

1. はじめに

中空糸膜を利用した膜分離装置において、中空糸膜を水草状に密に植え付け、流れにより膜を揺動させれば、膜の集積度を上げると同時に、膜表面における固形物の付着、堆積、および膜の集団化を防ぐことができると期待できる。しかし、中空糸膜を底面に植え付けられるタイプのモジュールにおいては、除去対象粒子が膜面に付着することにより膜重量が増し、膜が倒れて揺動しなくなることが指摘されている¹⁾。本研究では、水草状に植え付けた膜分離モジュールを開水路水面上部より懸垂することにより、膜重量が増した状態においても膜の揺動を維持できるようにし、水草状中空糸膜モジュールの組織的な揺動と、ろ過特性との関係について、実験的に考察を加えたものである。

2. 実験装置

実験水路概略図をFig.1に示す。水路は、全長2.0m幅7.5cmの開水路で、水路の中央をアクリル板で仕切った装置を2本用いた。水路水はマグネットポンプを用いて循環させた。4本の水路の流量は、それぞれ10L/min, 15L/min, 30L/min, 60L/min (断面平均流速: 2.2cm/sec, 3.3cm/sec, 6.7cm/sec, 13.3cm/sec) とし、水深を10.0cmに保つように堰で調節した。

植生として、吸引部分はポリエチレン製の中空糸膜、模擬部分はナイロン製の釣り糸を使用した。中空糸膜部分は、水路ほぼ中央部分に1列3穴、1穴につき3本、長さ20.0cm、流下方向1.0cm、横断方向2.0cm間隔で15列、模擬部分は、1列5穴、1穴につき5本、長さ20.0cm、流下方向1.0cm横断方向1.0cm間隔で、合わせて114列塩化ビニール板に植生し水路上から懸垂した。中空糸膜、釣り糸の仕様をTable-1に示す。植生密度(C)とは、中空糸膜または釣り糸の全表面積を、その植え付けた底面積で除したものである。

中空糸膜からの吸引部分の概略図をFig-2に示す。中空糸膜は先端部分をエポキシで塞ぎ、チューブポンプにより吸引するものとした。

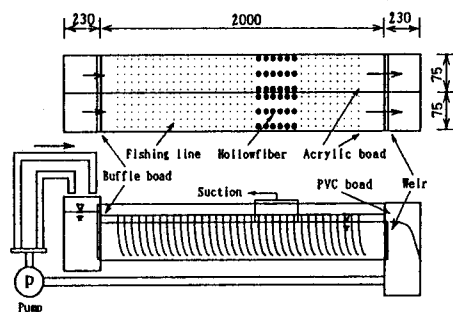


Fig. 1 Experimental setup (unit:mm)

Table-1 Specification

	内径/外径 (mm)	ヤング率 E (Pa)	植生密度 C	曲げ剛性 EI (Pamm ⁴)
中空糸膜	0.28/0.39	5.3×10^8	2.94	4.4×10^3
釣り糸	0.147	4.6×10^9	3.08	1.1×10^5

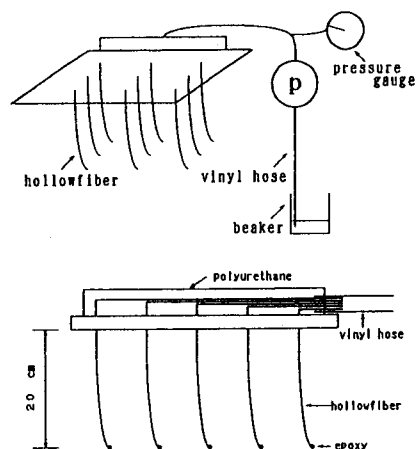


Fig-2 Hollowfiber membrane module

3. 実験方法

中空糸膜の組織的揺動と流速場との関係を把握する目的で、膜分離モジュールの周辺の流れを測定した。流速測定にはDantec社製後方散乱型光ファイバーレーザードップラー流速計を用いた。測定ポイントは中空糸膜部分の後方とし、測定の際には、測定位置付近の釣り糸を除去した。測定データは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おいて解析した。水路表面の流速は、レーザードップラー流速計で測定することができないので、浮きを用いて測定を行った。

濾過特性実験においては、水道水にカオリンと分散剤としてピロリン酸ナトリウムを溶解したものをを用いた。また、循環水濁度は100mg/Lと設定し、濃縮した濁水を水路上流からポンプで常時送り、極端に変化しないものとした。測定項目は、膜透過流量、吸引圧力、水温、濁度とした。

4. 実験結果及び考察

各水路の中空糸膜部分の揺動状況を、流れに対して鉛直方向について観察した。測定ポイントをFig.3に示す。結果をTable 2に示した。流速の大きいCase A, Case Bにおいては、中空糸膜が鉛直方向および横断方向に大きく組織的に揺動する穂波現象が観察されたが、流速の小さいCase C, Case Dにおいては中空糸膜はわずかに揺動するのみであった。

測定した流速分布及び乱れ強度分布をFig-4, Fig-5に示す。穂波現象の観察された流速の大きい条件においては、流速分布は植生層内では大きく変動しており、主流部において最大流速に達している。乱れ強度分布は中空糸膜の先端部付近でピークとなっており、先端部における組織的揺動により乱れが発生している様子が伺える。Case C, Case Dでは、流速、乱れ強度分布共に、

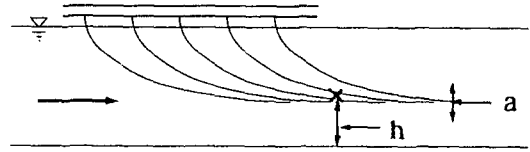


Fig-3 Measurement point

Table-2 Experimental result

Case	v cm/s	h mm	t sec	a mm	穂波
A	13.3	50.0	4.24	12.0	◎
B	6.7	45.0	5.50	8.0	◎
C	3.3	30.0	-	1.0	-
D	2.2	-	-	-	-

V:断面平均流速 h:植生境界高さ t:周期 a:振動幅

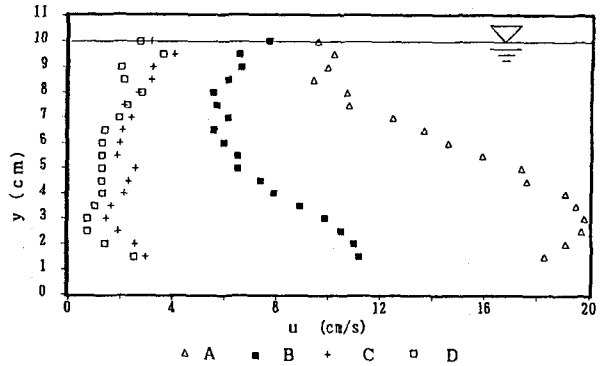


Fig-4 Velocity profile

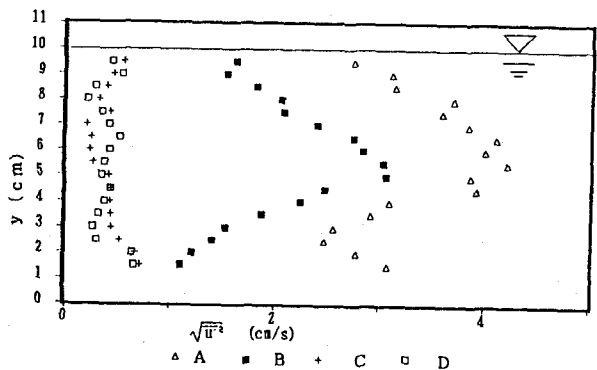


Fig-5 Turbulent intensity profile

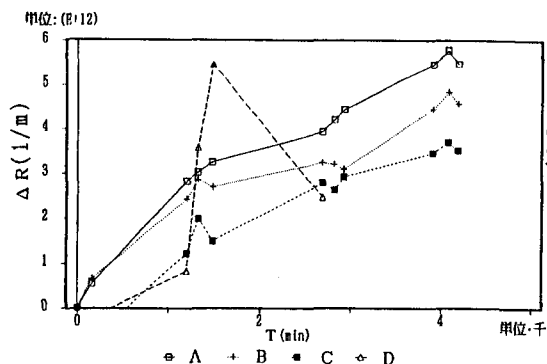


Fig-6 Variation of resistance

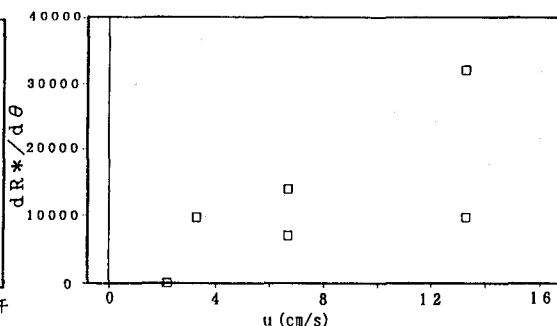


Fig-7 Relationship between $dR^*/d\theta$ and u

組織的揺動特有の傾向はみられず、ほぼ均一な分布を示している。

Fig. 6 に各条件における膜モジュールの濾過抵抗の増加分と経過時間との関係を示す。濾過抵抗の増加傾向は各水路でほぼ同様であり、水理学的条件の違いは特に認められなかった。

濾過抵抗増加の機構をさらに詳細に調べる目的で、循環水濁度を約1000mg/Lとし、短時間（約30分～60分程度）の間に連続吸引を行い、濾過抵抗の増加速度を測定した。濾過抵抗 R および時間 t は以下の式に従って無次元化を行い、解析を行った。

$$\theta = \int_0^t \frac{J C C_t}{L \rho} dt, \quad R^* = \frac{R C}{\alpha C_t L}$$

J : 膜透過フラックス [$L T^{-1}$]

ρ : 濁質の比重 [$M L^{-3}$]

C : 植生密度 [—]

R : 濾過抵抗 [L^{-1}]

C_t : 循環水濁度 [$M L^{-3}$]

α : 濁質の比抵抗 [$L M^{-1}$]

L : 中空糸膜先端から水面までの鉛直距離 [L]

Fig.7は各条件における $dR^*/d\theta$ の値（ R^* は θ に対しほぼ直線的に増加した）を示したものであるが、流速の大きい条件ほど濾過抵抗の増加が大きくなる傾向が示されている。これは、流速が大きくなると中空糸膜が流されることによって膜間の距離が短くなり、中空糸膜の極近傍においては、大規模な渦による乱れエネルギーが届かない状態になっていたこと、および、流速の小さい条件の方が中空糸膜間の距離が保たれ、濾過抵抗の増大を防ぐことができたことによると考えられる。

5. おわりに

中空糸膜を水草状に密に植え付け、開水路水面上部より懸垂するタイプのモジュールを用い、濾過抵抗の増加速度について考察を加えた結果、短期的には、中空糸膜の組織的な揺動による濁質の堆積防止効果よりも、中空糸膜間の間隔が狭くなることによるマイナスの要因の方が大きいことが示された。今後は長期間の吸引実験により、組織的揺動の効果について検討する予定である。

引用文献

1) 森井, 帆刈, 長岡, 水草状中空糸膜分離モジュールにおける処理特性, 環境工学研究フォーラム講演集, 129-131, 1992