

II-PS11 急速ろ過における硝化のシミュレーション

八戸工業大学 正員 福士憲一、佐藤米司

1. はじめに 急速ろ過における低濃度硝化を対象に逆洗をとまなう非定常生物膜モデルを考え、水温や原水濃度の変動に関してシミュレーションと実験の結果を比較検討したので報告する。

2. モデルの概要

(1) 低濃度系のフラックス式¹⁾ 図-1のRittmannのモデルに基づく、フラックス J は次式群で示される。

$$J = -D_b \frac{dS}{dz} = \frac{D_b}{L_d} (S - S_s) \quad (1)$$

$$D_f \frac{d^2 S_f}{dz^2} = \frac{k \cdot X_f \cdot S_f}{K_s + S_f} \quad (2)$$

$$S = S_s \quad (z=0), \quad dS_f/dz = 0 \quad (z=L_f) \quad (3)$$

上式群に一般的な解析解は存在しないが、図-2のような数学的近似解は得られる。低濃度系では生物膜が薄く(図-1のC型)、境膜抵抗も無視してもよいので、

$$\therefore J = k \cdot X_f \cdot L_f \frac{S}{K_s + S} \quad (4)$$

(2) 生物膜の消長式²⁾ Rittmannらと同様に増殖、死滅、流れによるせん断剥離の各項から成る式で考える。

$$\frac{dX_f L_f}{dt} = Y \int \frac{k X_f S_f}{K_s + S_f} dz - b X_f L_f - b_s X_f L_f \quad (5)$$

第1項の積分はフラックス J のことであり、生物密度 X_f を一定とすると次式のようになる。

$$\therefore \frac{dL_f}{dt} = (Yk \frac{S}{K_s + S} - b - b_s) L_f \quad (6)$$

(3) 固定層への適用 1次元流れモデルで、拡散項、移流項、反応項を考えると次式となる。

$$\varepsilon \frac{\partial S}{\partial t} = D_H \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} - v \frac{\partial S}{\partial x} - a \cdot J \quad (7)$$

$$v \cdot S_0 = v \cdot S - D_H \frac{\partial S}{\partial x} \quad (x=0), \quad \frac{\partial S}{\partial x} = 0 \quad (x=1) \quad (8)$$

(4) 逆洗のモデル化 図-3 a, bの2次元の砂層内生物膜厚分布を仮定し、逆洗時のろ材混合により水平方向分布が縦方向に置き代わり、かつ水流により生物膜の一部が剪断剥離すると考える。また、砂層深(i)の各膜厚クラス(j) に対するフラックスの総和と等しいフラックス $J(i)$ に対応する平均膜厚 $\bar{L}_f(i)$ を仮定する。これにより、フラックス式と生物膜消長式は式(4), (6)の形のまま使用でき計算上1次元モデルとして扱える。

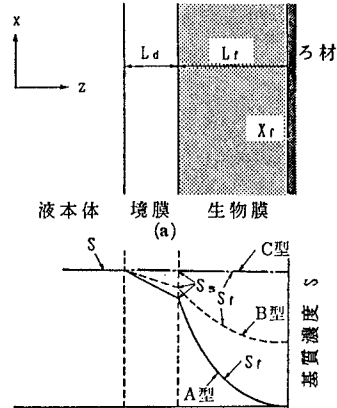


図-1 生物膜モデル

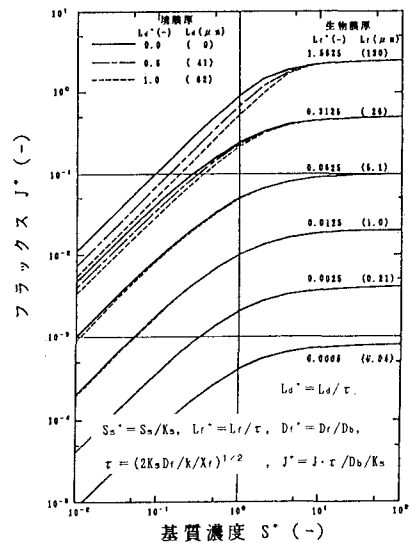


図-2 基質濃度とフラックスの関係(無次元)

	水平方向位置 or 膜厚クラス 1 j N	平均 膜厚	バルク 濃度
1	$L_f(1,1) \dots L_f(1,j) \dots L_f(1,N)$	$\bar{L}_f(1)$	$S(1)$
⋮			
砂層深 i	$L_f(i,1) \dots L_f(i,j) \dots L_f(i,N)$	$\bar{L}_f(i)$	$S(i)$
⋮			
N	$L_f(N,1) \dots L_f(N,j) \dots L_f(N,N)$	$\bar{L}_f(N)$	$S(N)$

図-3 a 逆洗直前の生物膜厚分布(完全混合)

<逆洗直前までは>

$$\frac{dL_f(i, j)}{dt} = \{Yk \frac{S}{K_s + S} - b - b_s\} L_f(i, j) \quad (i, j=1 \sim N) \quad (9)$$

$$J(i) = kX_f \bar{L}_f(i) \frac{S(i)}{K_s + S(i)} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N kX_f L_f(i, j) \frac{S(i)}{K_s + S(i)} \quad (10)$$

<逆洗直後は>

$$L_f(i, j) = (1-w) \bar{L}_f(j) \quad (i=1 \sim N) \quad (11)$$

ここで、 $L_f(i, j)$:任意の砂層深(i), 水平位置(j)における生物膜厚(cm), $\bar{L}_f(i)$:任意の砂層深(i)における平均生物膜厚(cm), $S(i)$:砂層深(i)におけるバルク基質濃度(mg/cm³), N :砂層の分割数, i, j 方向同数, w :逆洗による生物膜流出係数(-), $0 \leq w \leq 1$ であり、初期(第1回目の逆洗時)は w_0 。

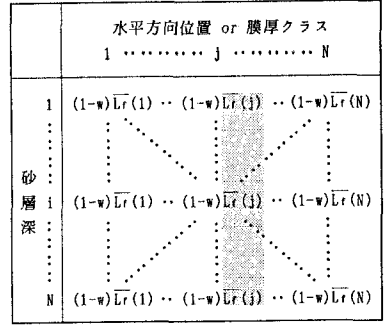


図-3 b 逆洗直後の生物膜厚分布(完全混合)

3. 計算結果と実験結果

(7)式の基礎式に(9)~(11)式を導入して差分による数値計算を行った。計算条件は硝化反応に係わる係数として、 $k=2.5 \text{ day}^{-1}$, $K_s=0.7 \text{ mg/l}$, $b=0.05 \text{ day}^{-1}$ (いずれも20℃で) $b_s=0.005 \text{ day}^{-1}$, $Y=0.39$, $X_f=10 \text{ mg/cm}^3$ とし、温度補正係数は $\theta_k=1.08$, $\theta_{K_s}=1$, $\theta_b=1.06$ とした。砂層と流れの条件としては $l=67 \text{ cm}$, $d_p=0.0772 \text{ cm}$, $\varepsilon=0.43$, $v=100 \text{ m/day}$, $DH=670 \text{ cm}^2/\text{day}$ で、原水濃度 $S_0=0.2 \sim 1.0 \text{ mg-N/l}$, 水温 $2 \sim 20^\circ\text{C}$ の範囲で変化させた。なお、初期生物膜厚 $L_{f0}=0.01 \mu\text{m}$, 砂層の分割数 $N=12$, 時間刻み $\Delta t=30$ 秒, 逆洗による生物膜流出係数 $w_0=0.7$, $w=0.1$ (図-4の場合)または $w_0=0.6$, $w=0.05$ (図-5の場合)とした。

図-4は逆洗のみの影響を検討した結果であり、計算と実験の結果がよく一致している。最初の逆洗で生物膜が剥離し NH_4^+-N がリークするが、逆洗の繰返しにより生物膜が再び全層で厚くなって次第に良好な処理結果となっている。図-5は水温と原水濃度も変動させた結果である。計算と実験の結果は比較的良好に一致している。図より、逆洗をとまなう急速経過で硝化を行った場合、この程度の非定常変動には充分追従できそうなことがわかる。

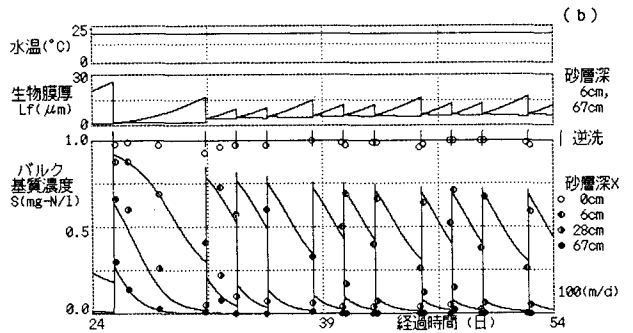


図-4 逆洗の影響

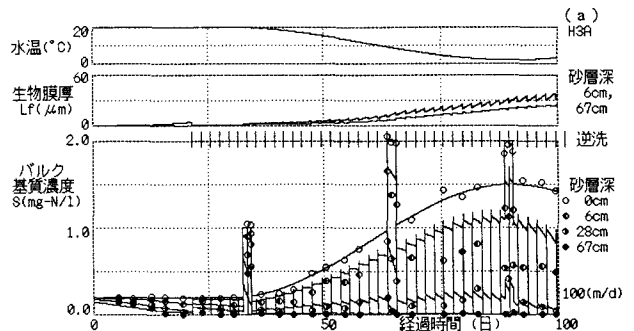


図-5 水温と原水濃度の変動の影響

<参考文献> 1) Rittmann, et. al.; J. ASCE, EE4, 831(1981). 2) Rittmann, et. al.; J. WPCF, 56, 874(1984)

<使用記号> a: ろ層比表面積(cm^{-1}), b: 自己分解係数(day^{-1}), b_s : 剪断剥離係数(day^{-1}), d_p : ろ材径(cm), D_b : 水中での分子拡散係数(cm^2/day), D_r : 生物膜内での分子拡散係数(cm^2/day), D_H : 混合拡散係数(cm^2/day), k: 最大比消費速度(day^{-1}), K_s : Monod飽和定数(mg/cm^3), l: ろ層全長(cm), L_d : 境膜厚(cm), S : バルク基質濃度(mg/cm^3), S_0 : 原水濃度(mg/cm^3), S_f : 生物膜内基質濃度(mg/cm^3), S_s : 生物膜表面基質濃度(mg/cm^3), t: 時間(day), v: ろ速(cm/day), X : ろ層深(cm), X_f : 膜内微生物濃度(mg/cm^3), Y: 収率係数(-), z: 膜表面からの距離(cm), ε : 空隙率