

武蔵工業大学大学院 学生員 ○杉尾勝之

武蔵工業大学工学部 正員 長岡 裕

1. はじめに

水処理システムにおける付着生物膜の増殖促進, 制御のためには生物膜近傍の水理条件の制御が重要である。強い乱流中においては付着微生物は糸状になって揺らぎ, 流体運動が基質除去特性を左右することになる。筆者らは生物膜内部における物質輸送を糸状生物膜の揺らぎによる乱流拡散と考え, 膜内部で均一な値を持つ乱流拡散係数を仮定したモデルを提案しているが¹⁾, 実際の現象では, 生物膜深部へ行くほど拡散係数の値は小さくなると考えられる。本研究は, 糸状生物膜の内部における乱流拡散係数の分布を考慮したモデルを用いて数値シミュレーションを行い, 生物膜近傍における水理条件が生物膜の基質消費速度に与える影響について考察したものである。

2. モデルの概要

付着生物膜による基質消費が基質消費速度に対する1次反応であると仮定し, フィック型の拡散方程式と定常状態を考えると, 生物膜内部の基質濃度分布に関して以下の式が成立する。

$$\frac{d}{dz} \left(K \frac{dC}{dz} \right) = k_{1f} C \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{境界条件 } z=0: C=C_s, \quad z=L: \frac{dC}{dz}=0$$

ただし, K : 拡散係数 [$L^2 T^{-1}$], k_{1f} : 1次反応速度定数 [T^{-1}], z : 距離 [L], C : 基質濃度 [ML^{-3}], C_s : 生物膜表面における基質濃度 [ML^{-3}], L : 生物膜厚さ [L] である。

清水ら²⁾は, 植生を有する河床上の流れについて $k-\epsilon$ モデルを用いた乱流シミュレーションを行い, 植生内部の渦動粘性係数分布は, 植生密度によらず植生境界面から底面まで減少する形となることを示している。本研究では, 糸状の生物膜上の流れと植生上の流れとを同様なものとみなし, また渦動粘性係数と乱流拡散係数が等しい仮定して, 生物膜内部の乱流拡散係数を, 次式の通り膜表面から底面まで直線的に減少する形を仮定した。

$$K = D_m + \left(1 - \frac{z}{L} \right) (K_s - D_m) \quad \dots \dots \dots (2)$$

ただし, K_s : 生物膜表面における乱流拡散係数 [$L^2 T^{-1}$], D_m : 分子拡散係数 [$L^2 T^{-1}$] である。ここで(1), (2)式を無次元化すると以下の式を得る。

$$\frac{d}{d\xi} \left[\left\{ \frac{1}{\alpha} \left(1 + \left(\frac{\alpha}{\beta} - 1 \right) \xi \right) \right\} \frac{d\hat{C}}{d\xi} \right] = \hat{C} \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{境界条件 } \xi=0: \hat{C}=1, \quad \xi=1: \frac{d\hat{C}}{d\xi}=0$$

ただし, $\hat{C} = C/C_s$, $\xi = z/L$, $\alpha = k_{1f} L^2 / K_s$, $\beta = k_{1f} L^2 / D_m$ である。

3. シミュレーション結果と考察

Runge-Kutta法により式(3)を解き、基質濃度分布を計算した結果を図. 1に示す。また比較のために、生物膜内部の乱流拡散係数が一定であると仮定した($\alpha = \beta$ として計算) 基質濃度分布を図. 2に示す。拡散係数の分布を考慮すると膜深部における基質濃度の減少が著しいことが示されている。

乱流拡散係数の分布を考慮した場合、および乱流拡散係数の値が一樣であるとした場合それぞれについてにおいて、生物膜表面における乱流拡散係数の変化が基質消費フラックスに与える影響について計算した結果を図. 3に示す。図の横軸は無次元化した拡散係数： $1/\alpha = K_m/k_{1f}/L^2$ を、縦軸は無次元化した基質消費フラックス： $\hat{J} = JL/C_0/D_m$ を示している。図. 4は図. 3を両対数で示したものである。生物膜深部にいたるまで基質が届いていない条件では、一様な拡散係数の値を仮定すると、 $\hat{J} \propto (1/\alpha)^{0.5}$ となることが知られているが、乱流拡散係数の分布を考慮すると、生物膜表面の乱れが基質消費速度に与える影響がやや小さくなる(図. 4の勾配が小さくなる)ことが示されている。

図. 5は生物膜表面における乱れ強度の変化が基質消費フラックスに与える影響について、実験水路を用いて測定した結果³⁾であるが、フラックスは乱れ強度のほぼ0.4~0.5乗に比例している。乱れ強度と乱流拡散係数が比例すると考えると、ほぼモデルに合致する結果ではあるが、特に拡散係数の分布を考慮したモデルが妥当であることを示すには至っていない。今後は、生物膜内部の物質輸送機構について議論が可能となる実験を工夫する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) Kugaprasatham et. al. (1991) Effect of short-term and long-term changes in hydraulic conditions on nitrifying biofilms, Wat. Sci. Tech., 23, 1487-1494
- 2) 清水ら (1991) 植生に覆われた砂床上流れの浮遊砂濃度分布, 水工学論文集, 35, 477-482
- 3) 杉尾ら (1993) 付着生物膜上の流速分布と基質輸送機構, 第27回日本水環境学会講演集, 348-349

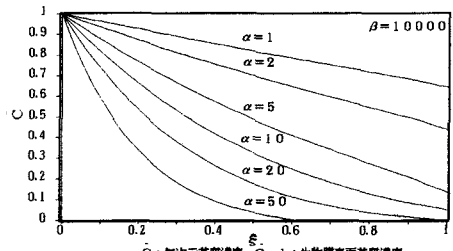


図. 1 生物膜中における基質濃度分布 ($\beta = 10000$)

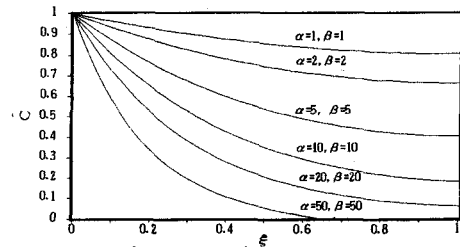


図. 2 生物膜中における基質濃度分布 ($\alpha = \beta$)

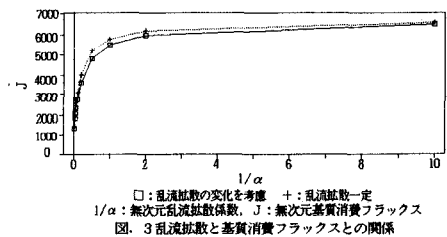


図. 3 乱流拡散と基質消費フラックスとの関係

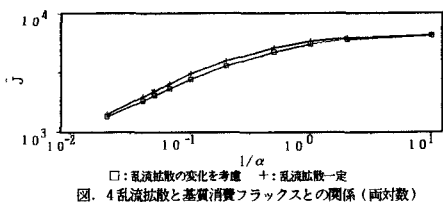


図. 4 乱流拡散と基質消費フラックスとの関係 (両対数)

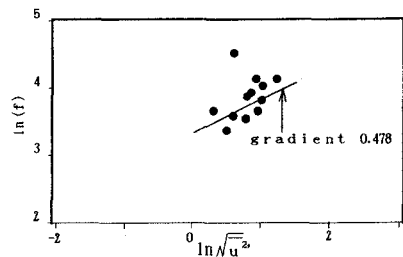


図. 5 生物膜表面における乱れ強度と比フラックスの関係 (両対数グラフ)