

早稲田大学理工学部 正会員 遠藤郁夫
早稲田大学理工学部 学生員 小川浩二

1. 緒論 散水汚床の機能上最も大きな問題点は生物膜の脱落及び汚床阻塞である。本研究は、生物膜の付着・脱落の物理的条件として 第一に生物膜面上に作用する流水の膜面剪断力(kg/m^2)による生物膜のスライス(Slice)作用と生物膜と汚材との付着面に作用する曲げ強度 $F(\text{kg/m})$ によるものと考え、流体力学的モデルを用いて解析的検討を加えた。次に生物膜の厚さと増殖速度および水温との関係を探求した。このように観点から散水汚床に関する基礎的研究を行なつたものである。

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の塩化ビニル管に流速 $V=20, 40, 60, 70$ 及び 80cm/s 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)、剪断力(τ)、比増殖速度(μ)及び活性化エネルギー(A)等を求めた。

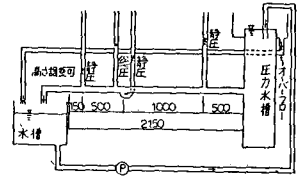


図-1 実験装置概略図

3. 実験結果及び考察

3.1 流水速度と生物膜の厚さ 実験管路の最大流速(U_{max})と生物膜の厚さとの関係を図-2に示した。生物膜は流速 60cm/sec 以下では付着・脱落を繰り返すことが認められた。すなわち (i) 流速 60cm/sec 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) 良好な生物膜を得るための流速は 60cm/sec 以上であった。(iii) 流速 60cm/sec の場合水温 20°C 以下では生物膜の厚さ(H)は $0.3\sim 0.4\text{mm}$ の範囲で生物膜は流水による膜面剪断力によるスライス作用と増殖速度が平衡状態が維持され、持続的に一樣に付着したことが認められた。(iv) 流速 60cm/sec 、水温 27°C では流水による膜面剪断力によるスライス作用に抗して厚さ 1.5mm に達したと考えられ、水温 27°C における生物膜の増殖速度が 20°C に比較してかなり大きいためと考える。流水による膜面剪断力と生物膜厚さとの積($F \cdot H$)として考えられる曲げ作用によつて生物膜と壁面との付着面から脱落したものと考えられる。(v) 流速 70cm/sec 、水温 $15\sim 20^\circ\text{C}$ の場合には持続的に一樣に付着した。その場合の生物膜の厚さは $0.3\sim 0.6\text{mm}$ であった。このことは生物膜の増殖速度と流水の膜面剪断力によるスライス作用が平衡状態になったものと考えられる。(vi) 流速 80cm/sec の場合には生物膜の付着が認められなかつた。すなわち流水が壁面に作用する剪断力によるスライス作用が大きすぎて生物膜の付着・増殖を許さなかつたものと考えられる。流速と生物膜との関係を総括すると水温 20°C 以下では流速 $60\text{cm/sec}\sim 80\text{cm/sec}$ の範囲で厚さ $0.2\sim 0.6\text{mm}$ の良好な生物膜が一樣に付着して約2ヶ月脱落は認められなかつた。また 60cm/sec 以下では生物膜は絶えず付着脱落を繰り返したことが観察された。

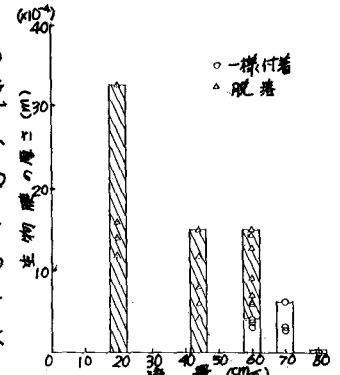


図-2 流量と生物膜の厚さとの関係

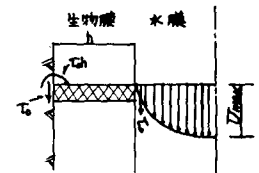


図-3 生物膜の付着モデル

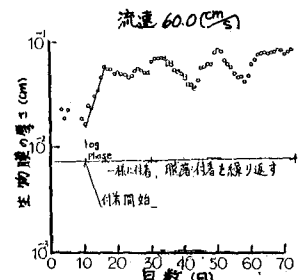


図-4 生物膜の厚さの経日変化

3.2 流水による生物膜に作用する膜面剪断強度

図-3に示したような

生物膜の付着モデルを流体力学的に考え 生物膜上に作用する膜面剪断力によるスライス作用と 生物膜と管路壁面に作用する曲げ作用による脱落現象について考察した。実験管路中の最大流速(U_{max})はピトー管によ、て求め、乱流領域の流速分布式としてベキ乗公式を用いて平均流速(U_m)を求めた。生物膜厚(H) 摩擦損失係数(f) 剪断応力(τ)は次式よりそれぞれ求めた。

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

$$U_m = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} U_{max} \quad n=7より U_m = \frac{49}{60} U_{max} \quad (2)$$

$$H = \frac{1}{2} (D_0 - \sqrt{D_0^2 - \frac{4Q}{U_m}}) \quad (3) \quad f = \Delta h_s \frac{D}{L U_m^2} \quad (4) \quad \tau = \frac{f}{8} \rho U_m^2 \quad (5)$$

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

上記(ii)では この場合の生物膜の膜面剪断強度(τ)によるスライス作用は $0.12 \sim 0.135 \text{ kg/m}^2$ の範囲であった。また 生物膜と管壁面に作用する曲げ強度(τ_b)は $3.6 \sim 5.4 \text{ kg/m}^2$ であった。(V)では $\tau = 0.146 \sim 0.173 \text{ kg/m}^2$, $\tau_b = 4.4 \sim 10.8 \text{ kg/m}^2$ であった。結局膜面剪断力によるスライス作用(τ)と生物膜と管壁面に作用する曲げ作用(τ_b)との関係は次の範囲を同時に満足すれば 一樣付着の状態が維持できて脱落現象が起らないことが説明できた。生物膜面上に作用するスライス作用 $\tau = 0.12 \sim 0.13 \text{ kg/m}^2$ (6) (0.229 kg/m^2 では生物膜は付着増殖しない。) 生物膜と管壁面に作用する曲げ作用 $\tau_b = 3.6 \sim 10.8 \text{ kg/m}^2$ (7)

3.3 生物膜の増殖 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の膜面剪断作用によるスライス作用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 cm/sec では水温 20°C 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°C あるいは 27°C の場合には動的平衡状態は流速 60 cm/sec 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。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。

$$\mu = \frac{\ln H - \ln H_0}{t - t_0} = \frac{2.30 \times \log H - \log H_0}{t - t_0} \quad (8) \quad \log \mu = \log C - \frac{A}{4.574} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (9)$$

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

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。

$$\log \mu = \log (2.96 \times 10^7) - 2.43 \times 10^4 \left(\frac{1}{T} \right) \quad (11)$$

またArrheniusの式(9)から活性化エネルギー(A)を求めるに $A = 1.11 \times 10^4 \text{ cal/mol}$ 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°C 変化した場合には、生物膜の比増殖速度は 約2倍になることが認められた。

4. 結論 散水汙床或はその他の生物膜の付着・脱落は従来季節的、生物学的説明に主眼がおかれて来たがMcKinney等の研究から流水の流体力学的検討の必要性が指摘されて来たが必ずしも十分な説明がなされていないのが現状である。本研究は 物理条件に主眼を置いて一つの流体力学的モデルを考え 生物膜面上に作用する膜面剪断力によるスライス作用と生物膜と管壁面との付着面に作用する曲げ作用とを検討し、更に生物膜の増殖速度も考慮して生物膜の付着・脱落現象を一応説明することができた。尚今回は生物膜の自重については考慮しなかった。(密度 $1.005 \sim 1.009 \text{ g/cm}^3$, 含水率 $95 \sim 97\%$)

表-1 生物膜の厚さ、膜面剪断強度および曲げ強度

流速 $U(\text{cm/sec})$	レイノルズ数 Re	生物膜厚 $H(\text{mm})$	膜面剪断強度 $\tau(\text{kg/cm}^2)$	曲げ強度 $\tau_b(\text{kg/cm}^2)$	水温 $T(^{\circ}\text{C})$	摘 要
44.0	12000	0.079	0.00076	0.00060	22	脱 落
60.0	18500	0.135	0.00070	0.00095	27	脱 落
60.0	15800	0.128	0.00070	0.00090	23	脱 落
60.0	16500	0.135	0.00040	0.00054	20	一樣付着
60.0	17000	0.135	0.00036	0.00049	20	一樣付着
60.0	16500	0.135	0.00030	0.00041	18	一樣付着
60.0	17000	0.147	0.00067	0.00091	21	脱 落
70.0	17000	0.173	0.00062	0.00108	15	一樣付着
70.0	18500	0.156	0.00028	0.00044	20	一樣付着
80.0	22000	0.220	0	0	20	付着せず

表-2 生物膜の比増殖速度

水温 $T(^{\circ}\text{C})$	比増殖速度 μ (日 $^{-1}$)
27	0.232
23	0.183
20	0.145
19	0.138
18	0.135

表-3 生物膜の温度係数

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

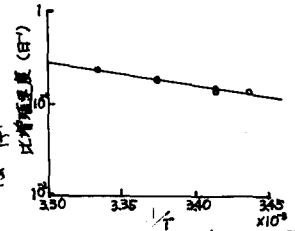


図-5 絶対温度の逆数と比増殖速度の関係