

II-404

深層汚過過程のモデル化

北海道大学工学部 正会員 松井佳彦 正会員 丹保憲仁

1. はじめに

従来より広く受け入れられていた砂層内部の幾何学的形状のみに着目したIves型のモデルを発展させ、フロック物性を考慮した汚過のRandom輸送モデルを提案し、実験的検討を加える。

2. 基礎となる考え方

充填層の物質移動や流れは分散モデルや完全混合モデルで表現される。深層汚過における懸濁粒子の移動過程も同様にマクロに見ると汚層全体としての分散混合とあるスケールのunit内での汚材表面への輸送の2つに分けて考えることができよう。従って、unit内での粒子の汚材表面への輸送率を η 、表面での衝突合一確率を α とすると、unit内での除去率 r は式-1となる。

$$r = \alpha \eta \quad (1)$$

単位汚層長さ当りのみかけの分散混合段数を p とすると、単位長さの除去率 R は式-2で表現される。

$$1-R = (1-r)^p = (1-\alpha \eta)^p \quad (2)$$

一方、深層汚過の除去は式-3のように濃度の長さに対する一次反応の形で一般に表現される。

$$\partial C / \partial L = -\lambda C \quad (3) \quad \text{ここで、} L: \text{汚層長 (cm)、} \lambda: \text{阻止率 (1/cm)}$$

従って阻止率を使って単位汚層長さの除去率を表現すると式-4となる

$$1-R = 1 - \exp(-\lambda) \quad (4)$$

通常、阻止率 $\lambda < 1$ 、みかけの段数 $p > 1$ なので、阻止率 λ は式-5の形で近似される。

$$\lambda = \alpha \eta p \quad (5)$$

3. 関数形の決定

(1)衝突合一確率 α : 汚材と接触したフロックが付着するか剥離するかは、フロックに作用する流体力学的断力 F_1 とフロックと汚材間の付着力 F_2 の大小関係で決定され、それぞれ式-6, 7の形で書かれる。

$$F_1 \propto \mu G d_r^2 \quad (6) \quad F_2 \propto \sigma d_r^2 \quad (7)$$

ここで、 μ : 懸濁液の粘性係数 (g/cm·sec)、 G : 汚層間隙内速度勾配 (1/sec)、 σ : 単位付着面積当りの付着力 (dyn/cm²)、 d_r : フロック径 (cm)

したがって、衝突合一確率 α は F_1 と F_2 の無次元比の関数となる。

$$\alpha = f(F_1/F_2) = f(\mu G / \sigma) \quad (8)$$

汚過の初期では、付着力として砂-フロック間を考えればよいが、汚過が進行するにつれて、付着力はフロック-フロック間を考えるべきで、砂のフロックによる被覆率に応じた α の分配を考えて、後述の粒子のRandom輸送を考え、被覆率の比例配分とした。

図-1は初期阻止率の汚速に対する変化を両対数紙上で示したものである。初期阻止率の場合、汚層内幾何学形状を一定と出来るので、衝突合一確率 α は直接阻止率に、間隙内速度勾配は汚速に比例するので、図-1及びその他の実験データより α の関数形として、式-9を考えた。

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{\mu G}{\sigma}} \quad (9)$$

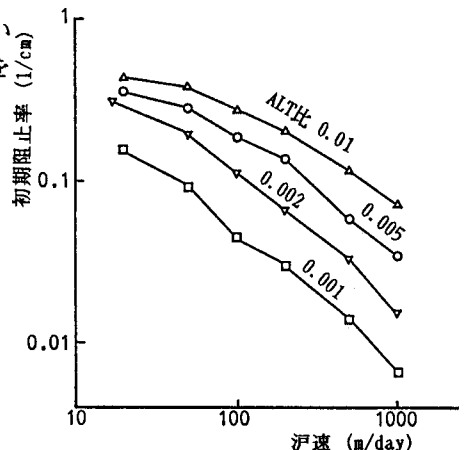


図-1 初期阻止率の汚速に対する変化

(2) 輸送率 η : ある分散混合スケールのunit内での粒子の汙材への輸送率を、仮想的にunit内で分散した粒子が、ある滞留時間内で汙材に到達できる空間の全空間に対する割合で考える。この時、マイクロフロクはBrown運動や重力沈澱による移動はあまり期待できないので、粒子自体の大きさを到達距離と考える。従って、輸送率 η は式-10の形で書かれる。

$$\eta = \frac{1/2 \cdot d_r s}{\epsilon} \quad (10)$$

ここで、 s : 汙層内比表面積 ($\text{cm}^2/\text{cm}^3\text{-bed}$)、 ϵ : 汙層内空隙率 ($\text{cm}^3/\text{cm}^3\text{-bed}$)

(3) 分散混合段数 p : 抑留物が無い汙過初期の状態では、みかけの混合スケールを汙材の大きさに対する割合 γ で表すことができる。

$$p_0 = \frac{1}{\gamma D} = \frac{2}{P_{00}} \cdot \frac{1}{D} \quad (11)$$

ここで、 D : 汙材径 (cm)、 p_0 : 汙過初期の分散混合段数 ($1/\text{cm}$)、 P_{00} : 初期汙層の汙材径基準のペクレ数 (-)

抑留が進行するにつれ、汙材間の架橋が生じ、混合スケールは抑留の前期では急速に増加すると考えられる。しかしながら流路が完成し、細水路が次第に閉塞に向かって進行していく汙過後期では、混合スケールは一定値に近づくと考えられる。この変化過程を式-12のように、比抑留体積 σ_v の実験関数として表現することとした。

$$p = \frac{1}{\gamma D} \{a + (1-a)(1 - \sigma_v/\epsilon_0)^b\} \quad (12)$$

式-12中の未知数 γ は清澄汙層のトレーサー応答実験より、 a 、 b は抑留の進行に伴うペクレ数の変化を汙層のトレーサー応答実験結果より非線形最小2乗法より求めた。

4. 汙過実験によるモデルの検証

図-2にカオリン濃度 5mg/l 、ALT比0.2の場合、図-3に色度20度、硫酸アルミニウム 0.6mg as Al/l の場合の直接汙過実験の結果と前記モデルによるシミュレーション結果を示す。シミュレーションに際しては、前述の式群の他に、物質収支式、Kozey-Carmanの損失水頭式、Ive s型の汙材形状変化式、抑留物の質量と体積を関連づける抑留物密度式、汙層内平均速度勾配式、必要に応じて汙層内フロク形成式を連立して前進形差分法で解いた。

5. まとめ

汙層内におけるフロクの輸送をマクロなRandom輸送過程と考え、粒状層汙過過程の数式モデル化を試み、実験結果との照合を図った。

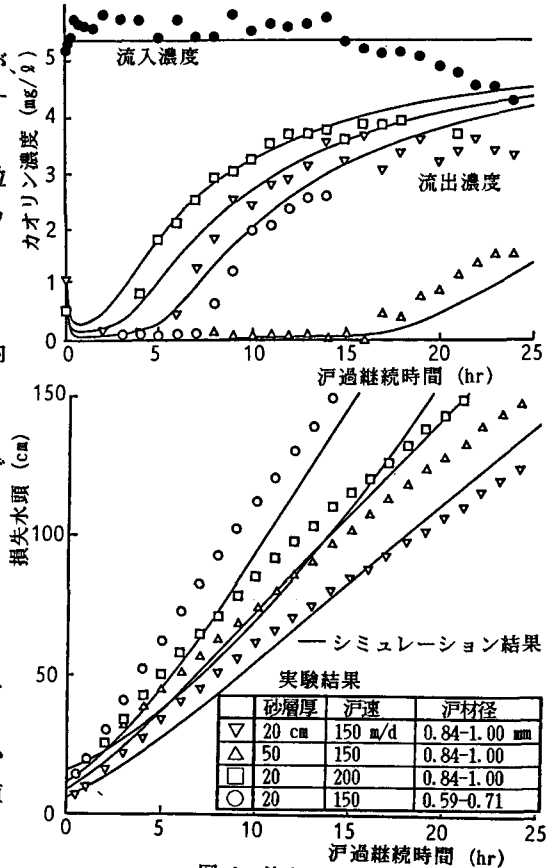


図-2 粘土系汙過

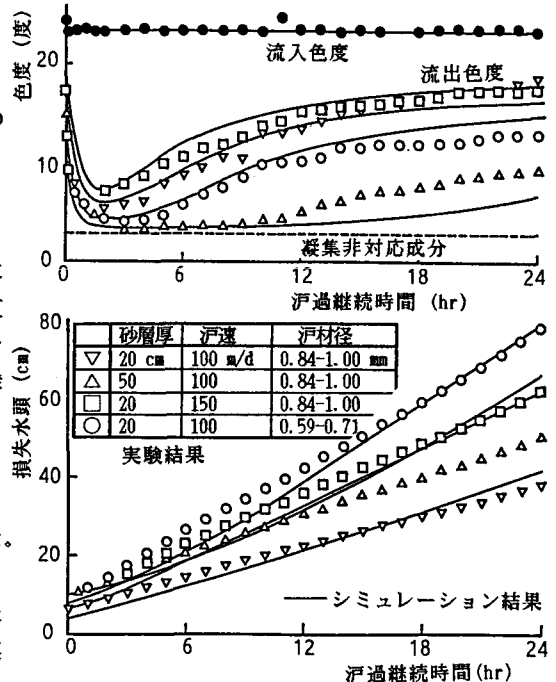


図-3 色度系汙過