

II-363

簡易生物膜モデルによる生物膜の硝化活性の評価

茨城大学工学部 ○古米 弘明

1. はじめに

生物膜処理プロセスを評価するために、生物膜内の構造や形成過程を明らかにする必要があるが、それらを直接的に測定・観察することは非常に困難なため、数学モデルによる評価や検討^{1)~3)}が行われている。多種の微生物からなる生物膜モデルによって、膜表面には増殖速度が大きな微生物が生息し、内部には死滅菌体を含め増殖速度の低い微生物が存在することが予測されてきている³⁾。著者ら⁴⁾も、嫌気性流動床内の微生物活性の測定結果から、同様な分布を推論した。本研究では、従属栄養菌と硝化菌が存在する生物膜を対象にして、物質輸送抵抗や微生物分布とともに、生物膜表層部における連続的な剥離(Erosion)をも考慮した簡易な生物膜モデルを構築し、定常状態における生物膜の硝化活性の安定性を評価することを試みた。

2. モデルの概要

Fig. 1a)に示すように、微生物分布を層状に仮想した生物膜を考え、増殖あるいは生産速度の大きさ順に、表層から従属栄養菌、硝化菌、不活性バイオマスの層を想定した。すなわち、第1層ではCODの消費が、 NH_4^+ は、第1層で従属栄養菌の細胞合成に利用され、第2層で硝化により消費される。Fig. 1b)に、表層での剥離状況の概念図を示した。ある膜厚($L_c=30\mu\text{m}$ 暫定値)で大部分の剥離が起り、その比剥離速度は膜表面から直線的に減少し、 L_c において基礎的な比剥離速度($0.01[\text{day}^{-1}]$)になると仮定した。

物質収支式をTable1に、速度式をTable2に示した。各層ごとに均一な濃度を持つとして、反応速度式を定義して物質収支を考えた。物質輸送を表現する際に、各膜厚をそれに隣合う層間の拡散距離として用いた。例えば、拡散層から硝化菌の層への拡散距離は、従属栄養菌層厚とした。なお、微生物代謝産物(SMP)の生産および分解⁵⁾も考慮している。数値実験の処理操作条件は、 $\text{HRT}=0.25[\text{days}]$ 、流入 $\text{COD}=20,200,400[\text{mg/l}]$ 、流入 $\text{NH}_4^+-\text{N}=20[\text{mg/l}]$ 、 $\text{DO}_s=8.3[\text{mg/l}]$ とした。また、溶存酸素の影響を調べるために、 K_{La} として2段階に与えた。動力学定数については、既報⁵⁾と同じ値を用いた。

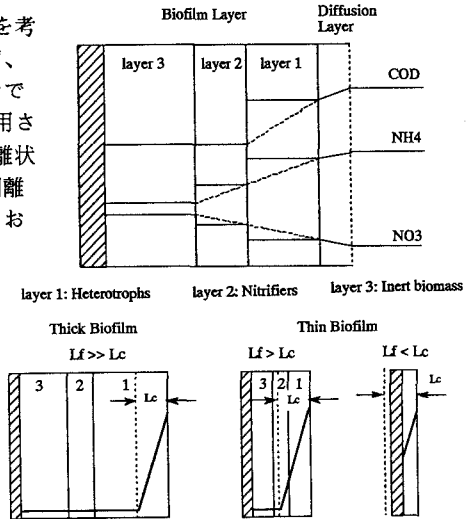


Fig. 1 Conceptual Basis for the simplified biofilm Model
Lc: Critical thickness of biofilm layer with high detachment rate

Table 1 Mass Balance Equations

Biomass	
$\frac{dX_h}{dt} = Y_h M_h X_h + Y_p R_3 X_h - b_h X_h - (1/Y_h) R_{2h} X_h$, X_h = Heterotrophs	
$\frac{dX_n}{dt} = Y_n M_n X_n - b_n X_n - (1/Y_n) R_{2n} X_n$, X_n = Nitrifiers ($n=ns$ or nb)	
$\frac{dX_i}{dt} = (1 - f_d)(b_h X_h + b_{ns} X_{ns} + b_{nb} X_{nb}) - b_{si} X_i$, X_i = Inert biomass	
Solute	
i) Mass balance between bulk and surface layer of aggregates	
$\frac{dC_0}{dt} = \frac{(C_0^i - C_0)}{\theta} + (R_{c0}) + (R_{p0}) - \frac{D_{01}}{L_{01}}(C_0 - C_1) \frac{A_{01}}{V}$	
ii) Mass balance in the aggregates with pseudo-steady state assumption	
$\frac{dC_1}{dt} = \frac{D_{01}}{L_{01}}(C_0 - C_1) \frac{A_{01}}{V} + (R_{c1}) + (R_{p1}) - \frac{D_{12}}{L_{12}}(C_1 - C_2) \frac{A_{12}}{V}$	
$\frac{dC_2}{dt} = \frac{D_{12}}{L_{12}}(C_1 - C_2) \frac{A_{12}}{V} + (R_{c2}) + (R_{p2}) - \frac{D_{23}}{L_{23}}(C_2 - C_3) \frac{A_{23}}{V}$	
$\frac{dC_3}{dt} = \frac{D_{23}}{L_{23}}(C_2 - C_3) \frac{A_{23}}{V} + (R_{c3}) + (R_{p3})$	

Table 2 Rate Expressions of Consumption and Production

layer #	Rc	Rp
<COD>	1: $-M_h X_h$ 2: 0	0 0
< NH_4^+-N >	1: $-Y_n Y_h M_h X_h$ 2: $-M_{ns} X_{ns}$	$Y_n f_d b_h X_h$ $Y_n f_d (b_{ns} X_{ns} + b_{nb} X_{nb})$
< NO_2^--N >	1: 0 2: $-M_{nb} X_{nb}$	0 $(1 - Y_n Y_{ns}) M_{ns} X_{ns}$
< NO_3^--N >	1: 0 2: $(1 - Y_n Y_{nb}) M_{nb} X_{nb}$ 3: $-R_3 X_h$	0 0 0
<SMP>	1: $-R_3 X_h$ 2: 0 3: 0	$R_{1h} X_h + R_2 X_h$ $(R_{1ns} + R_{2ns}) X_{ns} + (R_{1nb} + R_{2nb}) X_{nb}$ $R_{1h} X_h + R_2 X_h$
<Total SMP>	1: 0 2: 0	$(R_{1ns} + R_{2ns}) X_{ns} + (R_{1nb} + R_{2nb}) X_{nb}$

No reaction in the layer 0 and 3.

$M_i = q_{mi} [\text{Sub}_i] [\text{DO}] / (K_{si} + [\text{Sub}_i]) / (K_{oi} + [\text{DO}])$;

$[\text{Sub}_i] = [\text{COD}_i]$, $[\text{NH}_4^+-\text{N}]$, or $[\text{NO}_2^--\text{N}]$

3. 数値計算結果と考察

生物膜表面での比剥離速度を0.01~10[day⁻¹]に変化させた場合の、従属栄養菌(X_h)と硝化菌濃度(X_n)をFig. 2に示した。ただし、ここでの計算は $K_{La}=1500$ [day⁻¹]に設定して、酸素律速の影響を除いた。横軸は、生物膜表層部(高い剥離速度の領域)の平均剥離速度(b_s)の逆数であり、概念としてはSRTに相当する。 X_h は、流入COD=20mg/lの場合を除き、ある b_s より大きい条件で急速に増加する。これは、膜厚が l_c を上回ったために生じる結果であり、内部に剥離から守られた領域の存在と関連している。一方、 X_n は、 X_h の急増に対応して増殖を始めており、流入CODが高いほど低いSRT条件で、硝化菌の存在が予測されている。これは、従属栄養菌の増殖が硝化菌を剥離から保護する可能性を示唆している。この予測結果は、今枝ら⁶⁾の接触エアレーション実験(流入 $NH_4^+-N=50$ mg/l)で確認された、流入BOD濃度の増加(BOD=0~125mg/l)とともに付着アンモニア酸化細菌数が増える傾向と一致している。なお、硝化菌濃度の到達レベルが、流入COD濃度の増加に伴って低下するのは、従属栄養菌による細胞合成へ利用量の増加に伴う硝化量の低下のためである。

従属栄養菌と硝化菌との酸素競合に関連して、流入COD=200mg/l、 $K_{La}=150$ [day⁻¹]で計算を行い、1500[day⁻¹]での結果との比較を行った(参照Fig. 3)。酸素供給の低下に対して、従属栄養菌はほとんど影響がないものの、硝化菌濃度の著しい低下が予測されており、従来報告されてきている傾向を再現可能である。

4. まとめ

本モデルは推論的かつ先験的ではあるが、生物膜特有の物質輸送抵抗や微生物分布を簡易な形で考慮し、浮遊増殖型プロセスとの処理特性の違いの本質を評価できる可能性を有している。また、従属栄養菌と硝化菌との相互作用として、生物膜剥離という新たな側面から検討するためにも示唆的である。今後、生物膜剥離実験や生物膜の硝化活性測定を行い、その結果を用いてモデルの検証・改良を行う予定である。

- 参考文献 1)McCartyら(1981)、Env.Sci.Technol., 15, 40-51
 3)増田ら(1986)、下水道協会誌、23, No. 262, 49-57
 5)古米ら(1991)、土木学会第46回講演概要集、II-161, 362-363

- 2)Wanner and Gujer(1984)、Wat.Sci.Technol., 17, 27-44
 4)今井ら(1992)、衛生工学研究論文集、28, 11-20
 6)今枝ら(1992)、第28回衛生工学研究討論会講演集、71-73

Notations

- A : surface area of the floc or biofilm [L²]
 A_{ij} : surface area between the i th and the j th layers [L²]
 b : decay or maintenance coefficient [T⁻¹]
 b_s : specific detachment rate [T⁻¹]
 B_i : biomass in the i th layer
 C^0 : influent concentration [ML⁻³]
 C_0 : concentration in bulk liquid [ML⁻³]
 C_i : representative concentration in the i th layer [ML⁻³]
 D_{ij} : diffusion coefficient between the i th and the j th layers [L²T⁻¹]
 D_w : diffusion coefficient in water [L²T⁻¹]
 DO_s : saturation concentration of oxygen [ML⁻³]
 f_d : biodegradable fraction of bacterial cell [-]
 k_1 : UAP formation rate constant [MM⁻¹T⁻¹]
 k_2 : BAP formation rate constant [MM⁻¹T⁻¹]
 k_{3m} : multiple substrate degradation rate constant [MM⁻¹T⁻¹]
 K_o : saturation constant for oxygen [ML⁻³]
 K_s : saturation constant for substrate [ML⁻³]
 K_{La} : overall oxygen transfer coefficient [T⁻¹]
 l_0 : thickness of diffusion layer [L]
 l_f : thickness of biofilm [L]

- l_c : critical thickness of biofilm layer with high detachment rate [L]
 l_i : thickness of the i th layer
 l_{ij} : diffusion distance between the i th and the j th layers [L]
 M : specific substrate consumption rate [MM⁻¹T⁻¹]
 P : SMP concentration [ML⁻³]
 P^0 : total of originally formed SMP concentration [ML⁻³]
 q_m : maximum specific substrate consumption rate [MM⁻¹T⁻¹]
 R_1 : specific UAP formation rate = $k_1 M$ [MM⁻¹T⁻¹]
 R_2 : specific BAP formation rate = $k_2 M$ [MM⁻¹T⁻¹]
 R_3 : specific SMP consumption rate = $k_{3m}(P/P^0)$ [MM⁻¹T⁻¹]
 R_{di} : consumption rate in layer i [ML⁻³T⁻¹]
 R_{pi} : production rate in layer i [ML⁻³T⁻¹]
 V : reactor volume [L³]
 X : biomass per reactor volume [ML⁻³]
 X_t : biomass density [ML⁻³]
 Y : growth yield [MM⁻¹]
 Y_p : growth yield associated with SMP consumption [MM⁻¹]
 β : oxygen demand for substrate consumption [MM⁻¹]
 γ_n : nitrogen content in biomass [MM⁻¹]
 γ_s : conversion coefficient of biomass concentration to COD [MM⁻¹]
 μ_m : maximum specific growth rate [T⁻¹]

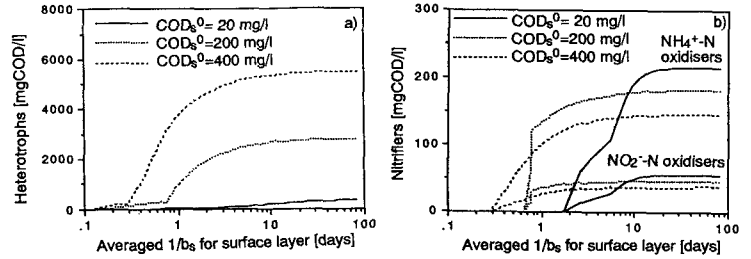


Fig. 2 Effect of influent COD on the biomass hold-ups

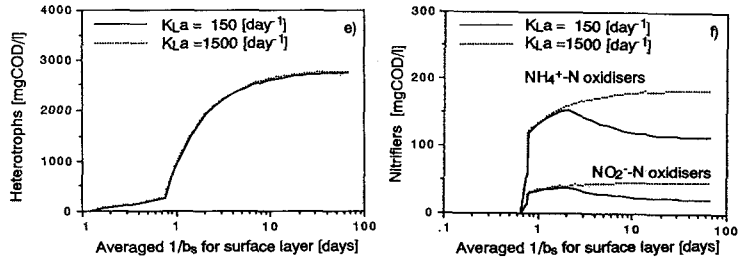


Fig. 3 Effect of oxygen limitation on the biomass hold-ups