

早稲田大学理工学部
早稲田大学理工学部
早稲田大学理工学部

正会員

遠藤郁夫

○温品由彦
市石誠

1. 結論 標準散水汚床の散水強度 $150 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{日}$ は、液体が生物膜上を流下するに当り、少なすぎて筋とならず、しかも過大すぎて飛散することなく一様に汚材を包むようにして流れるための条件で、しかも、実状に即した瞬間的散水負荷量といわれている。高率散水汚床の散水負荷は一級に、 $15 \sim 30 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{日}$ となっている。しかしながら、散水汚床法の機能上最も大きな問題点は、汚床閉塞及び、生物膜の脱落である。本研究は、生物膜の増殖速度及び剪断強度等を流体力学的モデルを用いて、解析的検討を行ない、散水負荷の基礎的研究を行ない、汚床閉塞及び脱落問題を明らかにすると共に、散水汚床法の機能改善をはかることとするものである。

2. 実験方法 生物膜の剪断強度に関する実験装置は図-1に示した。生物膜は管径2.8cm、長さ215cmの塩化ビニール製の管に付着増殖させた。管内の流速は、5, 10, 20, 40, 60及び80 cm/sとした。循環水は都市下水を水道水で希釈し、BODは40~60 PPMの範囲とした。流速はピトー管より求め、流量及び損失水頭から生物膜厚(h)、摩擦損失係数(f)、剪断応力(τ)及び比増殖速度(μ)等を求めた。散水汚床法の実験装置は、図-2に示した。実験装置は内径33cm、汚床高さ250cmで汚材は塩化ビニール製汚材を用いた。滞留時間は、トレーサーとして6%食塩水を用い図心法より求めた。

3. 実験結果及び考察

3.1 生物膜の剪断強度 実験管路中の最大流速 U_{max} はピトー管によって求めた。平均流速を求めるにあたっては流速分布式として、層流領域では放物線の式を、乱流領域ではベキ乗公式をそれぞれ用いた。これらの平均流速から生物膜厚(h)、摩擦損失係数(f)、剪断応力(τ)及び比増殖速度(μ)をそれぞれ求めた。

$$U_{max} = \sqrt{2g\Delta h_0} \quad (1)$$

$$\text{層流領域} \quad v_m = \frac{U_{max}}{2} \quad (2)$$

$$\text{乱流領域} \quad v_m = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} U_{max} \quad n=7 \text{より} \quad v_m = \frac{49}{60} U_{max} \quad (3)$$

$$h = \frac{1}{2} (D_0 - \sqrt{\frac{4Q}{\pi v_m}}) \quad (4)$$

$$f = \Delta h_s \frac{D}{L} \frac{2g}{v_m^2} \quad (5)$$

$$\text{層流領域} \quad \tau = \frac{8\mu v_m}{D} \quad (6)$$

$$\text{乱流領域} \quad \tau = \frac{f}{8} \rho v_m^2 \quad (7)$$

$$\mu = 2.03 \frac{\ln h - \ln h_0}{t - t_0} \quad (8)$$

ここに、 D_0 : 初期管径、 D : 生物膜付着後の管径、 Q : 流量、 L : マノメーター間距離、 Δh_0 : 動圧、 Δh_s : 損失水頭、 μ : 粘性係数、 ρ : 密度、

各実験を表-1にまとめた。また、実験番号 No.1 のデータを図-3~5に示した。流速が $v = 19.8 \text{ cm/s}$ 以下の場合、斑点状の生物膜が付着した。この場合の生物膜は壁面への付着が非常に不安定で様に付着せずたえず付着・脱落を繰り返す。この場合、剪断応力は $\tau = 0.02 \text{ kg/m}^2$ 以下であった。流速が $v_m = 44.0 \text{ cm/s}$ の

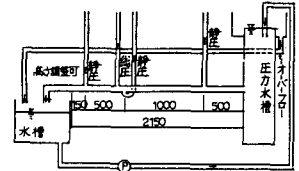


図-1 実験装置概略図 (mm)

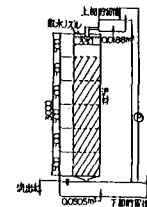


図-2 実験装置 (mm)

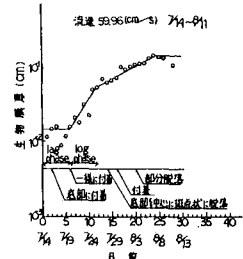


図-3 生物膜厚の経日変化

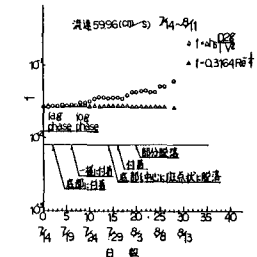


図-4 fの経日変化

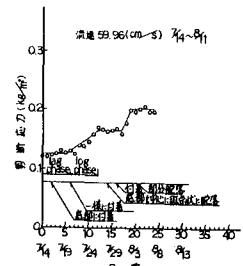


図-5 剪断応力の経日変化

場合、生物膜が一樣に付着するが脱落し、その後付着・脱落を繰り返す。この場合、剪断応力は $\tau = 0.08 \text{ kg/m}^2$ であった。流速が $v_m = 60.0\%$ の場合、生物膜が一樣に付着し始めるが、実験No.1においては脱落し付着・脱落を繰り返した。実験No.6, No.12においては脱落することなく一樣に付着した。この場合、剪断応力は $\tau = 0.135 \text{ kg/m}^2$ であった。流速が $v_m = 80.0\%$ の場合、ほとんど管壁に生物膜が形成されなかった。この場合、剪断応力は $\tau = 0.22 \text{ kg/m}^2$ であった。ここに $\tau \times h$ を生物膜の付着強度(F)と定義し、 $v_m = 44.0\%$ ・ $v_m = 60.0\%$ における付着強度を表-2に示した。よって良好な生物膜を維持するには、 $0.135 \text{ kg/m}^2 < \tau < 0.22 \text{ kg/m}^2$ 、 $F < 0.000054 \text{ kg/m}$ という2つの条件を満足しなければならないと考えられる。表-3に $v_m = 44.0\%$ ・ $v_m = 60.0\%$ における比増殖速度を示す。比増殖速度は同一流速においては水温の高い方が大きい。

これは生物膜の増殖力が大きいからである。同一水温においては、 $v_m = 44.0\%$ と $v_m = 60.0\%$ はほとんど同じであった。

3.2. 散水負荷と剪断応力 沓材表面の水膜厚 δ は、沓床内に保有される水量を沓材表面積で割ることにより求めた。沓材表面剪断応力は、沓材表面の平均傾度に等しい等流開水路流れと仮定することにより式(9)より求めた。

$\tau = \rho g \delta \cos \theta \sin \theta$ δ : 水膜厚, θ : 斜面傾度 (9)
散水負荷と剪断応力の関係を図-7に示した。散水負荷と剪断応力の関係は式(10)で表される。

$\tau = 0.01463 Q^{0.5024}$ Q : 散水負荷 (10)
 $\tau = 0.08 \text{ kg/m}^2$ に対応する散水負荷は $28 \text{ } \mu\text{m}^3/\text{日}$ となり、少なくともこれ以下の散水負荷では生物膜が肥厚し付着・脱落を繰り返す、散水沓床の閉塞を招くことが考えられる。 $\tau = 0.135 \text{ kg/m}^2$ では、即ち $v_m = 60.0\%$ の場合には、 $90 \text{ } \mu\text{m}^3/\text{日}$ となり良好な生物膜が維持できる散水負荷であると考えられる。一方、 $v_m = 80.0\%$ では、 $\tau = 0.22 \text{ kg/m}^2$ となり生物膜が付着しない。この場合の散水負荷は $215 \text{ } \mu\text{m}^3/\text{日}$ である。よって最適散水負荷は、 $90 \text{ } \mu\text{m}^3/\text{日}$ から $215 \text{ } \mu\text{m}^3/\text{日}$ の範囲と考えることができる。高率散水沓床法の散水負荷は、 $15 \sim 30 \text{ } \mu\text{m}^3/\text{日}$ である。この範囲の負荷は散水沓床の運転によくない。超高率散水沓床法における最適散水負荷は、 $150 \sim 200 \text{ } \mu\text{m}^3/\text{日}$ の範囲とされている。この最適散水負荷について基礎的に説明することができた。

4. 総括及び結論 散水沓床法における生物膜の脱落現象は、季節的な変化によるものとして経験的に説明されてきたが、流体力学的な見地より解析的検討を行ない、次のような結論を得ることができた。

- ①生物膜の付着の難易を壁面摩擦強度、即ち剪断強度から説明することができた。
- ②生物膜の付着強度($F = \tau \times h$)を定義し、生物膜の付着強度から脱落現象を説明することができた。
- ③生物膜の剪断強度から最適散水負荷範囲を求めることができた。
- ④散水沓床法の散水負荷について基礎的に説明することができた。

表-1 各流速における実験期間、平均水温および流速

実験番号 No.	実験期間	流速 v (cm/s)	平均 Re	平均水温 (°C) A.M.8:00 ~ P.M.10:00
No.1	7/4 ~ 8/11	60.0	18500	27
No.2	9/22 ~ 10/4	19.8	5500	25
No.3	1/8 ~ 1/12	44.0	12000	22
No.4	1/8 ~ 1/12	19.8	5500	22
No.5	1/18 ~ 1/24	44.0	9000	20
No.6	1/18 ~ 1/24	60.0	16500	20
No.7	1/18 ~ 1/24	80.0	22000	20
No.8	1/18 ~ 2/4	5.1	1400	20
No.9	1/18 ~ 2/4	10.2	2900	20
No.10	1/18 ~ 2/4	19.8	5500	20
No.11	1/18 ~ 2/4	44.0	12000	20
No.12	1/18 ~ 2/4	60.0	17000	20

表-2 生物膜の付着強度

実験番号 No.	流速 v (cm/s)	剪断応力 τ (kg/m ²)	生物膜厚 h (m)	付着強度 F (kg/m)	水温 (°C)	摘要
No.3	44.0	0.08	0.0008	0.000064	22	脱落
No.5	44.0	0.08	0.0008	0.000064	20	脱落
No.11	44.0	0.08	0.00043	0.000034	20	脱落
No.1	60.0	0.135	0.0007	0.000095	27	脱落
No.6	60.0	0.135	0.0004	0.000054	20	一樣付着
No.12	60.0	0.135	0.00036	0.000049	20	一樣付着

表-3 生物膜の比増殖速度

実験番号 No.	比増殖速度 μ (日 ⁻¹)
No.3	0.182
No.5	0.178
No.11	0.142
No.1	0.220
No.6	0.168
No.12	0.149

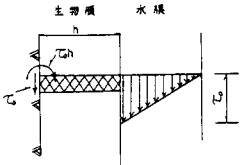


図-6 生物膜の付着強度モデル

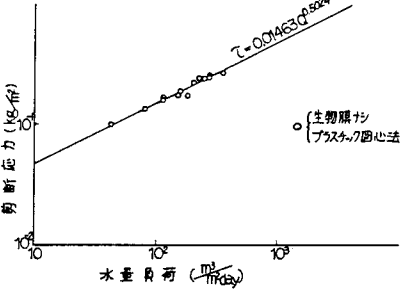


図-7 水量負荷と剪断応力の関係