

II-591 鉄酸化バクテリアによって形成された微生物膜表面の凹凸について

函館高専 正会員 大久保 孝 樹
函館高専 正会員 芦 立 徳 厚
東北大学 正会員 野 池 達 也

1. はじめに

二価の鉄を多量に含んだ強酸性の鉱山廃水が流入した河川あるいは排水路などの河床には、鉄酸化バクテリアと鉄沈殿物によって形成された生物膜が存在するのが、一般的な例である。流水中の二価の鉄は、この鉄酸化バクテリアによって形成された生物膜によって三価の鉄に酸化される。このような生物膜による流水中の酸化を定量的に把握するためには、実験によりその酸化速度を測定するほか、理論的なモデルを実際に構築して実験を再現させることが必要である。一方、実験により生物膜表面の形状を観察すると、従来の膜表面を平面と仮定していたモデルとは大きく異なり、表面はかなりの凹凸を呈していることがわかった。そのため基質除去フラックスに与える凹凸の影響を定量的に調べる必要が出てきた。本研究では、凹凸の定量的な指標として、膜表面の縦断プロファイルの測定による縦断曲線長と直線長との比および凹凸のパワースペクトル分布を選ぶことにした。

2. 実験および生物膜表面の凹凸の測定

約2か月程度、水温20℃の連続状態で基質を投入して馴致した生物膜を用い回分実験を行った。回分実験は次の手順で行った。(1)基質の連続投入を中断する。(2)高濃度の基質を反応槽に50ml投入し、反応槽中の濃度が約400mg/lとなるようにする。(3)10～30分の間隔でDOおよび Fe^{2+} 濃度を測定する。(4)実験終了後微生物膜を剥ぎ落とし、分散状態のバクテリアの動力学定数を Fe^{2+} の初期濃度を変えた回分実験によって求める。

(生物膜表面の凹凸の測定および数値処理) 接写カメラでとった生物膜表面の凹凸の写真(ポジフィルム)をアダム図化機(MPS-2 MICRO PHOTOGRAMMETRIC SYSTEM)で測定し、140～200の非等間隔の縦断面の高さのデータを得た。スペクトルの計算に用いるため、これらのデータを用いスプライン補間し、等間隔の512個のデータを新たに計算した。そして、このデータから縦断曲線長を計算するとともに、MEM(最大エントロピー法)でスペクトルを計算した。

3. 膜表面の平面性を仮定した生物膜モデル

定常状態を仮定した微生物膜モデル(膜厚を無限大として取り扱うことができるものとする。)

$$\left. \begin{aligned} & \text{境界条件} \\ & D_{SF} \frac{d^2 S}{dx^2} = \frac{V_{SMAX} X_V S}{K_1 + S} \frac{C}{K_2 + C} \quad (1) \quad X=0 \text{で} D_{SF} \frac{dS}{dx} \Big|_{x=0} = K_{FS} (S^* - S_s) \\ & \text{溶存酸素に関し} \\ & D_{CF} \frac{d^2 C}{dx^2} = \alpha \frac{V_{SMAX} X_V S}{K_1 + S} \frac{C}{K_2 + C} \quad (2) \quad D_{CF} \frac{dC}{dx} \Big|_{x=0} = K_{FC} (C^* - C_s) \end{aligned} \right\} (3)$$

$$X=\infty \text{で} \frac{dS}{dx} = 0, \quad \frac{dC}{dx} = 0 \quad (4) \quad \text{液境膜を無視した場合は、} X=0 \text{で} S=S^*, C=C^* \quad (5)$$

液境膜を無視した場合の境界条件を用い、(1)(2)の非線形連立微分方程式を一回積分すると、次式に示す基質除去フラックスが得られる。

$$Na(S^*, C^*) = D_{SF} \frac{dS}{dx} \Big|_{x=0} = \left[2 D_{SF} V_{SMAX} X_V \left\{ S^* - S_e + \frac{a-b}{2} \ln \left| \frac{S^{*2} + b S^* + d}{S_e^2 + b S_e + d} \right| + \frac{2d+b(a-b)}{2\sqrt{b^2-4d}} \ln \left(\frac{2S^*+b+\sqrt{b^2-4d}}{2S_e+b+\sqrt{b^2-4d}} \right) \left| \frac{S_e^2+bS_e+d}{S^{*2}+bS^*+d} \right| \right\} \right]^{1/2} \quad (6)$$

但し、 $S^* < f C^*$ の場合、 $S_e = 0$ ここで、 $S_e = S^* - f C^*$ $f = D_{CF} / (\alpha D_{SF})$

$$a = f C^* - S^*, \quad b = f K_2 + K_1 + f C^* - S^*, \quad d = K_1 (f K_2 + f C^* - S^*)$$

液境膜を考慮する場合は、(6)式の S^* を S_s に変換し、(3)式の境界条件を連立させ、trial and

error によって S_s を求め、この値を用い基質除去フラックスを計算することが可能である。

（回分実験系におけるモデル） 生物膜中の Fe^{2+} 、 DO の分布は、回分実験のような非定常の場合は時間的に変化するものと考えられるが、回分実験の濃度変化が分のオーダーで変化する場合は、簡易的に定常に達しているものと考えられる。そこで、回分実験系の Fe^{2+} 、 DO の変化を次式で表すものとする。

$$V \frac{dS^*}{dt} = -A N a (S^*, C^*)$$

$$V \frac{dC^*}{dt} = -\alpha A N a (S^*, C^*) + K L A (C_{SA} - C^*)$$

4. 実験結果と考察：（図-1）は、連続状態で馴致した生物膜の回分実験を示したものであり点が実験値、実線が平面性を仮定した生物膜のシミュレーション値である。実験値とシミュレーション値とで Fe^{2+} の減少勾配に差があり、その比は1.59となった。（図-2）の実線は、シミュレーションで用いた生物膜の表面積を1.59倍したもので Fe^{2+} と DO の変化を示している。 Fe^{2+} の変化は勾配が減少するところで実験値との不一致が生じ、またその付近の DO の変化も同じことがいえる。モデルに使用したパラメータおよびモデル自体の見直しが必要と思われる。（図-3）は、生物膜表面の接写写真であり、表面の凹凸が激しいことがわかる。（図-4）（図-5）は、アダム図化機によって生物膜表面の槽内円周方向（X方向）と槽内鉛直方向（Y方向）の縦断曲線を測定したものである。縦断曲線と直線との比は、X方向、Y方向それぞれ1.7~2.0, 1.6~2.3となった。この比が面積の増分比となることは、線と面すなわち2次元と3次元の違いからいえないが、概略的な値として目安になると考えられる。（図-3）のシミュレーションで述べた面積増分比を1.59としてあるが、この値は（図-4）（図-5）で測定した1.6~2.3に比べ小さい値となっている。これは、面積増分比だけでなく液境膜の影響を考えれば、両者の値はより近くなるものと考えられる。（図-6）は（図-4）（図-5）の凹凸のスペクトルを示したものである。X方向およびY方向のスペクトルはほぼ同じ傾向を示している。今後スペクトルの違いによる基質除去フラックスを、膜表面の凹凸を考慮した2次元微生物膜モデルによって理論的に考察してみる必要がある。

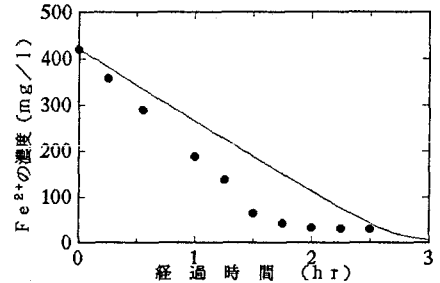


図-1 生物膜の回分実験値とシミュレーション値

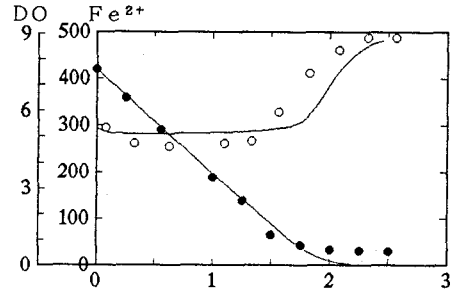


図-2 面積増分比を1.59とした場合のシミュレーション値と実験値

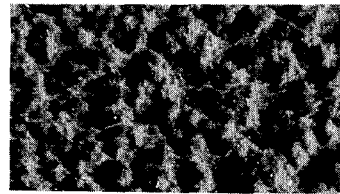


図-3 生物膜表面の接写写真

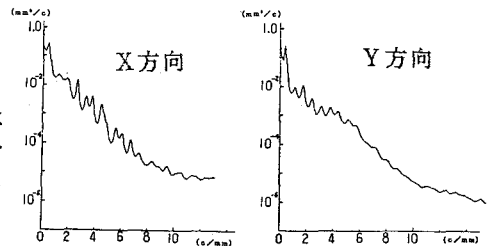


図-6 生物膜表面の凹凸のスペクトル

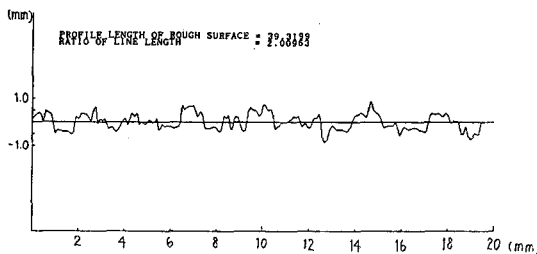


図-4 X方向の縦断プロファイル

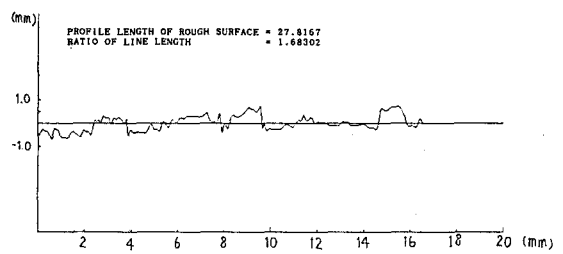


図-5 Y方向の縦断プロファイル