振動型中空糸膜濾過装置の開発*

榎 英雄^{*1}, 斉藤 功治^{*2}, 原 直樹^{*3}

Development of Vibrating Hollow-Fiber Filtration Device

Hideo ENOKI^{*4}, Kouji SAITOU and Naoki HARA^{**} Hitachi, Ltd., Mechanical Engineering Research Laboratory,
502 Kandatsu-machi, Tsuchiura-shi, Ibaraki, 300-0013 Japan

A miniature vibrating hollow-fiber filtration device, in which a hollow-fiber cartridge mounted on a bridge held by two plate springs is vibrated to axial direction by a vibration motor, has been developed. The device can restrain the deposition of particles on the membrane surface by the vibration. A device, which has two hollow-fiber (length of 190 mm, an inside diameter of 1 mm and pore diameter of 0.1 μm), was tested at a membrane vibration frequency of 40 Hz and an amplitude of 2.5 mm p-p. During the test the liquid (Kaolin suspension; turbidity: 1 000) was filtered through the membrane for two weeks. It was found that the rate of permeation is almost constant after the test. However, when it was not vibrated, the end permeation rate was one quarter of the rate when vibrated.

Key Words: Oscillatory Flow, Pipe Flow, Vibration of Mechanism, Hollow-Fiber Filtration

1. 緒 論

河川、湖沼、海洋などの現場に設置し水質を連続的に測定する環境監視用の分析装置は、少量ではあるが汚濁した環境水を、人手を介さず常に濾過供給する必要がある。そのため、スペースの限られた場所に設置できる小型で省メンテナンスの濾過装置が望まれている。濾過膜への粒子の堆積を防止するため、膜を振動させ濾過性能を大幅に向上した振動型膜濾過装置が製品化されている^①。これらの装置では、円筒状のケーシングに入った積層濾過膜を、ケーシングを支える円柱のねじり振動により供給液の流れに平行して振動させ、膜面上に生じるせん断力で膜面への粒子の付着を防止する。しかしながら、これらの装置は、構造が複雑なため小型化が難しい。小型・省メンテナンスの要求に応えるためには、構造のシンプルなフィルタが望ましい。市販の各種フィルタについて検討したところ、ケーシング中に中空糸を直線状にならべたクロスフローのカートリッジは構造が簡素で、外径が数ミリメートルで、長さが 200mm 程度のもが手に入ることがわかった。調査した範囲では、この方式による振動型膜濾過装置は見当たらなかった。そこで、中空糸

フィルタを、中空糸の軸方向に単振動させ膜への粒子の堆積を防止する方式について検討することとした。

2. おもな記号

A_1, A_2 : はりの断面積
 E : ヤング率
 E_v : 円筒内の液体の動き易さを示す無次元数
 f : z 方向の振動周波数
 $F_z(x, t)$: 液体に働く z 方向のせん断力
 I_1, I_2 : はりの断面 2 次モーメント
 l : 円筒面の長さ
 l_1, l_2 : はりの長さ
 r : 中空糸の径方向の位置
 r_0 : 中空糸の内径
 r_p : 平膜面から鉛直方向の位置
 t : 時間
 V_0 : 膜の振動速度振幅
 $v_z(x, t)$: 液体の z 方向の速度分布
 W : 荷重
 z : 平膜面方向または中空糸の軸方向の位置
 γ : 単位体積あたりの重量
 η_L : 液体の粘度
 ν_L : 液体の動粘度
 ρ_L : 液体の密度

* 原稿受付 2003 年 2 月 17 日。

^{*1} 正員, (株)日立製作所(〒300-0013 土浦市神立町 502)。^{*2} (株)日立那珂エレクトロニクス(〒319-0316 茨城県東茨城郡内原町三湯 500)。^{*3} (株)日立製作所(〒319-1221 日立市大みか町 2-1)。

E-mail: enoki@merl.hitachi.co.jp

3. 円筒内の液体振動

振動する濾過膜面に接触している液体を考える。図1の様に、膜面が平面の場合、液体の面方向 z の速度分布は、(1)式の様に表されることが示されている²⁾。

$$v_z(r, t) = V_0 \exp(-kr) \exp[-j(kr - 2\pi ft)] \quad (1)$$

ここで、 $k = (2\pi\rho_L/2\eta_L)^{1/2}$ である。

Fig. 1 Flow-velocity distribution on a flat membrane

一方、中空糸の場合、図2の様に、液体を満たした円筒状の中空糸が、円筒の中心軸方向に振動する場合、中心から r の位置にある液体の円筒面でのせん断応力と歪みの関係は、 $A(r)$ を円筒面の面積とすると、

$$\frac{F_z(r, t)}{A(r)} = \eta_L \frac{\partial v_z(r, t)}{\partial r}, \quad A(r) = 2\pi r l \quad (2)$$

となる。

また、円筒に働く力は円筒を加速するから、

$$\frac{\partial F_z(r, t)}{\partial r} = \rho_L A(r) \frac{\partial v_z(r, t)}{\partial t} \quad (3)$$

となる。

Fig. 2 Flow-velocity distribution on a cylindrical membrane

さらに、(2)式、(3)式の関係から、

$$\frac{\partial v_z(r, t)}{\partial t} = \frac{\eta_L}{\rho_L} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial v_z(r, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_z(r, t)}{\partial r^2} \right\} \quad (4)$$

となる。(4)式について境界条件を、

$$v_z(r, 0) = 0 \quad (5)$$

$$v_z(r_0, t) = V_0 \sin 2\pi ft \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 v_z(0, t)}{\partial r^2} = 0 \quad (7)$$

とし数値計算によりいくつかの条件で解を求め平板の場合と比較した。

(a) Plate membrane (1 Hz)

(b) Cylindrical membrane (1 Hz)

(c) Plate membrane (10 Hz)

(d) Cylindrical membrane (10 Hz)

Fig. 3 Comparison of liquid vibrations on a plate membrane and a cylindrical membrane

図3では一般的に使用されている中空糸のサイズを想定し、円筒の内径を1 mmとした。また、振動速度の最大値は加振の程度により異なるが、ここでは0.001 m/sとして計算した。表内の図のx軸は経過時間、y軸は、円筒の場合、中心軸からの距離、平板の場合、壁面からの距離、z軸は振動速度を示している。円筒の場合、1ヘルツのオーダ以下の低周波では、壁面の影響が中心まで及び、液体の振動速度が中心部と壁面でほとんど変わらなくなる。一方、平板の場合は、円筒の場合に比べ壁面の影響が小さい。壁面と中心での速度変化が小さい場合は、濾過膜内壁でのせん断力によるクリーニングの効果は期待出来ない。

(4)式の次元に注目すると、式の左辺は時間の微分で $v_z(r,t)$ と周波数 f (1/sの次元)の積と考えられる。また、同様に右辺は $v_z(r,t)$ と $\eta_L/(\rho_L r^2)$ の積と考えられるから、これを $2\pi f$ で割って r_0 を代表値として r の代わりに入れると、

$$E_v = \frac{\eta_L}{2\pi\rho_L f r^2} = \frac{v_L}{2\pi f r_0^2} \quad (8)$$

なる無次元量が得られる。この量は、流体の粘性が小さい、密度が大きい、壁面の振動周波数が高い、円筒の内径が大きい場合は小さくなる。これは内壁の振動により円筒内に生じる流体の運動の定性的な特性をあらわしており、これにより円筒内の液体の動き易さの程度を表すことができる。

Fig. 4 Velocity amplitude ratio vs. dimensionless number

(4)式について数値計算により中心での振動速度の最大値と、内壁での振動速度の最大値の比(速度振幅比と呼ぶ)を無次元数 E_v に対して求めた。図4に実使用条件の代表例として管の直径が1 mm、試料液が水で温度が300 Kの時の E_v と速度振幅比の関係を示す。図4にプロットした白丸に近接する

数字は壁面の振動周波数で、周波数の上昇により速度振幅比が低下し、クリーニングの効果が期待できることを示している。

4. 機能確認実験

以上で述べた振動を、実際にフィルタカートリッジに与えるためには、カートリッジを軸方向に加振する機構が必要になる。実用化のためには、できるかぎり構造が簡単で耐久性のある機構が望ましい。そのような観点から、以下に示すような簡素なラーメン構造の機構を採用することとし、第2章での検討をもとに、フィルタカートリッジのサイズに合わせた実験装置を設計し、濾過機能の確認を行った。

4.1 実験系 図5に実験装置、図6に実験系を示す。使用した材料・部品、試料を以下に示す。

- ・フィルタ：孔径 0.1 μm 、中空糸内径 1 mm (2本)、膜面積 9.5 cm^2 、モジュールサイズ：径 3 mm、長さ 190 mm。

濾過膜の孔径は、実使用を想定し、溶存成分は通過するが、微生物はほとんどすべて除去できる0.1 μm とした。

- ・モータ： $\phi 19 \times 35$ mm、ブラシレスDCモータ
- ・板ばね：板厚 0.3 mm、幅 22 mm、長さ：32, 28, 23 mmの3種、ばね用ステンレス材料
- ・試料水：カオリン 10 gを純水 10 Lに懸濁

Fig. 5 Vibrating hollow fiber filtration device

図5に示すように、直方体形状の2個のブロックで、板ばねの一端を挟み、ベース上に2枚の板ば

ねを向かい合わせて固定する。板ばねの他端を、同様のブロックでフィルタの支持板の両端に固定する。支持板の中央にはモータをねじ止めし、支持板を貫通したモータの回転軸にアンバランスマスを取り付ける。フィルタは支持板上に固定した2個の取り付け金具に取り付ける。フィルタの上端には十字状の流路を有するコネクタをはめ込み、図5(a)の様にフィルタの入り口が流路壁とほぼ同じ高さにくるように取り付け。これにより、流路を流れる試料水内の粒子がフィルタの入り口付近に堆積し入り口を塞ぐのを防止する。

図6に示すように、貯留槽から水位差により流れ出た試料水はフィルタ入り口に直交する流路を通過する。フィルタ入り口から中空糸内に入った試料水は中空糸で濾過され、濾過液出口からモジュール外に排出される。濾過液出口は上下に2箇所あるが、空気抜きのため上方のみを使用し下方は閉塞する。さらに、濾過液出口から出た濾過水を容器にとり、重量変化を秤により定期的に測定し、濾過水の比重を1とみなし体積に換算し濾過量とした。容器に溜まった濾過水は、定期的に貯留槽に戻される。また、濾過されずに中空糸内を通過した試料液はフィルタの下端出口から排出される。このフィルタ通過水と、フィルタ入り口を素通りした通過した水は、しごきポンプにより貯留槽に戻し循環再利用する。

Fig. 6 Experimental setup

4.2 振動特性 実験装置の振動モデルとして、図7に示すように、3つのはりからなるラーメン構造上に荷重 W のフィルタなどが乗っていると考える。ラーメン構造の横方向振動を考え重力を無視し、

Reyleigh-Ritzの方法により共振周波数 f_n を求めると、

$$f_n^2 = \frac{21gEI_1}{5\pi^2 W l_1^3 \{1 + (0.624 l_1 A_1 + l_2 A_2)(\gamma/W)\}} \quad (9)$$

となる⁹⁾。

(9)式を基に、支持部材やフィルタのサイズ・重さと、ばね材の弾性係数等から、数十ヘルツの共振を引き起こす板ばねのサイズを決めた。

図8、図9に板ばねの長さを変化させたときのモータ印加電圧に対する振動周波数・振幅の変化を示す。データは支持板の下端の振動を変位センサで計測したものである。加振力（アンバランスマス回転による遠心力）はモータの回転軸の許容最大軸負荷が10Nであるのでその半分の約5Nとした。

DCモータは、無負荷の場合、電圧にほぼ比例する回転周波数で回転する。しかしながら、図8に示すように本装置で、モータの印加電圧を徐々に上昇した場合（×のデータ）、振動系の共振周波数に一致する回転速度に相当する電圧に達したあと、しばらくの間、振動系の共振（破線で示す(9)式で求めた共振周波数にほぼ一致）に引き込まれ回転周波数の上昇が見られない。さらに、電圧を上昇すると回転周波数が無負荷の場合の回転周波数まで一気に変化し、以後は無負荷の場合と同じ変化をたどる（図8(c)の場合は変化点まで達していない）。電圧を徐々に低下した場合（○のデータ）、電圧上昇の場合と異なり、周波数は徐々に減少し、共振周波数より若干高いところで共振周波数に引き込まれ、以後は電圧上昇時と同じ経過をたどる。

一方、図9に示すように、振幅を見ると、電圧上昇時は振動系の周波数に一致する回転速度に相当する電圧に達した時点で振幅が急激に（0.1 mmp-p から 1 mmp-p 程度に1桁）上昇する。その後、徐々に振幅が増加し数倍の振幅になった時点で、周波数の急激な低下に伴い振幅も急激に低下する（図8(c)の場合は変化点まで達していない）。以上から、通常の加振の場合、共振点をずれると急激に振幅が低下するが、DCモータを使用することで、モータの回転が共振に引き込まれることにより広い電圧範囲で安定して大きな振動が得られることがわかった（本装置の場合2V程度の電圧範囲、したがって、共振点に合わせるための微妙な調整を要しない）。

Fig. 7 Rahmen structure model

(a) Plate spring length = 32 mm

(b) Plate spring length = 28 mm

(c) Plate spring length = 23 mm

Fig. 8 Vibration frequency vs. voltage applied to motor

(a) Plate spring length = 32 mm

(b) Plate spring length = 28 mm

(c) Plate spring length = 23 mm

Fig. 9 Vibration amplitude vs. voltage applied to motor

4.3 濾過特性 モータへの負荷、支持体の振動などを考慮し、板ばねの長さを 28 mm とした。また、周波数 40 Hz、振幅 2.5 mm p-p (モータ印加電圧 6 V、消費電流 0.05 A) とし、図 6 の実験系で長期にわたり濾過量の変化を測定した。実験は同じ流体系を 2 セット用意し、一方を加振 (40 Hz、2.5 mm p-p) し、他方を対照系として加振しない条件で並行して行った。

結果を図10, 図11に示す. 試料水は 1000 mg/L のカオリン懸濁液である. 加振した場合, 20 日以上長期にわたって流量の変化がないことがわかる. 一方, 加振しない場合は, 流量が徐々に減少し2週間程度で初期の 1/4 程度の流量となり平衡する. 使用したカオリン懸濁液に含まれるカオリン粒子の粒径は $0.8\ \mu\text{m}$ 程度以上であるが, 膜孔径は $0.1\ \mu\text{m}$ と十分小さいため, 膜孔に閉塞する粒子はほとんど無かったと考えられる. また, 溶媒は純水のため膜に吸着する物質もほとんど無く, 流量の減少は膜面に生じたケーキ層によるものと考えられる. したがって, 今回の実験結果は振動により膜面のケーキ層の形成が防止できたことを示している.

Fig. 10 Permeated liquid volume in the case of vibrating filtration and non-vibrating filtration

Fig. 11 Permeation rate vs. time for two filtration methods

5. 結 論

水質監視など, 連続運転を必要とする分析装置用に, 中空糸フィルタを使用した小型で省メンテナンスの振動型膜濾過装置につき検討し, 試作・機能確認実験を行い, 以下の結果を得た.

(1) 2枚の板ばねで支持されたブリッジ上に中空糸フィルタカートリッジを取り付け, ブリッジの中央に振動モータ (DCモータの軸にアンバランスマスを取り付けた) を取り付け, 全体を中空糸の軸方向に加振する振動型膜濾過装置を考案した.

(2) 中空糸のような円筒状の膜では, 液体の周囲が膜で覆われているため, 平膜に比べ, 液体が膜の振動に引きずられる傾向が強い. $E = v_L / (2\pi f r_0^2)$ なる無次元量は, 内壁の振動により円筒内に生じる流体の運動の定性的な特性を表す. これにより円筒内の液体の動き易さの程度を見積もることができ, この値が小さいほど膜面でのクリーニングの効果が大きいと考えられる.

(3) モータの回転運動は振動系の共振に引き込まれ, 2 V 程度の広い電圧範囲で共振周波数に一致して安定に振動した.

(4) モータへの負荷, 支持体の振動などを考慮し, 板ばねの長さを 28 mm とし, 周波数 40 Hz, 振幅 2.5 mmp-p で実験を行った. 孔径 $0.1\ \mu\text{m}$ の濾過膜で 1000 mg/L のカオリン懸濁液を連続して濾過した場合, 加振した場合は 20 日間で濾過速度の変化は見られなかった. 加振しない場合は, 濾過速度は 20 日間で約 1/4 となり, 加振の効果を確認できた.

文 献

- (1) Brad Culkin, Vibratory Shear Enhanced Processing : An Answer to Membrane Fouling?, Chemical Processing, vol.54, No.1 (1991) 42-46.
- (2) K.Kenji Kanazawa and Joseph G.Gordon II, The Oscillation Frequency of a Quartz Resonator in contact with a Liquid, Analytica Chimica Acta, 175 (1985) 99-105.
- (3) 谷口修, 振動工学ハンドブック, 養軒堂 (1976), 182.