

II-352 管路流による付着生物膜の形成と流れの関係に関する考察(2)

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  
 NTT 中国 新谷 吉朗

1.はじめに 本報告は、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、前報にひき続き管路流と硝化菌による実験を行ったものである。せん断応力によるはく離、基質輸送に関係する濃度境界層等を考慮すると付着生物膜の形成におよぼす流れの影響として、摩擦速度  $u_*$  が重要な水理因子であると考えられる。

2.増殖曲線 前回と同様の管路流と硝化生物膜による実験結果から、付着生物膜の増殖曲線を図-1~4に示す。各図における実験は、それぞれ同時に同じ水質条件下で行ったものである。図-1の実験の範囲 ( $u_* > 5.0$  cm/sec) では  $u_*$  が大きいほど付着量は少なくなっており、 $u_*$  は増殖に阻害的な影響を示している。一方、これよりもう少し低流速領域で行った実験(図2~4)では、流れが速い ( $u_*$  が大きい) 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傾向が認められる。従って、付着生物膜の増殖には流れが速すぎても遅すぎても不利となり、本実験結果より  $u_*$  の値が 2.0 cm/sec前後の流れが最も有効であるといえる。

3.生物膜の増殖モデル 筆者らは前報で、2で述べたような増殖特性を説明するために以下のような増殖モデルを導入した。生物膜形成初期と、ある程度の成長後ではその増殖機構が異なるとして膜の形成過程を2段階に分けて考え、初期の段階における膜増殖を式(1)で、生物膜が十分発達した状態における膜増殖を式(2)で与えた。

$$dM/dt = r q + \mu M \quad (1)$$

$$dM/dt = j Y - R_d \quad (2)$$

ここで、 $q$ 、 $j$ ：バクテリアおよび基質のフラックス  $r$ ：残存率  
 $\mu$ ：比増殖速度  $Y$ ：収率係数  $R_d$ ：はく離速度

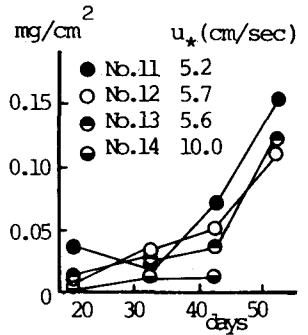


図-1 付着生物量の変化

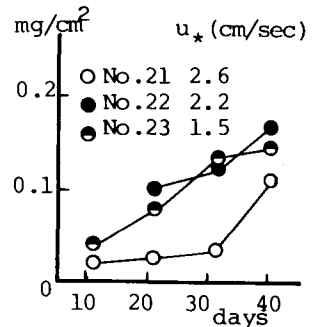


図-2 付着生物量の変化

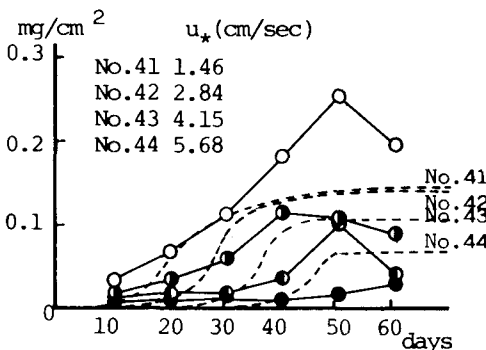


図-4 付着生物量の変化とシミュレート結果

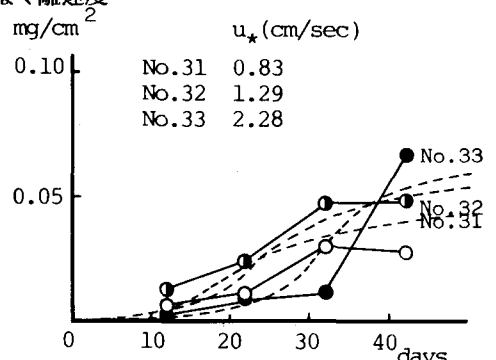


図-3 付着生物量の変化とシミュレート結果

3-1.各因子の水理量による表示 前報では流れによる影響を平均流速を用いて表したが、生物膜の形成に直接関係するのは膜表面に対する影響であるので、摩擦速度で表現した方がより直接的で適切である。そこで、式(1)、(2)の各項を、摩擦速度  $u_*$  を用いて書き表す。

まず,  $r$  と  $R_d$  についてはすでに以下の式を提案している。

$$r = \exp(-k_1 u \cdot) \quad (3)$$

$$R_d = f M, \quad f = k_4 \exp(k_5 u \cdot) \quad (4)$$

ここで,  $k_4, k_5$  は定数

$q$  および  $j$  については, 膜表面付近に乱流の影響がおよばず分子拡散で物質の輸送が行われる濃度境界層  $L$  を考えると, それぞれつぎのように表すことができる。

$$q = D_B m / L \quad (5) \quad j = D_S C / L \quad (6)$$

ここで,  $D_B, D_S$ : それぞれバクテリアおよび基質の拡散係数

$m, C$ : それぞれ主流部における菌濃度および基質濃度

$L$  は粘性底層の厚さ  $\delta$  に比例すると考えると,  $\delta \sim 10\nu / u \cdot$  で与えられるから式 (5), (6) はそれぞれつぎのように書きかえられる。

$$q = (k_2 D_B / 10\nu) m u \cdot \quad (7)$$

$$j = (k_3 D_S / 10\nu) C u \cdot \quad (8)$$

ここで,  $k_2, k_3$ : 比例定数 ( $\delta / L$ )  $\nu$ : 動粘性係数  
 増殖曲線が式 (1) から式 (2) に移行する境界の生物膜量を  $M_C$  とすると, 両曲線は  $M = M_C$  でなめらかに接続しなければならないから式 (1) と式 (2) を等置して  $M_C$  を求めるとつぎようになる。

$$M_C = (j Y - r q) / (\mu + f) \quad (9)$$

また, 最終的な定常状態に達したときの生物膜量  $M_P$  は, 式 (2) を 0 とおいて式 (4), (8) を代入すると次式を得る。

$$M_P = (k_3 D_S C Y / 10 k_4 \nu) u \cdot \exp(-k_5 u \cdot) \quad (10)$$

以上を解いてつぎのような結果を得る。

$$0 < M < M_C \quad (0 < t < t_c)$$

$$M = r q (\exp(\mu t) - 1) / \mu \quad (11)$$

$$M_C < M \quad (t_c < t)$$

$$M = M_P - (M_P - M_C) \exp(-f(t - t_c)) \quad (12)$$

3-2. 各定数の決定およびシミュレーション Characklis は微生物細胞の付着面への沈着数と輸送数の比較を行っており, その比を  $u \cdot$  に関してプロットすると図-5 のようになる。この縦軸が残存率  $r$  に相当するものと考えられるので, 図中の実線で示された関係を式 (3) に適用すると  $k_1 = 1.78$  を得る。

粘性底層と濃度境界層の厚さの比は, ほぼ Schmidt 数の  $1/3$  乗に等しいと考えることができ,  $k_2, k_3$  は  $S_c^{1/3}$  とおける。本研究では基質としてアンモニアを用いており,  $D_S$  はアンモニアの拡散係数  $1.76 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$  ( $20^\circ\text{C}$ ) を用いると  $S_c$  は 570 となり  $k_3 = 8.3$  となる。一方, バクテリアの拡散係数については Stokes-Einstein の式より  $D_B$  の概略値として,  $4.3 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$  を得た。これより  $S_c = 2.3 \times 10^5$ ,  $k_2 = 61$  を得る。

最終定常膜量  $M_P$  は, 図-6 のように  $u \cdot = 1/k_5$  で最大値  $M_{Pm}$  をとる。実験結果より  $M_P$  が最大となるときの  $u \cdot$  を  $2.0 \text{ cm}/\text{sec}$  とおくと,  $k_5 = 0.5$  となる。このときの  $M_{Pm}$  より,  $k_4$  は式 (10) から求まり,  $k_4 = 4.9 \times 10^{-7}$  となる。なお, その他の諸量の値は表-1 のとおりである。

以上の各値を式中の諸量に代入してシミュレーションを行った結果を図-3, 4中に示す。各図ともほぼ実験結果を再現しており, 本モデルにより  $u \cdot$  と増殖特性の関係を説明することができる。

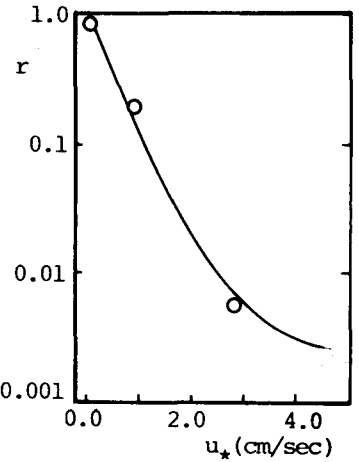


図-5 残存率と  $u \cdot$  の関係

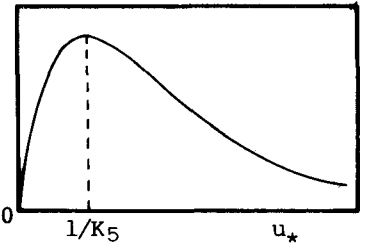


図-6  $M_P$  と  $u \cdot$  の関係

表-1 諸数値

	No.31-33	No.41-44
$C(\text{mg}/\text{cm}^3)$	$1.0 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-3}$
$m(\text{mg}/\text{cm}^3)$	$2.0 \times 10^{-3}$	$5.0 \times 10^{-3}$
$\mu(1/\text{sec})$	$1.9 \times 10^{-6}$	$2.5 \times 10^{-6}$
$Y$	0.05	