

(17) 一方向流および波動条件下において中空糸膜モジュールの吸引特性に与える乱流の影響

Effect of Turbulence on the Performance of Hollowfiber Membrane Modules under Steady Flow and Oscillatory Flow Conditions

増田 憲寿*, 長岡 裕**

Kenju MASUDA*, Hiroshi NAGAOKA**

ABSTRACT;Effect of turbulence of water on the performance of hollowfiber membrane modules were investigated under both steady flow and oscillating flow conditions. Hollowfiber membrane module was made with one end of the fiber fixed to a plate and with the other side kept free in flow, so that it resembles aquatic plants. Two open channels, one is for steady flow condition and the other is for oscillatory flow condition, were prepared, in which the membrane modules were submerged and suspended from the top. Velocity and turbulence near the modules was measured by a Laser Doppler Velocimeter. Kaoline was mixed in the channel water and increase of filtration resistance of membrane was measured in both of the conditions of flow. The increase of the resistance was slower in higher turbulence condition, which suggests the importance of turbulence of water for removing accumulated particles from membrane under both steady flow and oscillating flow conditions.

KEYWORDS;membrane separation, hollow fiber membrane, turbulence, wave, oscillatory flow

1. はじめに

中空糸膜を利用した膜分離モジュールは単位体積あたりの膜面積が大きく、コンパクトな膜分離装置を実現することが可能であると考えられている。しかし、中空糸膜同士が膜面に付着堆積する除去対象固形物によって容易に固着、集団化して有効膜面積が減少する現象を防止することが必要となる。速いクロスフロー流速により強い膜面のせん断応力を実現し、これにより付着堆積固形物を剥離させることは極めて有効であるが、必要となるポンプ動力が大きくなり、ランニングコストが莫大になることが問題点として指摘されている。

これに対し、中空糸膜の一端を自由な状態のままで水草状に密に植え付け、定常な流れ場の中にこれを浸漬させれば、水草状物質の存在により流れが不安定になり水草を揺動させる、いわゆる穂波現象が発生し¹⁾ ²⁾、中空糸膜を大きく揺動させることによって固形物の付着堆積を防ぐ効果があると考えられる^{3) 4)}。この場合、固形物の剥離は膜面のせん断応力によるのではなく膜の緩やかな揺動によるのであり、この揺動は流れの変曲点不安定に起因する組織渦により発生する⁵⁾ので、これに要するエネルギーはせん断応力を利用す

*武蔵工業大学大学院 (Graduate School of Musashi Institute of Technology)

**武蔵工業大学工学部 (Musashi Institute of Technology)

るシステムに比べ遙かに小さいと考えられるので、省エネルギー型の膜分離装置の開発が可能となる。また、この膜モジュールを河川や水路等に直接上部より懸垂し透過水を吸引する事ができれば、水路等の水の流れの運動エネルギーを利用して固形物を剥離させることになるので、さらなる省エネルギーと未利用エネルギー利用を実現することになり、また現在の浄水システムに代わる全く新しい浄水システムを開発することも将来可能になることも考えられる^{6) 7) 8)}。

一方、進行波中に同様の中空糸膜モジュールを浸漬させると、波動に起因する水塊の楕円運動により、中空糸膜同士が常に独立して運動することとなり、膜同士が固着して有効膜面積が減少することを防ぐことができると考えられる。波運動においてはほとんどの場合壁面上の境界層の存在を無視して考えることが可能であり、完全流体として取り扱うことができるのでせん断力によりエネルギー損失はほとんど無く、極めて優れた省エネルギー型のシステムを実現する可能性が秘められていると考えられる。これをたとえば沿岸域の海面に懸垂させることにより、海水浄化システムとすることも将来可能になることも考えられる⁹⁾。

以上の背景に基づき、本研究は、これらの両条件における付着堆積固形物の剥離効果を比較し、そのメカニズムを統一的に説明することを目的とするものである。特に両システムにおける流水中の乱れに注目し、膜のろ過抵抗の上昇速度と乱れの強さの関係について統一的に検討を加えたものである。

2. 実験装置

2. 1 一方向流水路

一方向流水路の概略をFig. 1に示す。水路は2本の独立した流路からなり、水路の断面平均流速が高流速と低流速の2条件で同時に実験ができるようにした。水路内水は、水路上流端に設置した最大流量120 L/minのマグネットポンプを用いて循環させた。中空糸膜装置は水路全体に懸垂した。中空糸膜装置は塩化ビニル管(長さ3.5cm, 内径13 mm, 外径18mm)に膜を45本植生したものを水路全体に流下方向に7cm間隔で合計22個を設置した。

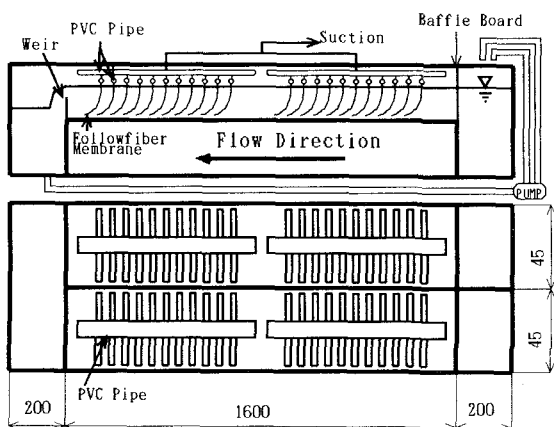


Fig. 1 Flow through channel (unit:mm)

2. 2 造波水路

造波装置を持つ実験水路の概略をFig. 2に示す。水路上流側にアクリル製の造波板を設置し、造波板の周期を2秒に設定した。造波板の振幅は一定とした。下流側には反射波の影響を防ぐため、ゴム製の消波装置を設けた。中空糸膜装置はチューブコネクタに膜を50本植生したものを長さ60cmの塩化ビニル管に6cm間隔で直列に10個接続し、1モジュールとする。水路には計4モジュールを浸漬させたが、上流側と下流側にそれぞれ2モジュールずつ独立させて吸引できる

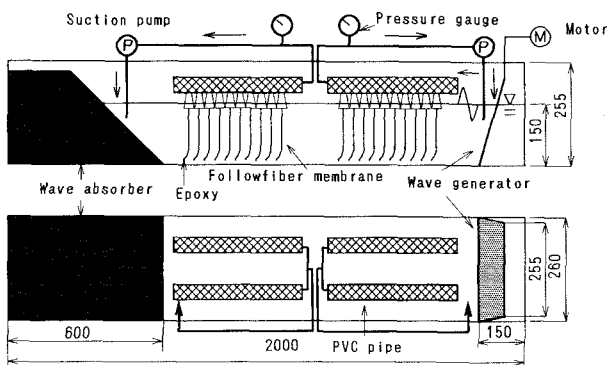


Fig. 2 Wave channel (unit:mm)

よう設置し，2種類の波動条件下（波高の高い造波板近くと波高の小さい消波材近くの2箇所）で実験が可能なようにした．

2. 3 中空糸膜モジュール

用いた中空糸膜はポリエチレン製MF膜（内径0.28mm，外径0.41mm，孔径0.03μm）であり，膜の先端部の穴は全てエポキシ樹脂系接着剤で埋めた．吸引はマスターフレックス可変ポンプ（型式PA21-B）で行い，ポンプヘッドは送液量10～1000mL/minのものを用いた．送液チューブには，加圧減圧用途に適しているノーブレンチューブを使用した．実験条件はTable 1に示す．植生密度（Membrane area density）とは，中空糸膜の全表面積を，その植え付け面積で除したものである．

Table 1 Experimental conditions

	Flow through		Wave
Channel	NO.1	NO.2	NO.3
Flow rate of the channel(L/min)	45	20	-
Averaged velocity(cm/s)	16.7	6.37	-
Area of membrane(cm ²)	1530		3864
Membrane area density(cm ² /cm ²)	2.13		1.01
Length of hollowfiber(cm)	12		15
Depth of water(cm)	11		15

3. 実験方法

3. 1 カオリンをモデル粒子とした吸引実験

異なる水理条件（断面平均流速）に設定した開水路内および造波装置を持つ水路内に膜モジュールを設置し，流水の乱れおよび波の振幅がろ過抵抗に与える影響を観測した．

本実験では水路内水として蒸留水を使用し，モデル濁質として過酸化水素水，ピロリン酸ナトリウムにより分散処理を施したカオリンを用いた．処理方法は，カオリン約50g，蒸留水90ml，過酸化水素水(H₂O₂)10mlを混ぜ合わせ，110℃の恒温乾燥炉で約50分間加熱処理をした．冷却後，分散剤としてピロリン酸ナトリウム(Na₂P₂O₇)の飽和溶液10mlを加えた．蒸留水を加え，1000mlとし，拡散後約4時間静置し，上澄み液約950 mlを使用した．

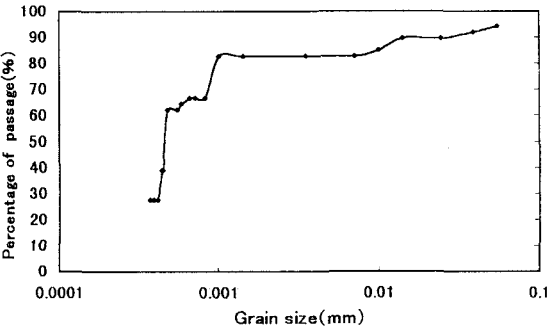


Fig.3 Grain size accumulation curve(Kaoline)

実験に用いた分散処理後のカオリンの物性，

すなわち粒径の分布状態を知るため，粒度分析を行い，粒径加積曲線をFig. 3に示した．密度は2.64g/cm³であった．粒度分析の方法は，カオリンが細粒土のため，比重計法で行った（JIS A 1204）．分散処理後のカオリンは粒径が非常に細かく，透水性が低い．

カオリンを水路に投入後，定時毎に吸引圧，水温，膜透過流量を測定した．水路内濁度は80mg/L～120 mg/Lになるようにカオリンまたは蒸留水を投入して調整し，投入前後の濁度を測定した．初期透過流束を決定し，その値を保つように調整した．

3. 2 流速および乱れ強度の測定

流水の乱れや波の振幅が及ぼす膜の揺動状況を明らかにするために、L. D. V. (レーザードップラー流速計) を用いて水路の流速及び乱れ強度を測定した。レーザ散乱用のトレーサーとしてコピー用修正液(白色顔料懸濁液)を使用した。測定ポイントは、一方向流水路では水路中央部、造波水路では水路上流(上端から60cm)、下流部(同120cm)の2ポイントでそれぞれ中空糸膜部分の後方を水路底面より上方に5mm間隔で測定した(Fig4, Fig5参照)。サンプリング周波数100Hz、サンプリング数4096でA/D変換の後にパーソナルコンピュータにデータを取り込んだ。データはFFT(高速フーリエ変換)法によりスペクトル解析を行い、流速変動を波成分と乱れ成分とに分離した。分離方法として境界パワースペクトルを $10\text{cm}^2/\text{s}$ とし、それ以上に卓越した周波数成分を波動成分、それ以外の周波数成分を乱れ成分とした。

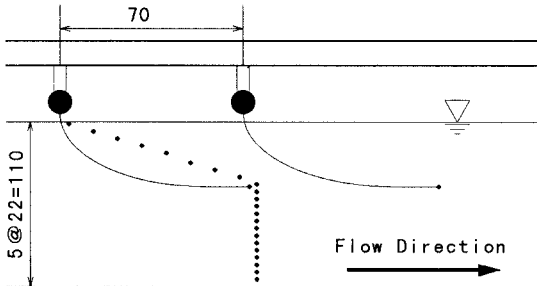


Fig. 4 Measurement point (Flow)
(unit:mm)

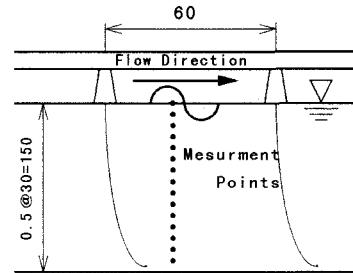


Fig. 5 Measurement point (Wave)
(unit:mm)

4. 実験結果

4. 1 膜透過流束および膜のろ過抵抗の経日変化

透過流束(フラックス)の経時変化をFig. 6(一方向流), Fig. 7(造波)に、ろ過抵抗の経時変化をFig. 8(一方向流), Fig. 9(造波)に示す。一方向流水路では、平均流速が大きい方が高い流束を維持することができた。造波水路では造波板に近い上流側の方が、往復流による波の振幅が大きいために濁質が剥離しやすく、ろ過抵抗は下流側よりも小さくなった。

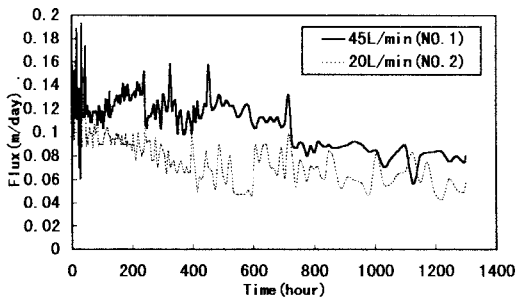


Fig. 6 Variation of flux (Steady flow)

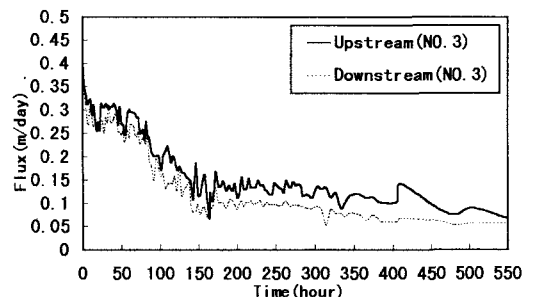


Fig. 7 Variation of flux (Wave)

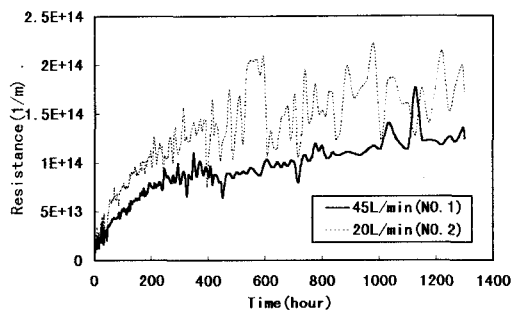


Fig. 8 Variation of filtration resistance (Steady flow)

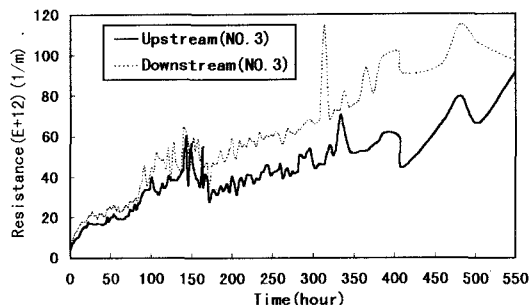


Fig. 9 Variation of filtration resistance (Wave)

4. 2 流速の測定結果

Fig. 10に一方向流水路における流速測定結果の一例（高流速水路における膜の先端近くの点）を、Fig. 11に波動水路における流速測定結果の一例（沖側モジュールにおける膜先端近くの点）を示す。波動水路における流速変動には波による変動とそれより周波数の大きい乱れによる変動の両方が現れていることが示されている。これらの流速変動条件から計算された、流速変動エネルギーのパワースペクトルをFig. 12およびFig. 13に示す。一方向流におけるパワースペクトルにおいて、2Hz以上の周波数領域でパワースペクトルが周波数の $-5/3$ 乗に比例しており、乱れの慣性小領域となっていると推察される。一方、波動水路においては、波に起因するピークが約0.6Hzと1.2Hzにおいて現れているが、これを除くとパワースペクトルが周波数の $-5/3$ 乗にほぼ比例しており、乱れの慣性小領域となっている。この乱れエネルギーは波が中空糸膜モジュールを通過する際に生じたものであると思われる。

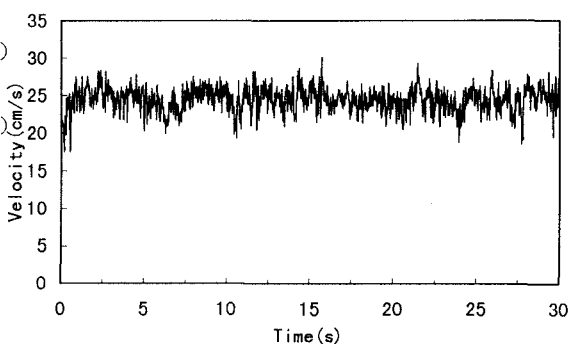


Fig. 10 Data of velocity (Steady flow)

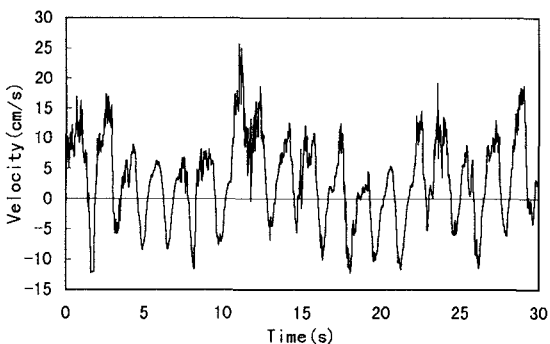


Fig. 11 Data of velocity (Wave)

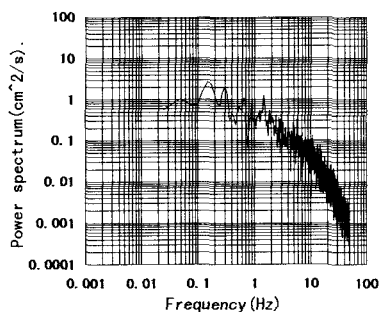


Fig. 12 Power spectrum of velocity (Steady flow)

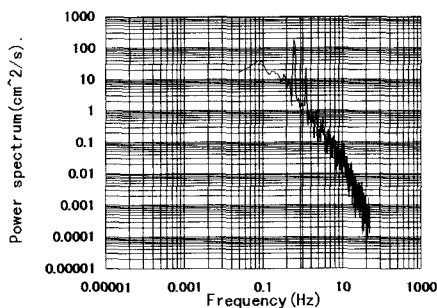


Fig. 13 Power spectrum of velocity (Wave)

一方向流水路における水平方向流速分布図をFig. 14に、乱れ強度分布をFig. 15に示す。流速分布は植生層内では変動が大きく、最大流速は主流部において観察された。乱れ成分分布は中空糸膜の先端付近で最大となった。波動水路における流速変動の波成分の分布をFig. 16に、同じく乱れ成分の分布を Fig. 17に示す。波動に起因する乱れは植生層内ではほぼ一定であることが示されている。

中空糸膜の揺動は一方向流水路の流速の速い条件で観察された。造波水路では往復流による膜の動きのみが確認された。目視による観測の結果、一方向流では膜が全体的に水平になり、上下方向に1~2cmの幅で動き、膜の先端から約3cmが、ばらけて揺動していた。波動の場合は膜束で一塊になり、水平にはならず往復流の影響により、左右に1~2cmの範囲で、動いていた。

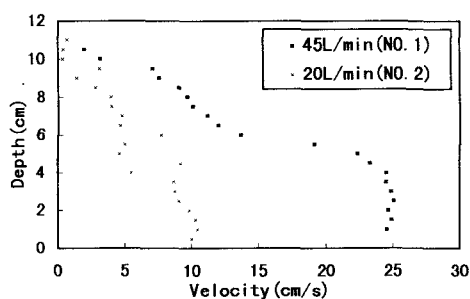


Fig. 14 Horizontal velocity profile (Steady flow).

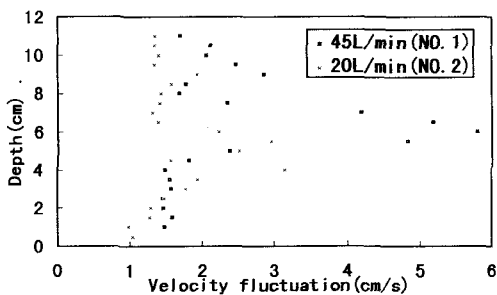


Fig. 15 Horizontal turbulence component profile (steady flow)

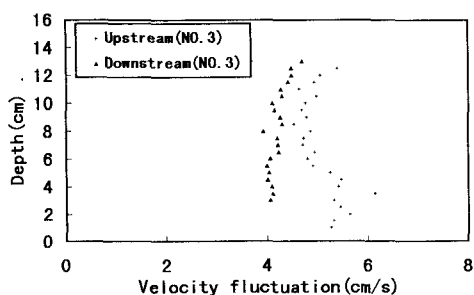


Fig. 16 Horizontal wave component profile (Wave).

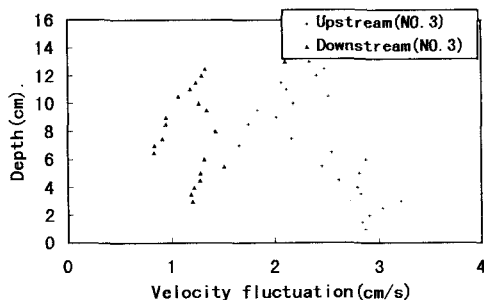


Fig. 17 Horizontal turbulence component profile (Wave)

5. 考察

5. 1 ろ過抵抗の無次元化

吸引に伴うろ過抵抗の増加は、同一膜モジュール、同一流速条件でも、吸引流束、循環水濁度および除去対象物質の比抵抗などの実験条件の影響を受ける。それらを考慮に入れ、得られた実験結果を一般化し、他条件実験と比較する事を可能とするため、ろ過抵抗および経過時間を無次元化した。無次元化したろ過抵抗(R^*)、時間(T^*)は以下のように定義した。

$$R^* = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \int_{R_0}^R \frac{1}{\sqrt{C_i}} dR \quad (1)$$

$$T^* = \sqrt{\alpha} \int_0^t J \sqrt{C_i} dt \quad (2)$$

ただし、 R :ろ過抵抗(L^{-1})、 C_i :循環水濁度(ML^{-3})、 α :濁質の比抵抗($M^{-1}L$)

J :膜透過流束(LT^{-1})、 t :経過時間(T)である。

R^* と T^* の関係をFig. 18(一方向流)、Fig. 19(波動)に示す。なお、カオリン(分散処理を行ったもの)の比抵抗 α の値は、 $1.39 \times 10^{14} m/kg$ を用いた。比抵抗の測定はBuchner漏斗を用い、真空ろ過実験を行い、実測した。

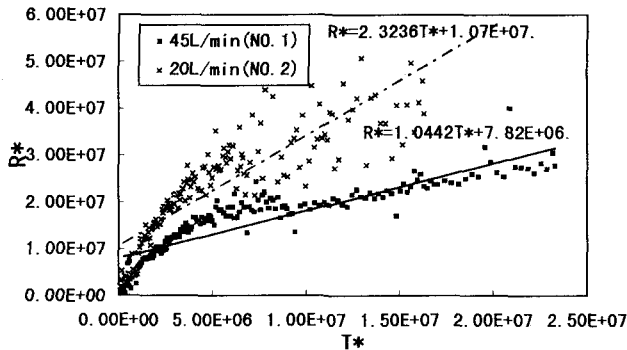


Fig. 18 Relationship between T^* and R^* (Flow).

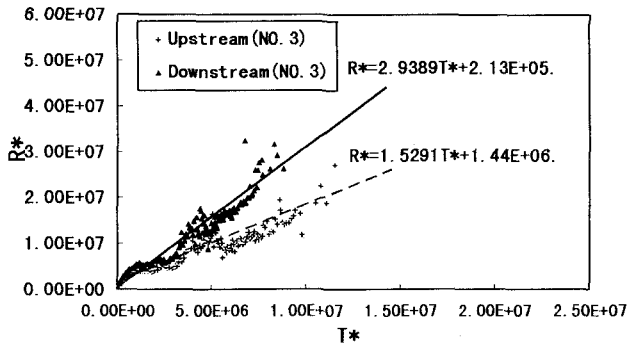


Fig. 19 Relationship between T^* and R^* (Wave).

5. 2 ろ過抵抗の増加傾向と流速変動乱れ成分との関係

Fig. 18およびFig. 19の直線部分を線形回帰し、その傾き（ β ）とそれぞれの条件における乱れ強度との関係をFig. 20に示す。なお、乱れ強度の値は、中空糸膜部分（植生層内）における平均値を用いた。水路毎の植生密度などが異なることにより多少の影響はあると思われるが、一方向流および波動条件の違いに関わらず、中空糸膜モジュール内部の乱れ強度に β （ろ過抵抗の増加傾向）は、おおむね反比例している。つまり、波動条件下においてもレイノルズ数が大きく、膜付近で乱れが発生する条件でないと固形物の剥離を促すことができないことを示しているといえる。

乱れ強度が1cm/sから3cm/sに増加すると、 β は3から1に減少している。 β は（1）、（2）式より、

$$\beta = \frac{dR}{dt} \frac{1}{\alpha C_i J} \quad (3)$$

と表すことができるので、 α 、 C_i 、 J の条件を与えれば、ろ過抵抗の上昇速度（ dR/dt ）が計算できる。一例として、 $\alpha=10^{-14}$ m/kg、 $C_i=10$ mg/Lの条件の河川水を $J=0.2$ m/dayで吸引ろ過を実行することを想定すると、 β が1から3に上昇すると、 dR/dt は 2.31×10^6 1/m s から 6.94×10^6 1/m sに増大する。水の粘性 $\mu=10^{-3}$ Pa sとすると、膜が目詰まりを起こし、吸引圧が上昇して、100kPaとなるまでの時間は72日から216日まで延びることになる。

本研究では、膜モジュール内の乱れ強度の範囲が約1cm/sから3cm/sに限定されているが、Fig. 20に示すような β と乱れ強度との関係が得られたことによ

り、水草状中空糸膜のろ過抵抗の上昇速度を流れの条件（特に乱れ強度）と運転フラックス、濁質の濃度および比抵抗の条件を与えることにより予想する一般的モデルが提案できた。

6. 結論

中空糸膜を束ねて水草状にしてモジュールを一方向および波動条件下の水路に懸垂しカオリンを用いて吸引実験を行った。中空糸膜の揺動は一方向流水路の流速の速い条件で観察され、造波水路では往復流による膜の動きのみが確認された。一方向流では膜が全体的に水平になり、上下方向に1~2cmの幅で動き、膜の先端から約3cmが、ばらけて揺動していた。波動の場合は膜束で一塊になり、水平にはならず往復流の影響により、左右に1~2cmの範囲で、動いていた。膜モジュール内では膜の揺動と流れとの相互作用によって、膜モジュール内全体が乱れた場となった。ろ過抵抗の上昇速度を無次元化して解析したところモジュール内の乱れ強度が約1cm/sから3cm/sの範囲では、両条件の違いに関わらず、ろ過抵抗の上昇速度と膜付近の乱れ強度との間におおむね反比例の関係があることがわかった。

よって、一方向流においては流れを速くして膜の揺動を促し、流れが渦を形成することによって膜付近の乱れを強くすることが、波動条件においてもレイノルズ数を大きくし、波動に起因する往復流や水塊の楕円運動により中空糸膜同士が常に独立して運動することで中空糸膜モジュール全体を乱れ場とすることが膜の目詰まりを防ぐ上で重要であることが示唆された。

また、膜モジュール内の乱れ強度とろ過抵抗の上昇速度との関係についての一般的なモデル式を提案することができ、流れの条件、運転条件、濁質の条件を与えることによりろ過抵抗の上昇を予想することが可能であることを示した。

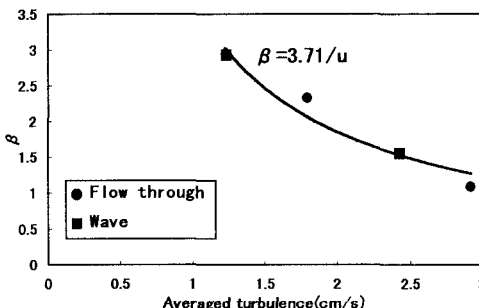


Fig.20 Relationship between turbulence component and β

謝辞

本研究の実施に当たっては、原 恒司氏、山西 忍氏（当時武蔵工業大学卒論生）の協力を得た。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) Inoue, E: on the turbulent structure of airflow within crop canopies, J. Met. Soc. Japan, Vol. 1, 317-346, 1963
- 2) 室田 明, 福原輝幸: 水性植物を有する開水路流れの乱流構造に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, Vol. 338, 97-103, 1983
- 3) 森井淳司, 帆刈善行, 長岡 裕: 水草状中空糸膜分離モジュールにおける処理特性: 第29回環境工学研究フォーラム講演集, 129-131, 1992
- 4) 森井淳司, 長岡 裕: 水草状中空糸膜分離モジュールの処理特性に及ぼす揺動・穂波現象の影響に関する検討, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集第II部門, 1214-1215, 1993
- 5) 池田駿介, 館健一郎: スペクトル応答解析による穂波の成因に関する研究, 土木学会論文集, No. 539/II-35, 43-52, 1996
- 6) 森井淳司, 中東賢司, 長岡 裕: 水草状中空糸膜分離モジュールの組織的な揺動がろ過特性に与える影響, 第30回環境工学研究フォーラム講演集, 76-78, 1993
- 7) 森井淳司, 中東賢司, 長岡 裕: 懸垂型水草状中空糸膜モジュールにおける濾過特性, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第II部門, 1006-1007, 1994
- 8) 増田憲寿, 長岡 裕: 河川直接浸漬型浄水装置の開発, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第II部門, 1068-1069, 1995
- 9) 長岡 裕: 中空糸膜分離法を用いた海水の高度浄化法に関する研究, 財団法人漁港漁村建設技術研究所研究成果報告書, 1995