

1. はじめに

生物膜法を用いた水処理システムにおける付着生物膜の増殖促進および制御のためには、生物膜近傍の流体運動による生物膜近傍における物質輸送機構を知ることは重要である。

本論では往復流下における生物膜近傍の流体運動と生物膜の基質消費特性についての基礎研究として生物膜近傍における流体運動のシミュレーションを行った。

2. 計算方法¹⁾

2.1 低レイノルズ数 k-ε 乱流モデル

低レイノルズ数 k-ε 乱流モデルは壁による減衰効果を受ける壁近傍や分子粘性の影響が顕著な領域、流れ場まで解析するため、渦動粘性係数(ν_t)と分子動粘性係数(ν)の比で与えられる乱流レイノルズ数 Re_t が重要な因子となる。さらに生物膜による流体運動への影響を考慮するため、生物膜を植生とし、式中に取り込んだ。往復流下における植生を考慮した低レイノルズ数 k-ε 乱流モデルの流速、乱流エネルギー、散逸の基礎式を以下に示す。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left(\nu + \nu_t \right) \frac{\partial u}{\partial y} \right\} + \frac{\partial u_e}{\partial t} + F \quad \dots(1)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right\} + \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 - \varepsilon - D + F|u| \quad \dots(2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right\} + C_{\varepsilon 1} f_1 \nu_t \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \\ & + C_{\varepsilon 1} f_1 \frac{\varepsilon}{k} F|u| - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\varepsilon^2}{k} + E \end{aligned} \quad \dots(3)$$

$$\nu_t = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \dots(4)$$

$$u_e = U_w \cos \left(\frac{2\pi}{T} t \right) \quad \dots(5)$$

$$R_t = \frac{k^2}{\varepsilon \nu} \quad \dots(6)$$

ここで、 ν : 動粘性係数(cm^2/s)、 ν_t : 渦動粘性係数(cm^2/s)、 u : 流速(cm/s)、 k : 乱流エネルギー(cm^2/s^2)、 ε : 散逸(cm^2/s^3)、 y : 壁面からの距離(cm)、 u_e : 境界層外の流速(cm/s)、 U_w : 振幅(cm/s)、 t : 時間(s)、 T : 周期(s)、 Re_t : レイノルズ数である。また、基礎式中の定数、関数を Table 1 に示す。

Table 1 Coefficient and Function

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε
0.09	1.55	2	1	1.3
f_1	f_2		f_μ	
1.0	$1-0.3\exp(-Rt^2)$		$\exp\left(\frac{-2.5}{1+Rt/50}\right)$	
D		E		
$2\nu\left(\frac{\partial\sqrt{k}}{\partial y}\right)^2$		$2\nu\nu_t\left(\frac{\partial^2u}{\partial y^2}\right)^2$		

式中の F は植生に関する抵抗を示し、次の式を用いた。

$$F = \frac{1}{2} C_{dx} \lambda u^2 \quad (0 \leq y \leq \delta) \quad \dots(7)$$

ただし、 C_{dx} : 抗力係数($=0.05$)、 λ : 植生密度(cm^{-1})、

δ : 生物膜厚($=0.1\text{cm}$)とした。

2.2 無次元化

シミュレーションをするにあたり、基礎式を無次元化した。無次元化を行ったパラメーターにはチルドをつけた。以下に無次元化に用いた式を示す。

$$\tilde{u} = u/U_w, \quad \tilde{t} = t \cdot \sigma, \quad \tilde{u}_e = u_e/U_w, \quad \tilde{k} = k/U_w^2,$$

キーワード: 生物膜, k-ε 乱流モデル, 物質濃度分布

連絡先: 〒番号 158-0087 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 Tel.03-3703-3111 水工学研究室

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon \cdot y_h / U_w^3, \quad \tilde{y} = y / y_h, \quad S = U_w / (\sigma \cdot y_h),$$

$Re = U_w^2 / (\sigma \nu)$, y_h : 境界層までの距離, σ : 角振動数 である.

2. 3 物質濃度分布のモデル式²⁾

低レイノルズ数 $k-\varepsilon$ 乱流モデルにより計算された渦動粘性係数を乱流拡散係数と等しいものと置き、植生近傍まで物質濃度は一定と仮定し、以下の式を用いて物質濃度分布を計算した.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dy} \left(K \frac{dc}{dy} \right) &= 0 \\ K &= K_\varepsilon + D_m \\ K\varepsilon &= \nu_t \end{aligned} \right\} \quad \cdots(11)$$

ここに、 K : 拡散係数, K_ε : 乱流拡散係数, D_m : 分子拡散係数, ν_t : 渦動粘性係数

2. 4 設定条件

境界条件として、以下の(8), (9)式を用いる. また、往復流下においては流速の式(1)に現れる主流の変動は正弦的であるととし、これに対応する圧力勾配は(10)式とした.

$$\tilde{u} = \tilde{k} = \tilde{\varepsilon} = 0 \quad \text{at} \quad \tilde{y} = 0 \quad \cdots(8)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{y}} = \frac{\partial \tilde{k}}{\partial \tilde{y}} = \frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial \tilde{y}} = 0 \quad \text{at} \quad \tilde{y} = 1 \quad \cdots(9)$$

$$\tilde{u}_e = \cos(\tilde{t}) \quad \cdots(10)$$

初期値として流速、渦動粘性係数は混合距離を使用した定常流の結果を用い、乱れエネルギーの消散である散逸はその結果を用いて決めた.

無次元化した式を y について中央差分法し、 t について Runge-Kutta 法により計算を行った. 本論で用いた低レイノルズ数 $k-\varepsilon$ 乱流モデルは分子粘性の作用する薄い層まで解析するため、壁近傍における差分格子の間隔を細かくした.

レイノルズ数 12000, $S=0.75$, 時間刻み $\Delta t=2\pi/1000$ とし、植生密度を $\lambda=0.3$ とし、植生近傍における流体運動および物質濃度分布のシミュレーションを行った.

3. 計算結果

Fig.1 に流速のシミュレーション結果を示す. 壁面近傍において、植生の影響を受け、流速が減少する

ことが示された.

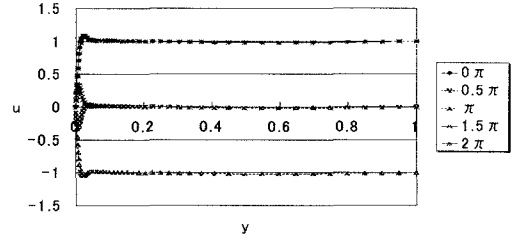


Fig.1 Profile of u .

Fig.2 に渦動粘性係数のシミュレーション結果を示す. 植生の影響により渦が増大し、渦動粘性係数は植生領域内で値が大きくなった.

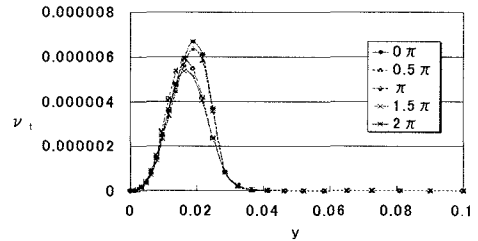


Fig.2 Profile of ν_t

Fig.3 に物質拡散のシミュレーション結果を示す. 植生によって発生した渦の影響により渦動粘性係数が増大し、植生領域内まで物質が拡散することが示された. また、乱流拡散係数の減少により、分子拡散の影響が大きくなったと言える.

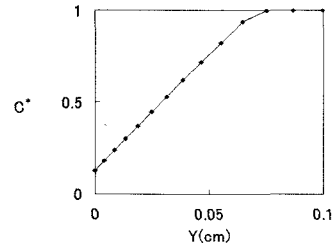


Fig.3 Profile of Dimensionless Concentration

4. まとめ

本研究で用いたモデルにより物質濃度分布の理論解を求めることができた. 今後は実測値との比較を行い、整合性をとる必要がある.

<参考文献>

- 1) 田中仁・Ahmad SANA: 低レイノルズ数 $k-\varepsilon$ モデルによる波動境界層の計算, 水工学論文集, 第 38 巻, pp.481~486, 1994.
- 2) 中埜智親: 付着生物膜上の流れの構造が基質輸送機構に与える影響, 武蔵工業大学修士論文, 1998