

武蔵工業大学大学院 学生会員 中埜 智親*
 武蔵工業大学工学部 正会員 長岡 裕**

1. はじめに

本研究では、小型の循環水路を用いて水路側面に生物膜を付着させ生物膜近傍の流速及び乱れ強度の測定を行った。また、生物膜近傍の流体運動による生物膜への基質の輸送機構と基質消費特性を解明する目的で、実験及び $\kappa-\varepsilon$ モデル式を用いたシミュレーションにより検討した。

2. 実験装置

実験装置を Fig. 1 に示す。小型循環水路は高さ 2015mm, 幅 80mm, 奥行き 100mm, のアクリル製の水路で、水路内水の水量を 21.6L で一定に保った。予備として同寸法の水路を厚さ 10mm のアクリル製の仕切板を挟み併設した。流入水の水理学的滞留時間は約 30min である。また、投入基質の水路内グルコース濃度は約 10mg L^{-1} とした。

3. 実験方法

水路側面に糸状に付着した生物膜近傍の流速と乱れ強度の測定を、L. D. V. により行った（周波数 100Hz, サンプルング数 4096）。測定ポイントは、水路側面より水平方向に 15mm まで 1mm 間隔で、15mm から 40mm までは 5mm 間隔で 1 回測定した。また、測定時の水路内水温は、 25°C で生物膜の厚さは 5mm 程度（目視計測）であった。水理学的滞留時間の 3 倍の 1.5 時間後に流速を変化させ、同様に測定を行いグルコース定量法により比フラックス（ f : 単位面積当たり基質消費速度を流水中基質濃度で除したのもで速度の次元を持つ）を求めた。

レイノルズ数の定義は右式に示す。

$$Re = \frac{\bar{u}(2D)}{\nu} \quad \text{ただし、} D: \text{有効水路幅}(\text{cm}), \bar{u}: \text{平均流速}(\text{cm s}^{-1}), \nu: \text{動粘性係数}(\text{cm}^2 \text{s}^{-1})$$

4. 低レイノルズ数 $\kappa-\varepsilon$ モデル¹⁾を用いたシミュレーション方法

一方向流下の低レイノルズ数 $\kappa-\varepsilon$ モデルを下に示す。

$$\frac{\partial}{\partial y} \left\{ (v + v_t) \frac{du}{dy} \right\} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dx}, \quad v_t = c_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right\} + v_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 - \varepsilon + D = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right\} - C_{\varepsilon 1} f_1 \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left\{ f_1 v_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} + E = 0 \quad (3)$$

ただし、 ν : 動粘性係数($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$), ν_t : 渦動粘性係数($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$) k :

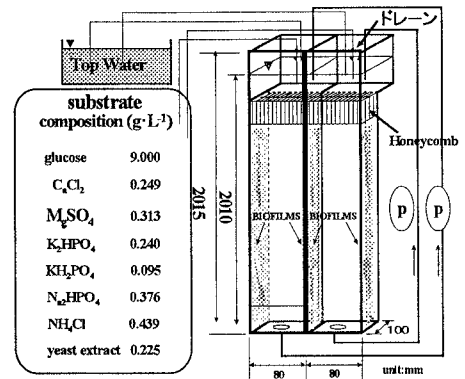
乱流エネルギー($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$), ε : 散逸($\text{cm}^2 \text{s}^{-3}$), y : 壁面からの距離(cm)

基礎式中の諸係数、関数について以下に示す。

* 武蔵工業大学工学研究科土木工学専攻（〒158 東京都世田谷区

玉堤 1-28-1 TEL. 03-3703-3111)

** 工博 武蔵工業大学助教授(同上)



C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_κ	σ_ε
0.09	1.55	2.00	1.00	1.30
f_μ		f_1	f_2	
$\exp(-2.5(1 + R_t / 50))$		1.0	$1 - 0.3 \exp(-R_t^2)$	
D		E		
$2\nu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial y} \right)$		$2\nu v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)^2$		

R_t : 乱流レイノルズ数 ($R_t = k^2/\nu/\varepsilon$)

境界条件

$$\left. \begin{aligned} u &= k = \varepsilon = 0 && \text{生物膜表面} \\ \frac{\partial u}{\partial y} &= \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0 && \text{水路中央} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

以上のことから、壁面を滑面とし差分法を用いたシミュレーションを行った。

乱れ強度の計算方法は、シミュレーション結果からの乱流エネルギーを(5)式及び開水路に関しての循環の半理論式²⁾に導き出された(6)式より u', v', w' に配分し求めた。

$$k = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} u' / u_* &= 2.3 \exp(-y/h) \\ v' / u_* &= 1.27 \exp(-y/h) \\ w' / u_* &= 1.63 \exp(-y/h) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ただし、 u', v', w' は流下、鉛直、水平の各方向の乱れ強度、 u_* ：摩擦速度、 $h = D/2$ である。

また、基質濃度分布の計算は、基質濃度の無次元化を行って水路中央で $\tilde{C} = 1$ ($\tilde{C}$ ：無次元基質濃度)とし、反応は基質濃度に対して一次反応であることから比フラックスと生物膜表面での基質濃度が比例し、生物膜の厚さは十分に厚いという条件で行った。

この際に、 $Re=29000$ の比フラックスを6(cm/h)として、 $Re=21000, 16000, 9200$ の基質濃度分布は比フラックスと壁面での基質濃度の両方が $Re=29000$ と同割合である値を計算した。

5. 実験結果

流速分布（実験値）と $\kappa - \varepsilon$ モデル式を用いたシミュレーション結果をFig. 2に示す。生物膜の厚さは5mm（目視計測）とした。流速分布の計算結果と実験結果は、ほぼ一致している。

乱れ強度（実験値）と $\kappa - \varepsilon$ モデル式を用いた乱れ強度のシミュレーション結果をFig. 3に示した。乱れ強度分布では、糸状に付着した生物膜の影響で計算結果と実験結果との間でずれが生じていると推測できる。

Fig. 4に基質濃度分布の計算結果を示す。レイノルズ数に応じて基質消費傾向を示している。

Fig. 5に、比フラックス（実験値）とレイノルズ数の関係について、実測値の計算値をあわせて示す。レイノルズ数の減少に伴う基質消費速度の減少を $\kappa - \varepsilon$ モデルを用いたシミュレーションにより説明できることが示された。

6. まとめ

本研究では、生物膜を均一に付着しているものとして検討を行ったが、実際は糸状に不均一に付着している。今後は、このような生物膜を考慮に入れることが課題である。

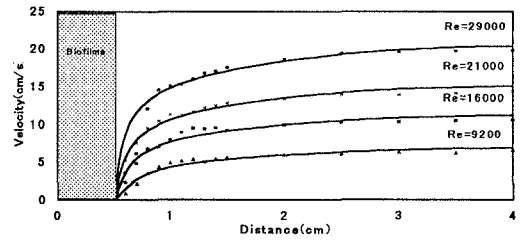


Fig.2 Velocity profiles above the biofilms with different Reynold's number.

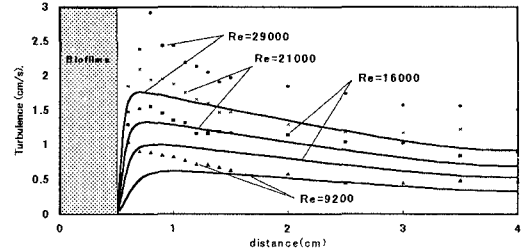


Fig.3 Turbulent intensity profiles above the biofilms with different Reynold's number.

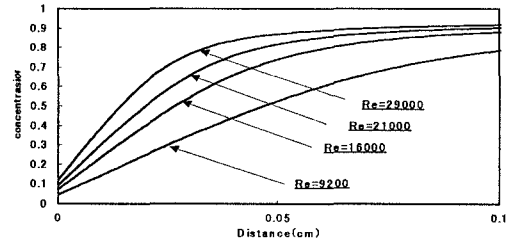


Fig.4 Substrate concentration profile above the biofilms with different Reynold's number.

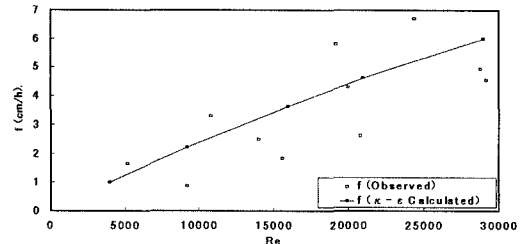


Fig. 5 Effect of Reynold's number on the specific flux of substrate into the biofilms, f .

- 1)小竹進, 土方邦夫: パソコンで解く熱と流れ, 丸善株式会社
- 2)榎津家久: 開水路乱流の乱れ強度に関する研究. 土木学会論文集, No. 261, pp. 67~76, 1977.
- 3)松村昌広(1994): 生物膜上の流れの構造が基質輸送機構に与える影響, 武蔵工業大学卒業論文