

B-32 振動流下における付着生物膜への基質輸送機構に関する研究

武蔵工業大学 学生会員 ○秋本 大賀

武蔵工業大学 正会員 長岡 裕

1. はじめに

生物膜の自浄作用を利用した水処理システムにおいて、付着生物膜の増殖、維持管理を行うためには、生物膜近傍の流体運動による生物膜への基質の輸送が重要であり、生物膜近傍の流体運動と生物膜の基質除去特性の関係を調べる事が重要である。

本論文は、振動流下における、生物膜近傍での流体運動の解明をする目的で、振動流体運動を与えることができる小型循環水路を用いて水路側面に生物膜を付着させ、生物膜近傍において、流速を測定し、振幅、乱れ成分と波成分を測定した。また、水理条件の短期的変化が生物膜による基質除去特性にどのような影響を与えるかに関して実験的研究を行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験装置の概略図を Fig.1 に示す。幅 30cm 奥行き 20cm 高さ 80cm のアクリル製の水槽に、幅 20cm 高さ 80cm 板厚 3mm のアクリル板を 8cm 間隔で 3 枚配置したものである。このアクリル板を水槽の中で上下させることによって往復運動を与える。3 枚の板はモーターによって同時に動き、振幅、速度は変化できるものとする。また、排水口（ドレーン）は水槽上端から左右 25cm のところに設け、水深を 80cm にし水路内水の水量は一定(48L)に保ち、マグネットポンプにより 1cm/sec で循環させた。基質は、マイクロチューブポンプで水路内グルコース濃度が約 10mg/L になるように供給した。

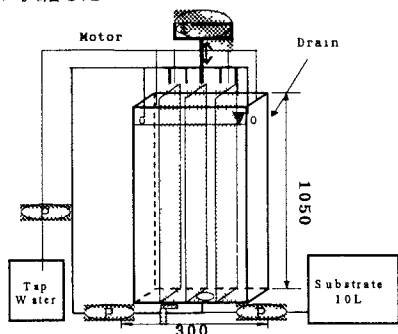


Fig.1 Oscillatory Flow Channel.(unit : mm)

2.2 基質

主成分としてグルコースを使用し、微生物の育成に必要な栄養塩類、酵母エキスを加えたものを基質として供給した。基質の組成を Table.1 に示す。

Table .1 Composition of substrate (g/L)

glucose	4.500	KH ₂ PO ₄	0.048
CaCl ₂	0.125	Na ₂ PO ₄	0.188
MgSO ₄	0.157	NH ₄ Cl	0.220
K ₂ HPO ₄	0.120	yeast extract	0.113

3. 測定方法

3.1 流速の測定

水路に糸状に付着した生物膜近傍での流速の測定を L.D.V. により行った。(周波数 100Hz, サンプリング数 4096)測定ポイントは、生物膜端部から 10mm まで 1mm 間隔で、水路中央部まで、20mm, 30mm, 40mm, を 1 回測定した。また、糸状生物膜の厚さは目視計測により、0.2 ~ 0.5mm であり、レイノルズ数 530 ~ 16000, 水路内水温 23 ~ 28°C の範囲で実験を行った。水理学滞留時間の 3 倍時間後に振幅速度を変化させ、同様に測定を行い、グルコース定量法を用いて比フラックスを求めた。

流速結果を時間で成分することで振幅を求め、流速変動から波動成分と乱れ成分に分離した。

実験におけるレイノルズ数を(1)式により定義した。

$$Re = \frac{u_{bm} \cdot a_{bm}}{\nu} \quad (1)$$

ただし、 ν : 動粘性係数 (cm^2/s), u_{bm} : 水平流速振幅 (cm/s), a_{bm} : 水粒子軌道振幅 (cm/s) である。

3.2 基質消費フラックスおよび比フラックスの算出方法

水理条件の短期的に変化が、生物膜による基質消費速度にどのような影響を与えるかを調べたための指標として、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もので、速度次元を持つ) を(2)式のように定義した。

$$f = \frac{F}{C} \quad (2)$$

ただし、 C : 水路内基質濃度 F : 基質消費速度

(2)式の基質消費フラックスは(3)式から求めた.

$$F = \frac{R_b}{A} \quad (3)$$

ただし, R_b :水路側面に付着している生物膜による基質消費速度, A :生物膜付着面積

また, 本研究では, 水路内中に浮遊している微生物の影響は無視できるものとした.

また, 基質消費速度は(4)式から算出した.

$$R_t = (C_{in} - C_{out}) \cdot Q \quad (4)$$

ただし, Q :基質の流入量(水道水+基質),

C_{in} :流入基質濃度, C_{out} :流出基質濃度

3.3 コヒーレンス法による成分分離方法¹⁾

仕切板における流速を波動成分のみが表れる変動とみなし, それぞれの測定ポイントにおける流速とのコヒーレンスから, 流速変動を波成分と乱れ成分とに分離した.

4. 実験結果

4.1 流速測定結果およびスペクトル解析結果

流速測定結果の一例を Fig.2,4 に, Fig.3,5 に流速をスペクトル解析した結果の一例を示す.

流速結果から測定ポイント 40mm(水路中央)では, 波動による変動のみが明瞭に現れているのに対して, 生物膜近傍の測定ポイント 5mm では, 波動と乱れが混在していることが観察された. また, スペクトル解析の結果から生物膜近傍では, -3 乗則に従うエネルギーの平衡領域が現れ, また 9Hz 以上の高周波域では $-3/5$ 乗則に従う慣性小領域が存在していることが観察されたことから, 2 次元性の強い小規模な渦による乱れと 3 次元性の強い等方的な乱れが混在していると考えられる.

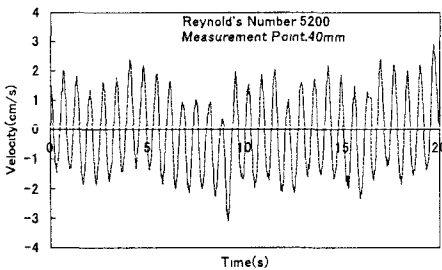


Fig.2 Velocity Fluctuation.

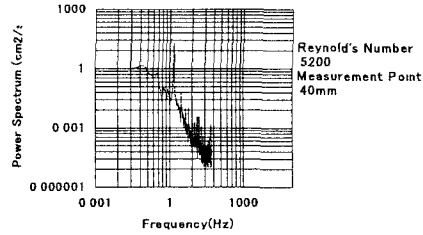


Fig.3 Spectrum of Velocity Fluctuation

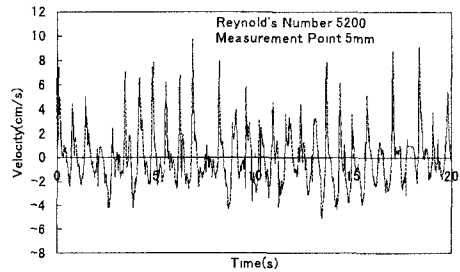


Fig.4 Velocity Fluctuation.

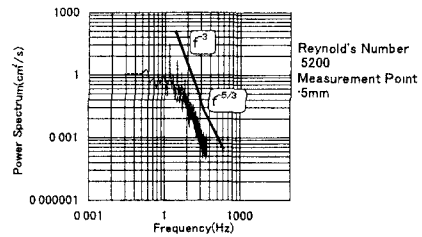


Fig.5 Spectrum of Velocity Fluctuation

4.2 振幅・波動・乱れ成分分離

Fig.6, Fig.7 に, レイノルズ数 5200 における, 振幅分布と各測定ポイントごとに流速変動を波動成分と乱れ成分とに分離した結果を示す. 同様に Fig.8, Fig.9 にレイノルズ数 12000 における振幅分布と波動成分と乱れ成分の分布を示す. 振幅分布から, 生物膜の揺動の影響を受け, 生物膜に近づくにつれ振幅, 波動成分および乱れ成分が増加していることが観察された. Fig.7($Re=5200$)と Fig.9($Re=12000$)において, 生物膜近傍での波動成分と乱れ成分は, レイノルズ数の小さい方が波動成分と乱れ成分が大きい値を示している. これは, 波動成分と乱れ成分の増加は, 水理条件であるレイノルズ数よりも生物膜の厚さや長さによって引き起こされる揺動の方が影響を与えていると推測される.

Fig.10 は往復流下におけるレイノルズ数と比フラックスとの関係を、両対数表示で示した。実験結果から生物膜による比フラックスはレイノルズ数の 0.83 乗であった。Nagaoka²⁾の実験結果およびモデル式においては、生物膜の比フラックスはレイノルズ数の 0.5 乗に比例関係であることを示した。

本実験結果と Nagaoka の実験結果との相違は、Nagaoka の実験ではレイノルズ数 460~2400 の範囲で実験を行い、本研究では、層流から乱流への遷移領域である、レイノルズ数 2000~16000 範囲で実験を行ったことから、乱流状態下における拡散係数の影響をより強くうけていると推測される。

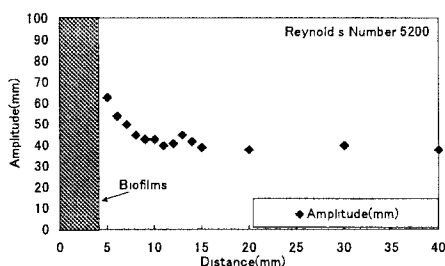


Fig.6 Profile of Amplitude. (Re:5200)

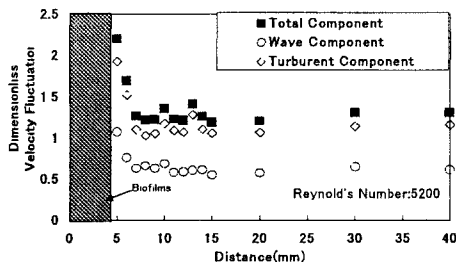


Fig.7 Variation of Wave component and Turbulent component of r.m.s.-Velocity(Re:5200).

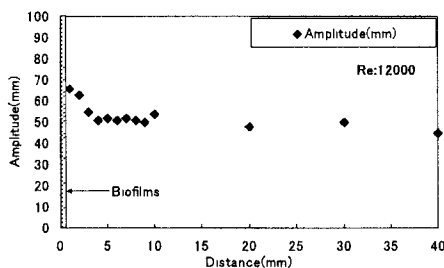


Fig.8 Profile of Amplitude. (Re:12000)

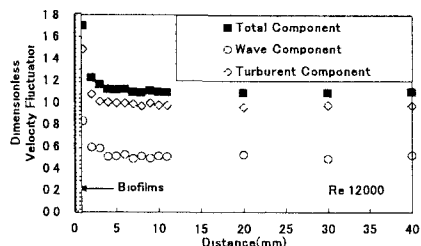


Fig.9 Variation of Wave component and Turbulent component of r.m.s.-Velocity(Re:12000)

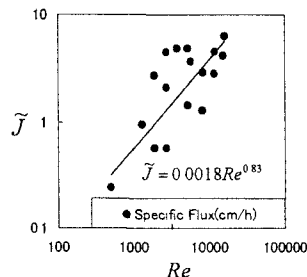


Fig.10 Relationship between Reynold's Number and Specific Flux.(expressed as dimensionless Substrate flux into biofilms)

5. 結論

本研究により得られた結論を以下に示す。

- (1) 往復流下では、生物膜の揺動による影響により、振幅、波成分および乱れ成分ともに生物膜近傍に近づくほど増加していることが観察された。また、生物膜の揺動が、2次元的な渦や3次元性の強い等方的な乱れにより基質拡散が行われていることが示すことができた。
- (2) 往復流下において、生物膜による基質消費フラックスがレイノルズ数の 0.83 乗に比例することを示した。

参考文献

- (1) 瀬津家久 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.
- (2) H.Nagaoka, Mass Transfer Mechanism in Biofilms Under Oscillatory Flow Conditions, *Wat.Sci.Tech*, Vol 36, No 1, pp329-336,1997
- (3) H.Nagaoka, K.Sugio Effect of Turbulent Structure on Filament Type Biofilms Reaction, *Wat.Sci.Tech*, Vol 30, No 11, pp111-120,1995
- (4) 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, 武蔵工業大学修士学位論文, 1998