

徳島大学大学院 学 南 利治

徳島大学工業短期大学部 正 細井 由彦

徳島大学工業短期大学部 正 村上 仁士

四 国 鉄 工 寺島 郁

1. まえがき 付着生物膜の形成と水理諸量との基礎的な関係を調べる目的で、管路流と硝化菌による実験を行った。同時に、いくつか報告例のある、導水管利用によるアンモニアの除去に関する基礎資料を得ることをも目的とした。

2. 増殖におよぼす流れの影響 付着生物膜の形成に対して、流れは付着物のはく離および基質の生物膜へのすみやかな供給という作用を行うものと考えられる。はく離効果はせん断応力あるいは摩擦速度 u_x と、基質の輸送については、壁面付近における境界層と濃度境界層のそれぞれの厚さの比がシュミット数と関係づけられる事等を考慮すると、やはり u_x と直接関係するものと考えられる。

3. 実験および考察 図-1に示すような装置を使用して実験を行った。同時に数本の塩ビパイプに対して、共通のタンクからポンプで水が循環させられる。実験中適宜アンモニアを加えて、その濃度がほぼ1mg/lになるようにした。実験は次式で計算される u_x を種々コントロールして行った。

$$v/u_x = 1.75 + 5.75 \log(u_x d / 2v) \quad (v: \text{平均流速}, d: \text{管径})$$

3-1 増殖曲線 付着生物膜の増殖曲線を図-2~4に示す。No.11~14, No.21~24, No.31~33およびNo.41~44はそれぞれ同時に異なった管を用いて行ったものであり、同じ水質条件下にある。各図において u_x の値が等しいと増殖曲線もよく似た形をしていることがわかる。この4回の実験の範囲($u_x > 4.0 \text{ cm/sec}$)では、流速あるいは摩擦速度が大きいほど付着量は少なくなっている。

3-2 基質除去 管壁に生物膜が生育した管を使って、流れと基質除去との関係を調べる実験を行った結果が図-5である。流速が大きくなると、基質の利用も促進される傾向にある。これは以下のように考えることができる。生物膜表面の基質の拡散層の厚さを δ とすると、生物膜への拡散フラックス j は

$$j = D(C - C_s) / \delta \quad (D: \text{拡散係数}, C, C_s \text{ はそれぞれ液本体と膜表面における濃度})$$

と表わされる。拡散律速の場合 $C \gg C_s$ とおいて $j = DC / \delta$ となる。 j は実験より求められる気質除去速度 V_R に等しい。一方 δ は粘性底層厚さ δ_v ($\delta_v u_x / \nu = 11.6$) に比例すると考えられるから、 $V_R / DC \sim u_x$ の関係が導かれる。この関係を調べたのが図-6である。両者の間には、ほぼ1次の関係が認められる。

3-3 はくり 付着生物膜の形成されている管に低流速から徐々に流速を上昇させていき、生物膜のはく離の様子を調べた。その結果をはく離率(付着量に対するはく離量の割合)と壁面摩擦力 $\tau_o = \rho u_x^2$ によって整理したものが、図-7である。図中の直線は $R(\%) = 0.40 \tau_{ox} (\tau_o / \tau_{ox} - 1.30)$ (τ_{ox} は生物膜生育時の摩擦応力、摩擦力の単位は kg/m^2) である。

はく離率は付着力の非超過確率を示しているとも考えることができる。図-8ははく離率の正規確率プロットである。本図から読みとれる付着力平均値は 1.26 kg/m^2 で、膜生育時に受けた力の4.9倍にあたる。

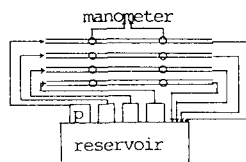


図-1 実験装置

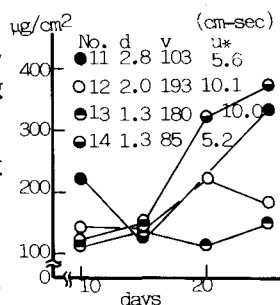


図-2 付着生物量の変化

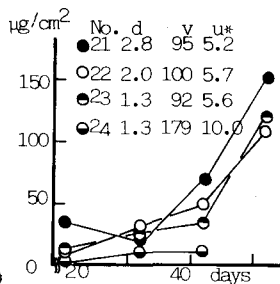


図-3 付着生物量の変化

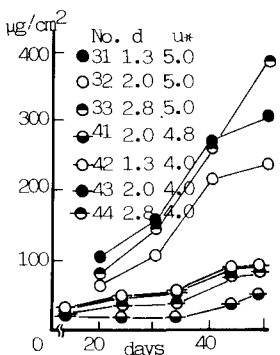


図-4 付着生物量の変化

4. 増殖曲線と流速の関係に関する考察 基質除去に関する検討から、 u_x が大きくなるとアンモニアの輸送が促進され、付着膜の形成に有利に働くことがわかるが、図-2~4の増殖曲線では u_x のはく離作用の方が顕著なため、増殖には阻害的な影響を示している。そこでもう少し低流速領域で実験を行った。その結果が図-9である。本図では、流れが速い方が初期の増殖は遅れるが、その後の現存量は多くなるという、従来からよくみられる傾向が認められる。この特性を説明するため以下のようなモデルを考えてみる。

膜形成の初期においては全付着量が少なく流れから運ばれてきて付着するものと、増殖するものがともに重要であり、単位面積あたりの付着量 M を次式で表わす。 $dM/dt = \alpha m + \beta M$ (1) ここで m は付着面へのバクテリアのフラックスであり、 $m \sim (\text{流水中菌濃度})/\delta$ とかけられる。 $\delta \sim \nu/u_x \sim \nu/v$ より $m = m_1 v$ (m_1 :定数) (2) となる。 α は付着面に運ばれてきた細胞が、強固な不可逆付着過程に入るまでの間の可逆的な付着状態において壁面摩擦力により再びはく離することを考慮した残存率である。可逆状態の付着力分布を正規分布とすると、 α は誤差関数で表わされるが、ここでは簡単のため $v=0$ のとき1を、 $v=\infty$ で0を与える次式を仮定する。 $\alpha = \exp(-rv^n)$ (r, n :定数) (3) β は比増殖速度である。

一方増殖が進み、 $M > M_0$ となると付着物自身による増殖とはく離が重要と考えられ、次式を考える。 $dM/dt = (DC/\delta)Y - kM$ (4) 右辺第1項は基質フラックスと収率係数の積であり、第2項ははく離が膜厚に依存することを示している。係数 k は流速の影響を受けるので $k = k_1 \exp(k_2 v)$ (5) と与える。拡散層厚さ δ は流速に依存する部分 δ_1 と、膜形成に伴い膜表面に恒常的に付着している部分 δ_2 とに分けられる。 $\delta_1 = k_3/v$ とすると右辺第1項については $DCY/\delta = DCY/(\delta_1 + \delta_2) = DCY(1-a/(v+a))/\delta_2$, $a = k_3/\delta_2$ となる。

以上を解いてつぎのような結果を得る。

$$0 < M < M_0 \quad (0 < t < t_0) : M = \alpha m_1 v (\exp(\beta t) - 1) / \beta \quad (6)$$

$$M_0 < M \quad (t > t_0) : M = M_p + (M_0 - M_p) \exp(-k(t - t_0)) \quad (7)$$

M_p は最終定常膜量で、 $M_p = DCY(1-a/(v+a))/k\delta_2$ (8) である。

式中の諸量に表-1の値を代入してシミュレーションを行った結果を図-9中に示す。

図-10は式(8)より得られる M_p と流速の関係である。 M_p はある流速で極大となるが、これは、Trulearらが二重回転円筒を使用して行った結果である図-11と同じ傾向である。

参考文献 1) 細井・村上他: 管壁における付着生物膜の形成におよぼす流れの影響について(1),(2), 土木学会中四国支部講演会59, 60年。
2) M.G.Trulear, W.G.Chracklis: Dynamics of biofilm processes, Jour.WPCF, Vol.54, 1982.

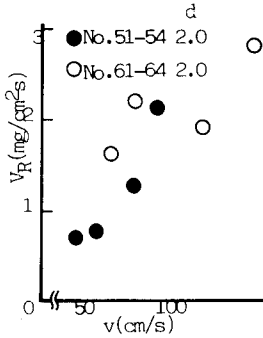


図-5 V_R と v の関係

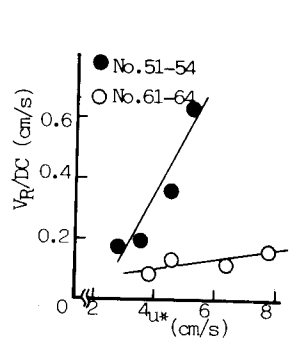


図-6 V_R/DC と u_x の関係

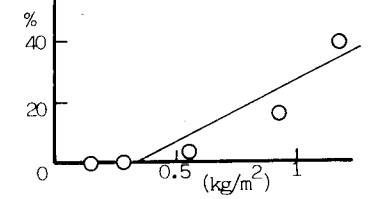


図-7 はく離率とせん断応力との関係

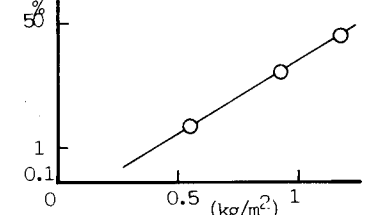


図-8 はく離率の正規確率プロット

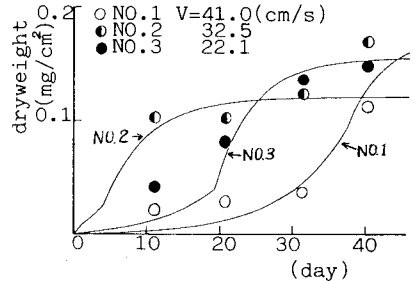


図-9 実験結果およびシミュレート結果

表-1 諸定数の値

$C = 1.1 \times 10^{-3} \text{ (mg/cm}^3\text{)}$	$\delta = 1.4 \times 10^{-6} \text{ (1/s)}$
$Y = 0.15$	$K1 = 1.66 \times 10^{-6} \text{ (cm/s)}$
$m_1 = 2.24$	$K2 = 8.96 \times 10^{-3} \text{ (cm/s)}$
$r = 8.5$	$K3 = 0.241$
$n = 0.29$	$a = 241 \text{ (cm/s)}$
$D = 1.74 \times 10^{-3} \text{ (cm}^2\text{/s)}$	$\delta_2 = 10 \text{ (}\mu\text{m)}$

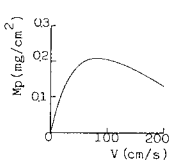


図-10

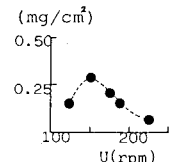


図-11