

生物膜の実験における基質除去に及ぼす浮遊菌の影響

函館高専 正会員 大久保 孝 樹

1. はじめに

生物膜の基質除去を調べるために用いられる実験装置には、CSTR、回転円板、流動床などがあり、そのほとんどの実験系において浮遊菌の影響を無視してモデルの解析がなされている。特に回分実験系では、生物膜からのバクテリアの脱着により浮遊菌数に大きな影響を与えていることが推測される。また、浮遊菌は菌数が少なくても、生物膜と違って拡散抵抗を受けずに基質および酸素を利用可能であり、どの程度、総括的な基質除去に対し浮遊菌の基質除去が影響を与えるかを定量的に調べることは、実験において有益な情報になると考えられる。

今回は、筆者らが従来から行ってきた好酸性鉄酸化バクテリアの生物膜を用いた CSTR の実験について、実験の解析の見直しも含め、基質除去に及ぼす浮遊菌の存在の影響について定量的に考察を加えた。

2. 実験装置

Fig.1 に実験装置 CSTR の概略図を示す。

容量(V)4072cm³ 生物膜付着面積(A)1159cm² (A/V=0.28cm²・l⁻¹)

3. 生物膜と浮遊菌を合わせた総括的基質除去のモデル

(回分実験系)

微生物膜内:

濃度境界層内(拡散層内):

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_f}{\partial t} &= D_{sf} \frac{\partial^2 S_f}{\partial x_f^2} - \frac{v_{s\max} S_f}{K_s + S_f} \frac{C_f}{K_c + C_f} X_f & \frac{\partial S_w}{\partial t} &= D_s \frac{\partial^2 S_w}{\partial x_w^2} \\ \frac{\partial C_f}{\partial t} &= D_{cf} \frac{\partial^2 C_f}{\partial x_f^2} - \frac{v_{c\max} S_f}{K_s + S_f} \frac{C_f}{K_c + C_f} X_f & \frac{\partial C_w}{\partial t} &= D_c \frac{\partial^2 C_w}{\partial x_w^2} \end{aligned}$$

液本体(槽内):

$$\begin{aligned} V \frac{\partial S_b}{\partial t} &= -a \cdot A \cdot D_{sf} \left. \frac{\partial S_w}{\partial x_w} \right|_{x=l} - \frac{v_{s\max} S_b}{K_s + S_b} \frac{C_b}{K_c + C_b} X_b V \\ V \frac{\partial C_b}{\partial t} &= -a \cdot A \cdot D_{cf} \left. \frac{\partial C_w}{\partial x_w} \right|_{x=l} - \alpha \frac{v_{s\max} S_b}{K_s + S_b} \frac{C_b}{K_c + C_b} X_b V + KLa(C^* - C_b)V \end{aligned}$$

ここで、a: 生物膜表面凹凸形状によるフラックス増加率

生物膜の基質除去:

浮遊菌の基質除去:

$$BN_b = a \cdot A \cdot D_{sf} \left. \frac{\partial S_w}{\partial x_w} \right|_{x=l} \quad BR_s = \alpha \frac{v_{s\max} S_b}{K_s + S_b} \frac{C_b}{K_c + C_b} X_b V$$

総括的基質除去に対する浮遊菌の寄与率(CNS)は $CNS = BR_s / (BN_b + BR_s) \times 100(\%)$

(一定基質の定常状態におけるモデル): Deep Biofilm の解析解を用いたモデル

Deep Biofilm の解析解:

$$N_b = D_{sf} \frac{dS}{dx} \Big|_{x=0} = \left[2D_{sf} r_{s\max} X_f \left\{ S^* - S_e + \frac{a-b}{2} \ln \left| \frac{S^{*2} + bS^* + d}{S_e^2 + bS_e + d} \right| + \frac{2d + b(a-b)}{2\sqrt{b^2 - 4d}} \ln \left(\frac{2S^* + b + \sqrt{b^2 - 4d}}{2S_e + b + \sqrt{b^2 - 4d}} \right)^2 \frac{S_e^2 + bS_e + d}{S^* + bS^* + d} \right\} \right]^{1/2}$$

但し、 $S^* < fC^*$ の場合 $S_e = 0$

ここで、 $S_e = S^* - fC^*$, $f = D_{cf} / (\alpha D_{sf})$

$$a = fC^* - S^*, \quad b = fK_2 + K_1 + fC^* - S^*, \quad d = K_1(fK_2 + fC^* - S^*)$$

浮遊菌の基質除去: $R_s = X_s \frac{r_{s\max} S}{K_1 + S} \frac{C}{K_2 + C}$

浮遊菌の寄与率は $CNS = V \cdot R_s / (A \cdot N_b + V \cdot R_s) \times 100(\%)$

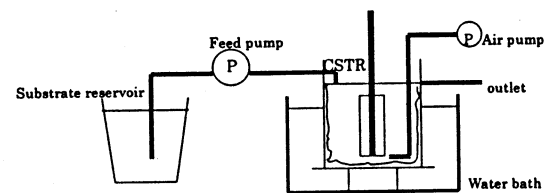


Fig.1 実験装置の概略図

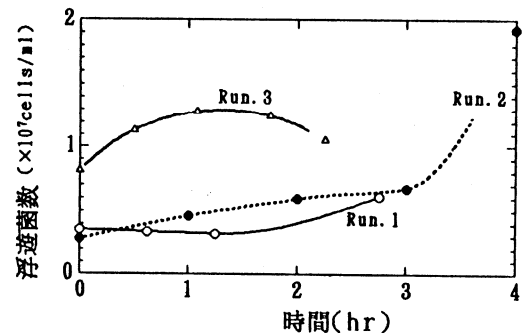


Fig.2 反応槽内の浮遊菌数の時間変化

キーワード: 生物膜, 浮遊菌, 基質除去, 好酸性鉄酸化バクテリア

連絡先: 函館高専環境都市工学科, 函館市戸倉町 14-1, Tel&Fax 0138-59-6487

4. 回分実験における総括基質除去に及ぼす浮遊菌の影響

Fig.2 は、連続実験で馴致した生物膜を用い、回分実験を行った時の反応槽内の浮遊菌数の変化を示したものである。Run.1 は馴致期間 7 日、Run.2 は馴致期間 20 日、Run.3 は馴致期間 54 日である。Fig.3(a)(b)(c)は、Fig.2 の浮遊菌数の変化をスプライン補間し、非定常のモデルにその変化を組み込み、浮遊菌を考慮した場合(実線)と考慮しない場合(破線)(両者とも生物膜表面を平面と仮定)の基質濃度変化をシミュレートしたものである。点は、実験値である。Run.1, Run.2 では、浮遊菌を考慮した場合と考慮しない場合とであまり差はないが、Run.3 では差が生じている。Fig.4 は、浮遊菌を考慮した場合、生物膜の凹凸によるフラックス増加率を調整して実験値にフィットさせた図である。この図の破線は拡散層 $50\mu\text{m}$ を考慮した平面の生物膜のシミュレーション結果である。生物膜のフラックス増加率は、浮遊菌を考慮しない場合の 2.35 に対し考慮した場合は 2.00 となりより小さい値となっている。以前行った有限要素法によるフラックス増加率と比較すると、有限要素法のシミュレーション結果の範囲内にあり、より整合性のとれた値となっている。浮遊菌の影響を定量的に見たものが Fig.5 であり、回分実験の総括的基質除去に対する浮遊菌の寄与率(%)の時間変化を示したものである。高基質で酸素拡散律速時は 10% 前後の影響であるが、低基質で基質拡散律速時には最高 50% にも達している。

5. 一定基質における浮遊菌の影響

Fig.6 は、 $\text{Fe}^{2+}=50\text{mg/l}$ 、 $\text{DO}=5\text{mg/l}$ (Run.3 連続実験の概略の定常値)の条件における、浮遊菌と付着菌の密度比(X_s/X_b)と反応槽の A/V を変数とした場合の総括的基質除去に及ぼす浮遊菌の影響を示したものである。連続実験(Run.3)の浮遊菌の定常値は $3.0\sim 12.0\times 10^6\text{cells/ml}$ であることから $A/V=0.28$ より、浮遊菌の寄与率は 10%~25% であることが示される。

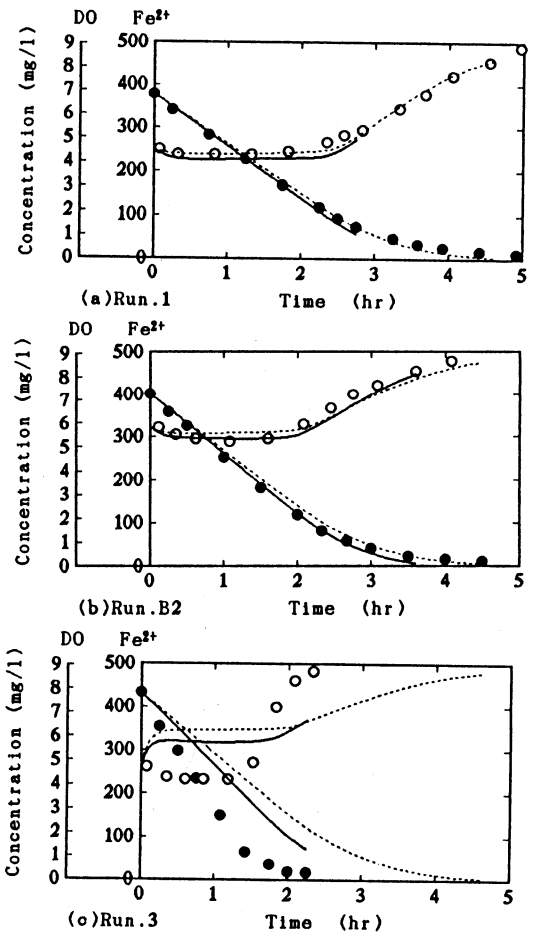


Fig.3 回分実験系のシミュレーション

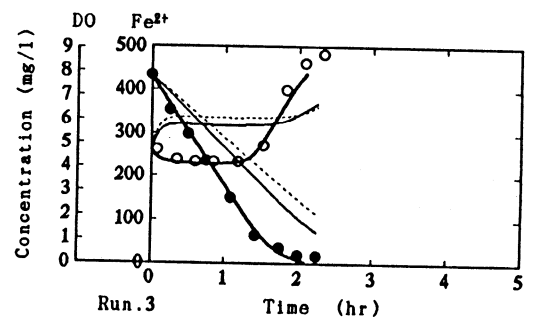


Fig.4 フラックス増加率を考慮したシミュレーション

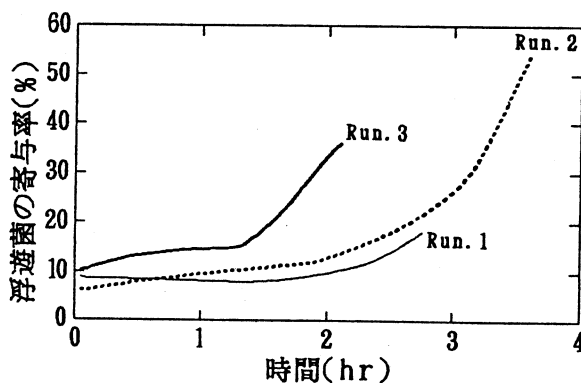


Fig.5 回分実験における基質除去に及ぼす浮遊菌の影響

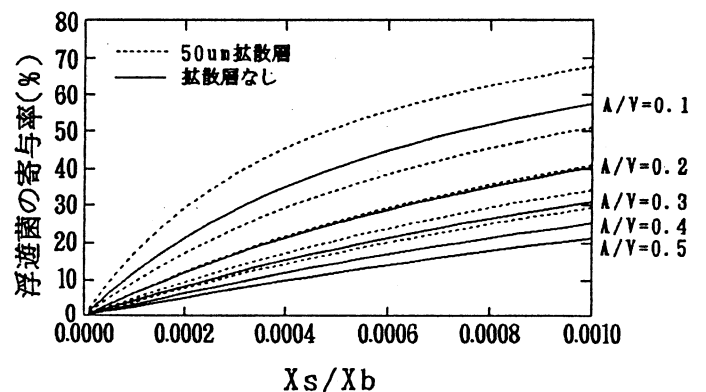


Fig.6 総括的基質除去に対する浮遊菌の寄与率