

早稲田大学理工学部 正会員 遠藤郁夫
都市開発設計事務所 正会員 田村隆俊
早稲田大学理工学部 学生員 ○市石 誠

1. 緒論 散水汚床法の機能上最も大きな問題点は、生物膜の脱落及び汚床閉塞である。本研究は生物膜の厚さ・流水による剪断強度及び付着強度等を流体力学的モデルを用いて実験的解析を行った。さらに生物膜の比増殖速度・活性化エネルギー及び温度係数等も求めた。このような観点から、散水負荷に関する基礎的研究を行ったものである。

2. 実験装置及び実験方法 生物膜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流速 $v=20, 40, 60, 70$ 及び 80% で流して付着増殖させた。循環水は都市下水を水道水で希釈し、BODは40~60ppm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)・比増殖速度(μ)及び活性化エネルギー(A)等を求めた。

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、乱流領域の流速分布式としてべき乗公式を用いて平均流速(V_m)を求めた。生物膜厚(H)・摩擦損失係数(f)・剪断応力(τ)は、式よりそれぞれ求めた。

$$U_{max} = \sqrt{2g\Delta h_0} \quad (1) \quad V_m = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} U_{max} \quad n=7 \text{より} V_m = \frac{49}{60} U_{max} \quad (2)$$

$$H = \frac{1}{2}(D_0 - \sqrt{\frac{4Q}{\pi V_m}}) \quad (3) \quad f = \Delta h_0 \frac{8}{L} \frac{29}{V_m} \quad (4) \quad \tau = \frac{1}{8} \rho V_m^2 \quad (5)$$

ここに D_0 :初期管径、 D :生物膜付着後の管径、 Q :流量、 Δh_0 :損失水頭

L :マノメーター間距離、 Δh_0 :動圧、 ρ :密度

生物膜に関するこれらの諸関係は、我々の一連の研究により既に次のようなことが認められている。すなわち、(i)良好な生物膜を得るための流速は 60% 以上であった。それ以下では、斑点状あるいは水綿状の比較的不安定な生物膜であった。(ii)水温 20°C 、流速 60% における生物膜の厚さ(H)は、 $0.03 \sim 0.04\text{cm}$ の範囲で、生物膜は流水による壁面剪断強度と平衡状態になり持続的に一樣に付着することが認められた。この場合の剪断強度(τ)は、 $0.135 \sim 0.220\text{kg/m}^2$ の範囲であった。図-2に示したように生物膜の付着モデルを流体力学的に考える。生物膜の付着・脱落の物理的原因について考察した。生物膜の付着強度($F=\tau \times H$)は 0.000054kg 以下であった。(iii)良好な生物膜を維持するための物理的条件として生物膜上に働く流水による剪断強度(τ)と、汚材と生物膜との付着強度(F)等から次の2つの条件を同時に満足しなければならないと考えられる。

$$0.135\text{kg/m}^2 < \tau < 0.220\text{kg/m}^2 \quad (6) \quad F < 0.000054\text{kg} \quad (7)$$

実験結果を表-1に示した。水温 23°C 流速 60% の場合の摩擦損失係数(f)及び生物膜厚(H)の関係をそれぞれ図-3、図-4に示した。図-3からわかるように生物膜の摩擦損失係数(f)は滑らかな塩ビ管とほぼ同じであった。しかしながら脱落が始まると、敏感に反応して摩擦損失係数(f)が増大することが認められた。また、脱落寸前の最大生物膜厚さは、図-4に示したように 0.07cm であった。生物膜は最大厚さに達した後、たえず付着・脱落を繰り返すことが認められた。この場合

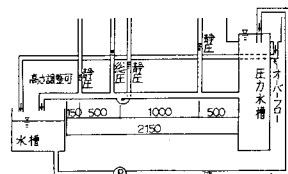


図-1 実験装置概略図

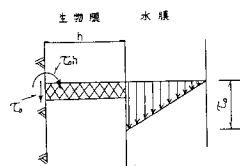


図-2 生物膜の付着強度モデル

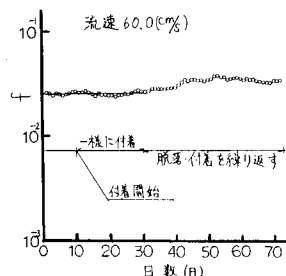


図-3 生物膜の付着の状態と時間の関係

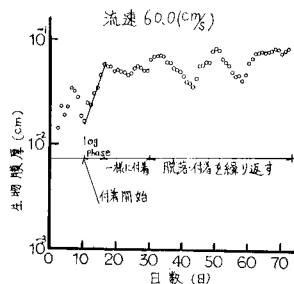


図-4 生物膜の経日変化

の生物膜上に働く剪断強度(τ)は、 $\tau=0.128\text{kg/m}$ 、付着強度(F)は、 $F=0.00090\text{kg/m}$ であった。従って(6)式と(7)式を同時に満足していないので脱落することが説明できた。またN08,N09の場合については(6)式及び(7)式を同時に満足するので脱落現象が起こらないことが説明できた。

表-1 生物膜の付着強度

実験番号 No.	流速 $U(\%)$	レイノルズ数 Re	剪断力 $\tau(\text{kg/m})$	生物膜厚 $H(\text{m})$	付着強度 $F(\text{kg/m})$	水温 $(^\circ\text{C})$	摘要
1	440	12000	0.080	0.00080	0.000064	22	脱落
2	440	9000	0.080	0.00080	0.000064	20	脱落
3	440	12000	0.080	0.00043	0.000034	20	脱落
4	600	18500	0.135	0.00070	0.000095	27	脱落
5	600	15800	0.128	0.00070	0.000090	23	脱落
6	600	16500	0.135	0.00040	0.000054	20	一樣付着
7	600	17000	0.135	0.00036	0.000049	20	一樣付着
8	600	16500	0.135	0.00030	0.000041	18	一樣付着
9	700	18500	0.156	0.00028	0.000044	20	一樣付着
10	800	22000	0.220	0	0	20	付着せず

生物膜の増殖速度は温度依存であるから、生物膜の増殖が流水による剪断力と動的平衡状態に達して持続的に一樣付着の状態になるためには、すなわち脱落をしないための物理的条件は(6)式及び(7)式を満足することである。すなわち水温が決まれば生物膜の増殖速度が決まる。そうすれば、動的平衡状態を維持するための流速が決まることになる。表-1にみられるように

流速が60%では水温20℃以下の場合には一樣付着の状態が得られるが、たとえば23℃あるいは27℃の場合には動的平衡状態は流速60%では得られないため生物膜が肥厚し脱落を誘起することになると考えられる。

3.2 活性化エネルギーと温度係数

生物膜の温度依存性を検討するために、比増殖速度(μ)・活性化エネルギー(A)及び温度係数(Q_{10})を求めた。

$$\mu = \frac{\ln H - \ln H_0}{t - t_0} = 2.30 \times \frac{\log H - \log H_0}{t - t_0} \quad (8) \quad \log \mu = \log C - \frac{A}{4.57T} \quad (9)$$

$$Q_{10} = \log \frac{\mu_2}{\mu_1} = \frac{A(T_2 - T_1)}{2.3 \times 1.98 \times T_1 T_2} = \frac{0.219 A (T_2 - T_1)}{T_1 T_2} \quad (10)$$

比増殖速度を表-2に示した。また絶対温度の逆数($1/T$)と比増殖速度(μ)との関係を図-5に示した。生物膜の比増殖速度は、表-2に示してあるように温度の影響を大きく受ける。それらの関係を図-5より式(11)で表すことができた。

$$\log \mu = \log (2.9635 \times 10^7) - 24339 \left(\frac{1}{T} \right) \quad (11)$$

またArrheniusの式(9)から活性化エネルギー(A)を求めると $A=11133\text{cal}$ となった。また温度係数 Q_{10} は(10)式で求め表-3に示した。これより温度10℃違った場合には、生物膜の比増殖速度は、約2倍になることが認められた。

3.3 散水負荷と剪断力

浮床表面の水膜厚 δ は、浮床内に保有される水量を浮床表面積で割ることにより求めた。浮床表面剪断力は、浮床表面の平均傾度 θ に等しい等流開水路流れと仮定することにより式(12)より求めた。

$$\tau = \rho g \delta \cos \theta \sin \theta \quad \delta: \text{水膜厚} \quad \theta: \text{斜面傾度} \quad (12)$$

散水負荷と剪断力との関係を図-6に示した。散水負荷と剪断力の関係は、式(13)で表される。

$$\tau = 0.01463 Q^{0.5024} \quad Q: \text{散水負荷} \quad (13)$$

$U_m=440\%$ の場合には、 $\tau=0.080\text{kg/m}$ となり、散水負荷は 28mg/m^2 となる。少なくともこの散水負荷では生物膜が肥厚し付着脱落をくり返し、散水浮床の閉塞を招くことが考えられる。 $\tau=0.135\text{kg/m}$ では、即ち $U=600\%$ の場合には、 90mg/m^2 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、 $U_m=800\%$ では、 $\tau=0.22\text{kg/m}$ となり生物膜が付着しない。この場合の散水負荷は 215mg/m^2 である。よって最適散水負荷は、 $90 \sim 215\text{mg/m}^2$ の範囲と考えることができる。高率散水浮床法の散水負荷は $15 \sim 30\text{mg/m}^2$ である。この範囲の負荷は散水浮床の運転によくない。超高率散水浮床法における最適散水負荷は、 $150 \sim 200\text{mg/m}^2$ 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.結論 散水浮床の生物膜の付着脱落について、流体力学的モデルから現象の解明を試みた。また、散水負荷についても基礎的に説明することができた。

表-2 生物膜の比増殖速度

水温 $(^\circ\text{C})$	比増殖速度 $\mu(\text{日}^{-1})$
27	0.232
23	0.183
20	0.145
20	0.138
18	0.135

表-3 生物膜の温度係数

水温 $(^\circ\text{C})$	温度係数 Q_{10}
10~20	1.97
15~25	1.92
20~30	1.88

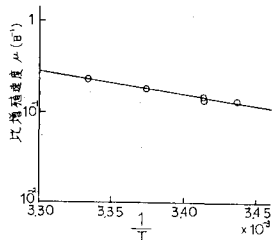


図-5 絶対温度の逆数と比増殖速度との関係

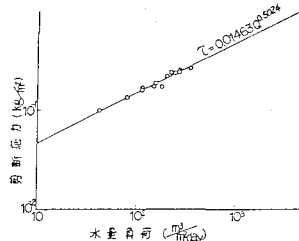


図-6 水量負荷と剪断力との関係