるため、変位量は小さくなったと考えられる。

$$\delta = \frac{PL^4}{384EI} \quad (1)$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (2)$$

δ : 変位量(mm), P : 単位長さあたりの圧力(N/mm), L : ろ板の横幅(mm), E : ヤング率(N/mm²), I : 断面二次モーメント(mm⁴), b : ろ板の縦幅(mm), h : ろ板の厚さ(mm)である。

ここで、ベルヌーイの定理から式(3)を仮定し、圧力 P と流速 v の標準偏差を取ると、式(4)が成り立つため、これを式(1)に代入し、断面 2 次モーメント I に式(2)を代入すると変位の標準偏差を式(5)で表すことができる。

$$\frac{P'}{\rho g} \cong \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

$$\sqrt{P^2} \cong \frac{\rho}{2} v^2 \quad (4)$$

$$\sqrt{\delta^2} = \frac{\rho L^3}{64Eb} \cdot \frac{v^2}{h^3} \quad (5)$$

ここに、 P' : 圧力の変動(N/mm²), v' : 流速の変動(mm/s), δ' : ろ板の変動(mm), ρ : 密度(kg/mm³), g : 重力加速度(mm/s²)である。

式(5)より、ろ板の振動は $v^2 \cdot h^3$ (v : 流速, h : ろ板厚さ)に比例して増加することが示された。ろ板の振動は、ろ板の厚さと曝気流路の流速に起因すると考えられる。ここで、図-10 に $v^2 \cdot h^3$ とろ板の変位の標準偏差の関係を示す。式(5)における流速 v の分散は、PIV を用いて測定した全地点の流速における時系列データの分散を平均した値を使用した。ろ板厚さ 6 mm と 8 mm の平膜モジュールでは $v^2 \cdot h^3$ とろ板の変位の標準偏差にほぼ比例の関係が見られたが、4 mm では $v^2 \cdot h^3$ に対して振動が小さくなった。測定を行ったろ板の両側には模擬平膜があり、平膜の振動は剛性の低下に伴い無限に大きくなるわけではなく、ある一定以上の振動は制限されるため、厚さ 6 mm 及び 8 mm の平膜モジュールで見られた比例の関係に比べ、4 mm ではろ板の振動が小さくなったと考えられる。

図-10 流速及びろ板厚さとのろ板の振動の関係

図-11 に人工試料を投入する前後での平膜モジュールの下端から 950 mm の地点における膜シートの経時変化の一部(600 秒～700 秒)を示す。吸引ノズルに最も近い平膜モジュール下端から 950 mm の地点では、吸引を停止すると膜シートが膨張し、吸引を再開するとろ板に吸着しろ板と一体となって振動する挙動が見られた。要因として吸引を停止すると吸引をしていた圧力が逆の方向へ元に戻ろうとする圧力が働くため、吸引ノズルに近い地点ではその影響を受けやすいことなどが考えられる。

図-11 950 mm 地点における膜シートの変位の経時変化

図-12 に人工試料を投入する前とファウリングが発生した後における測定点高さ(620 秒～680 秒)の膜シートの変位の標準偏差の関係を示す。膜シートの変位の標準偏差は、図-11 のような吸引停止中の膜シートの変位に対しフーリエ逆変換を行い、0.1 Hz 以下の周波数をカットして低周波の振動を除去した微振動のみを抽出した。図-12 より、最も吸引の影響を受けやすい平膜モジュールの下端から 950 mm 地点ではファウリングが発生すると膜シートの変動は小さくなった。膜シートに人工試料が付着していることにより吸引停止中に圧力を受けたとき、付着していない時よりも膜シートが重くなるため振動しにくくなり、変位が小さくなると考えられる。

図-12 測定点高さと膜シートの変動の関係

図-13 にろ板の変動のパワースペクトルを示す。ろ板のパワースペクトルは厚さ 4 mm と 6 mm の平膜において約 4.4 Hz, 8mm の平膜において約 5 Hz でピークが見られ、最も厚い 8 mm のろ板において振動周波数は大きくなった。また、厚さ 6 mm と 8 mm の平膜では約 2.2 Hz でもピークが見られ、2 つの振動周波数が約 2 倍となっていることから、2.2 Hz を基本振動とした 2 次モードの振動をしていたと示唆される。

図-13 ろ板の変動のパワースペクトル

ここで、平膜モジュールのろ板厚さの違いによって大きな差が得られたろ板の変動(変位の標準偏差)に着目し、図-14 にろ板の変位の標準偏差と膜間差圧の上昇速度の関係を示す。ろ板の変位の標準偏差は、各厚さにおける平膜モジュールの下端から 510 mm 地点のデータを使用している。図-14 より、ろ板の変動が小さいほど膜間差圧の上昇速度は小さくなることが示された。

図-14 ろ板の変動と膜間差圧の上昇速度の関係

(3) 液相流速の測定結果

図-15 に液相流速の経時変化を示す。全ろ板厚さにおいて図-4 における 3-b 地点の液相流速を示している。気泡の大きさや発生間隔が不規則であることから液相流速は常に変動する様子が確認された。

図-16 にろ板の変位の標準偏差と平均液相流速及び液相流速の標準偏差の関係を示す。図-16 より、ろ板の振動が大きいほど平均液相流速は小さくなった。平膜が大きく振動し膜間の曝気流路が小さくなったとき、流路が狭くなったことにより平膜が抵抗となり、流体がその抵抗を受けて流れにくくなったことから液相流速が小さくなったと推察される。

図-15 液相流速の経時変化

図-16 ろ板の変位の標準偏差と液相流速の関係

(4) 膜面せん断応力の測定結果

図-17 に各ろ板厚さにおける膜面せん断応力の経時変化(下端から 510mm 地点)を示す。せん断応力は曝気による流速や気泡と膜面の摩擦によって生じるが、気泡は大きさや発生頻度が不規則であるため、膜面にかかるせん断応力は常に変動を示している。点線の膜面有効せん断応力については後述することとする。

図-17 各厚さにおけるせん断応力の経時変化

図-18 にろ板の変位と標準偏差と平均せん断応力及びせん断応力の標準偏差の関係(下端から 510 mm 地点)を示す。せん断応力は、値が大きいほど膜面の洗浄に効果があるため、瞬間的に発生する大きいせん断応力を考慮するため、平均値だけでなく標準偏差も計算した。また、せん断応力は、せん断応力計のセンサーヘッドの面積(直径約 1 cm)の平均値を測定しているため、その面積によってせん断応力の変動が変化する可能性があることを前提として、検討を行った。図-18 より、ろ板の変位の標準偏差が小さいほど平均せん断応力は大きくなる負の相関が見られた。これは、図-16 より平膜モジュールの振動が小さいほど平均液相流速が大きくなることによるものであると考えられる。せん断応力は、膜面の洗浄に効果があるため、平膜モジュールの振動が小さいほどせん断応力が大きくなることから、平膜モジュールの振動を抑制することによってファウリング抑制効果が向上することが説明された。

図-18 ろ板の振動とせん断応力の関係

ランムゾーら¹³⁾は平膜状浸漬型 MBR における担体投入による膜面せん断応力の評価を行った。その結果、通常の MBR と比較して担体を投入した MBR ではせん断応力の時間平均値は小さくなるものの、せん断応力の時系列的なピーク高さが大きくなりろ過性能が向上したことを報告している。この結果から、せん断応力の評価において、時間平均値は測定時間に依存するため、時系列データの中で瞬間的に大きく働くせん断応力で評価することの重要性が示されている。

また、ランムゾーらは瞬間的に大きく働きかけるせん断応力を定性的に評価するために「平均せん断応力(せん断応力の時間平均値)+3×標準偏差」の計算を行い、この値が概ね頻度分布の 99.6%に相当し、計算した値が大きくなるにつれてろ過性能が向上したため、瞬間的に大きく膜面に働くせん断応力を評価する指標として妥当であることを示し、これを膜面有効せん断応力と定義している。

本研究においても前述したせん断応力の時間平均値に加えて膜面有効せん断応力の評価を行った。図-19 に時系列データより得られたせん断応力の頻度分布の例(ろ板厚さ 6 mm, 下端から 510 mm 地点)を示す。

膜面有効せん断応力は前述した図-17 のせん断応力の経時変化において、概ねろ板厚さ 4 mm では 7 秒, 6 mm では 23 秒, 8 mm では 15 秒程度に 1 回発生する瞬間的に大きく働きかけるせん断応力であるため、せん断応力を評価する指標として妥当であることが示された。

図-19 せん断応力の頻度分布

(5) 平膜モジュールの振動がファウリングに及ぼす影響

図-20 に有効せん断応力と膜間差圧の上昇速度の関係を示す。図-20 より、膜面有効せん断応力が大きいほど膜間差圧の上昇速度は小さくなり、膜面有効せん断応力によりファウリングが抑制されていることが示された。

図-20 膜面有効せん断応力と膜間差圧の上昇速度の関係

図-21 に平膜モジュールの振動がファウリングに及ぼす影響のメカニズムを示す。平膜モジュールは、隣り合う曝気流路に瞬間的な速度差が常に生じるた

め、両側から受ける圧力差によって振動する。平膜モジュールが振動すると膜間の曝気流路が狭くなったとき平膜モジュールが流れの抵抗となり流体が流れにくくなるため、液相流速は低減されることが推察された。膜間における液相流速が小さくなると、膜面に働くせん断応力が小さくなるため、平膜モジュールの振動が大きい方が膜面の洗浄効果が小さくなった。それに対し、平膜モジュールの振動が小さいと平膜モジュールの抵抗を受けにくいいため液相流速は減少せず、それに伴ってせん断応力が大きく働くため、ファウリング抑制効果が大きくなったと考えられる。

既存の研究⁷⁾では、平膜モジュールは強制振動であり、かつ膜面に対して水平方向の振動であるが、本研究での平膜モジュールは圧力変動などによる励起振動であるため、異なる結果になったと考えられる。

図-21 平膜モジュールの振動がファウリングに及ぼす影響

4. 結論

レーザー変位計を用いた平膜モジュールの振動変位の測定及び人工試料を用いた膜間差圧の測定によって、平膜の振動と膜間差圧の上昇速度の関係を検討し、PIV を用いた液相流速の測定、膜面せん断応力の測定によって平膜モジュールに働く流体挙動を解明した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 連続曝気の条件下で、不規則な流れ場により発生する圧力変動によって平膜モジュールが振動する現象が観察され、平膜モジュールのろ板厚さが大きくなるにつれて変位の変動が小さくなることが、概ね示唆された。
- 2) 膜シートは、吸引ノズル近傍の地点では吸引圧力の影響を受けやすく、膨張、収縮を繰り返す現象が見られた。また、ファウリングが発生するとその挙動は小さくなることが示唆された。

- 3) 平膜モジュールのろ板厚さが大きくなるにつれて振動の周波数が大きくなること、ろ板の変動のパワースペクトルから示された。
- 4) 平膜モジュールの変位の変動が小さくなるにつれて液相流速が大きくなるため、膜面に働くせん断応力が大きくなることから洗浄効果が高くなり、ファウリングの進行を抑制するメカニズムが明らかとなった。

参考文献

- 1) 酒井陽介, 小松俊哉, 姫野修司, 高和真吾: MBR による実下水の長期連続処理における担体投入および曝気強度の影響, 土木学会論文集 G, Vol.64, No.2, pp160-167, 2008.6
- 2) 村上孝雄: 下水道における膜分離技術導入の現状と今後の展望, 環境技術, Vol.35, No.3, pp168-173, 2006
- 3) 渡邊亮哉, 高橋慎太郎, 砂庭崇之, 若原慎一郎, 李玉友: 浸漬型嫌気性膜分離法を用いた浮遊物質含有人工下水の処理性能と微生物群集構造解析, 水環境学会誌, Vol.36, No.6, pp157-164, 2013
- 4) 村上孝雄: 膜分離活性汚泥法と高度処理技術の展望, 下水道協会誌, Vol.43, No.519, pp7-12, 2006
- 5) 日本下水道事業団 技術戦略部, 膜分離活性汚泥法の技術評価に関する第2次報告書—MBRの適用拡大へ向けて—2013.4
- 6) AnushaKola, YunYe, PierreLe-Clech, VickiChen: Transverse Vibration as novel membrane fouling mitigation strategy in anaerobic membrane bioreactor applications, *Jornal of Membrane Science*, Vol.455, pp320-329, 2014
- 7) 谷田克義, 高田一貴, 小森悟: 膜の分離特性に及ぼす振動の影響, 化学工学論文集, Vol.27, No.3, pp379-385, 2001
- 8) 尾崎則篤, 山本和夫: 平膜による活性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, pp37-48, 1998.2
- 9) 酒井駿治, 長岡裕, 井上美穂: レーザー変位計を用いた浸漬型平膜モジュールの曝気による振動挙動に関する研究, 環境工学研究論文集, Vol.51, ppIII 165-III 173, 2014
- 10) 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, Vol.44, 2007
- 11) 日本機械学会: 機械実用便覧 改訂第 6 版
- 12) 三好太郎, 大和信大, 木村克輝, 渡辺義公: 都市下水処理を行う MBR において発現する膜ファウリングに関する研究, 衛生工学シンポジウム論文集, pp231-234, 2005.11
- 13) ランムゾー, 李泰日, 長岡裕, 見島伊織: 平膜状浸漬型 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, pp170-177, 2011

(2015.5.22 受付)

Influence of vibration of flat-sheet membrane modules on fouling in MBRs

Miho Inoue, Hiroshi Nagaoka, Shunji Sakai and Yukako Morita

Vibration of flat-sheet membrane modules by aeration in the MBRs is thought to influence the increase rate of the transmembrane pressure caused by membrane fouling. In a laboratory scale experiment, influence of the thickness of flat-sheet membrane module on transmembrane pressure increase rate was investigated using artificial activated sludge and three kinds of flat membranes with varying the thickness. The magnitude of the vibration of the membrane sheets was measured by using a laser displacement meter. Although the vibration of thicker flat membrane was smaller, the rate of transmembrane pressure increase was smaller in the thicker module. The shear stress on the surface of membrane sheet caused by aeration was measured and, it was found that larger vibration displacement of membrane sheet causes smaller shear stress on membrane sheet, the mechanism of which was explained by the inhibition of water flow over membrane sheets by the vibration of membrane sheets.