

神戸大学工学部 正員 松梨順三郎
神戸大学工学部 正員 石田清一

まづがき 最終沈殿池は曝気槽を経た混合水の固液の分離と活性汚泥の分離という重要な機能をもっている。その規模および構造は完全混合モデルあるいは押出モデルなど、いわゆる理想沈殿状態を想定して解析され、下水道施設基準に定められている。しかし、実状によると、流入下水の特性によってはバルギング現象が発生し、著しい沈殿率の低下をきたしている。対策の第1はSVI値の小さい、沈殿性の汚泥をつくりだすことであるが、本研究ではこうした水処理的な視点からはなれど、沈殿池内の汚泥の沈殿現象と流体力学的な現象とをともえ、現象の数値シミュレーションを実施したのでその大要を報告する。

1. 基礎方程式 神戸市西部処理場の最終沈殿池(長さ44m, 幅12m, 深さ3.3m)を研究の対象とし、簡単のために図-1のように二次元として数値解析のモデルを設定した。まず、流入水量および流入負荷を一定として、汚泥の沈殿池内での拡散輸送に注目する。現象と支配する基礎式をつぎのように設定した。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(fu) + \frac{\partial}{\partial y}(fv) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g \sin \theta - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \epsilon_{11} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \epsilon_{12} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \cos \theta - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \epsilon_{21} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \epsilon_{22} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uC) + \frac{\partial}{\partial y}(vC) = \frac{\partial}{\partial x}(D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(D_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(w_s C) \quad (4)$$

$$\rho = \rho_w + \frac{C}{\gamma_s} (\gamma_s - 1) \quad (5)$$

ここに、 u, v は x, y 方向の流速成分、 p は圧力、 θ は水面勾配、 g は重力加速度、 x, y は空間座標、 t は時間、 C と ρ は汚泥の濃度と密度、 ρ_w は水の密度、 γ_s は汚泥の乾燥比重、 w_s は汚泥粒子の沈降速度、 $\epsilon_{ij} (i, j=1, 2)$ は運動量拡散係数、 D_x, D_y は質量拡散係数とする。汚泥の濃度 C または密度 ρ の時間変化による u, v, p への寄与は微小であるとして本研究ではつぎのように二段階の解析手法をとった。1) 水流の非定常性は非常に弱いのでこれを無視し、第1ステップとして、 $\partial f / \partial t = 0, \partial u / \partial t = 0, \partial v / \partial t = 0$ とし、 $\rho = \rho(x, y)$ は既知関数として、式(1), (2), (3)と未知量 $u(x, y), v(x, y), p(x, y)$ について解く。2) 第1ステップで解いた定常解 $u(x, y), v(x, y)$ と式(4)に代入して C を求め、式(5)によって新しい $\rho(x, y)$ を求める。この手順をくりかえす。この場合、水流および拡散の計算に用いる時間ステップをそれぞれ Δt および Δt_s とし、 $\Delta t = (20 \sim 30) \Delta t_s$ とした。すなわち Δt の間は拡散によって濃度 C 、したがって密度 ρ は変化するが、その定常解 u, v, p への寄与は微小として省略した。

2. 流れの計算 全境界を図-2のように $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \dots + \Gamma_6$ とし、境界条件を Γ で $u = u_0 = 3.570 \text{ m/s}, v = 0, \Gamma_2$ で $u = v = 0, \Gamma_3$ で $u = 0, v = -0.0118 \text{ cm/s}, \Gamma_4$ で $u = v = 0,$

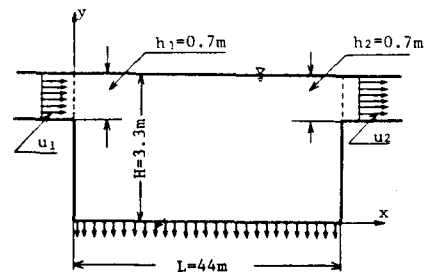


図-1 最終沈殿池モデル

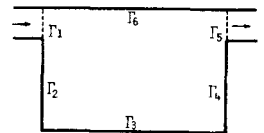


図-2 領域境界

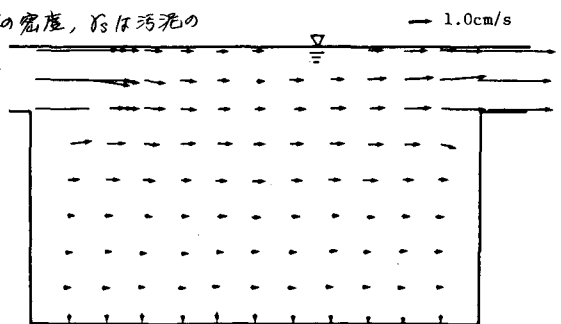
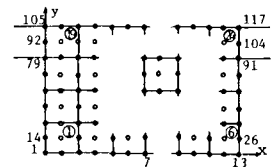
図-3 流況図($p = \text{const}$)

図-4 領域分割図

Γ_2 で $u=u_2=2.82\text{ cm/s}$, $v=0$, Γ_2 で $\partial u/\partial y=0$, $v=0$, $p=0$ とし, 第1ステップとして $p=\text{const}$ として, 流場の定常解と差分法 (ADI法) で求めた. 図-3 はその場合の流況図である.

3. 拡散計算 基礎式は(4)であり, 初期条件として, $t=0$ で $c(z,y)=0$, 境界条件は Γ_1 で $g_n=\hat{g}_n=\nabla n C_1$, Γ_2 で $g_n=\hat{g}_n=-D_n \frac{\partial C}{\partial n}$ + $\nabla n C + \nabla n C$, Γ_3 で $g_n=\hat{g}_n=-D_n \frac{\partial C}{\partial n} + \nabla n C$, $\Gamma_4, \Gamma_5, \Gamma_6$ で $g_n=\hat{g}_n=0$ とし, ガラーキン有限要素法を用いた. 図-4 は領域のラグリランジニ次要素による分割図である. C の近似関数と $C_a = N_\beta C_\beta$ (N_β は形状関数) とし, 式(4)に代入してこれを高次化すると

$$\sum_e \left[\dot{C}_\beta \right]_{Ae} \left[N_\alpha N_\beta \frac{dxdy}{dxdy} + C_\beta \left\{ \left[D_x \frac{\partial N_\alpha}{\partial x} \frac{\partial N_\beta}{\partial x} + D_y \frac{\partial N_\alpha}{\partial y} \frac{\partial N_\beta}{\partial y} - \frac{\partial N_\alpha}{\partial x} N_\beta u \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - \frac{\partial N_\alpha}{\partial y} N_\beta v + \frac{\partial N_\alpha}{\partial y} N_\beta w_0 \right) \frac{dxdy}{dxdy} \right\} \right] - S_\alpha = 0 \quad (5)$$

ニニに, $S_\alpha = - \left[\int_{\Gamma_1} N_\alpha \hat{g}_n d\Gamma + \int_{\Gamma_2} N_\alpha \hat{g}_n d\Gamma \right]$ (6)
 ところで, $D_n(\partial C/\partial n) = l_x D_x(\partial C/\partial x) + l_y D_y(\partial C/\partial y)$, $\nabla n = l_x u + l_y v$, $\nabla n = l_x u - l_y w_0$, $\mathbf{l} = (l_x, l_y)$ は外向単位法線とする. 自然座標系 (ξ, η) に変換し, Gauss-Legendre の数値積分法を適用すると

$$\sum_e \left[\dot{C}_\beta \right]_{i=1}^q \left(N_\alpha N_\beta \det[J] \bar{w} \right)_i + C_\beta \sum_{i=1}^q \left\{ \left(D_x \frac{\partial N_\alpha}{\partial x} \frac{\partial N_\beta}{\partial x} + D_y \frac{\partial N_\alpha}{\partial y} \frac{\partial N_\beta}{\partial y} - \frac{\partial N_\alpha}{\partial x} N_\beta u \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{\partial N_\alpha}{\partial y} N_\beta v + \frac{\partial N_\alpha}{\partial y} N_\beta w_0 \right) \det[J] \bar{w} \right\}_i - S_\alpha = 0 \quad (7)$$

ニニに, $\dot{C}_\beta = \partial C_\beta / \partial t$, $\bar{w}$ は重みであり, $\det[J]$ はヤコビアン行列式である. 時間積分には Crank-Nicholson の陰的差分法を用いた.

4. 汚泥の沈降速度 汚泥を微細土粒子とみなし, 代表土粒子径に対する沈降速度は Stokes により,

$$w_0 = g(\rho_s - \rho) d^2 / (18\mu) \quad (8)$$

G.J. Kynch の理論によると, w_0 は局所の濃度の関数であり,

$$w_0 = kC(C_b - C)/C^2 \quad (9)$$

ニニに, μ は水の粘性係数, d は代表土粒子径, k は係数, C_b は飽和濃度である.

5. 計算結果 $u_1=0.0356\text{ m/s}$, $C_1=1500\text{ ppm}$, $D_x=0.2\text{ m}^2/\text{s}$, $D_y=0.002\text{ m}^2/\text{s}$ とした. 表-1 は計算した各ケースを示す. ケース1は $w_0=0$ とした場合, 図-5, 図-6 は計算開始17分後および100分後の濃度分布を示す. ケース2は式(8)に対応して, $w_0=0.001\text{ m/s}$ とした場合, 図-7, 8, 9 は計算開始33分, 100分, および133分後の濃度分布を示す. ケース3については講義時に発表す.

参考文献 1) 松原順三郎, 神吉和夫, 藤佐明, 最終沈殿池の動態に関する水理学的研究(第一報), 建設工学研究所報, No. 23, 1981, 11, 2) G.J. Kynch, A Theory of Sedimentation, Transaction of the Faraday Society, Vol. 48, 1952.

表-1 計算条件

ケース	u m/s	v m/s	w_0 m/s	$\int_{\Gamma_1} \hat{g}_n d\Gamma$	$\int_{\Gamma_2} \hat{g}_n d\Gamma$
1			0		
2	図-3の流況		0.001	$\hat{g}_n = \hat{u}_1 \hat{C}_1$	Δt ずらして既知とし.
3			Kynch		

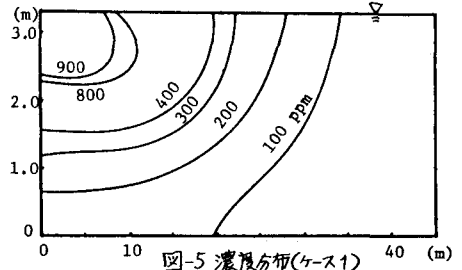


図-5 濃度分布(ケース1) 17分後

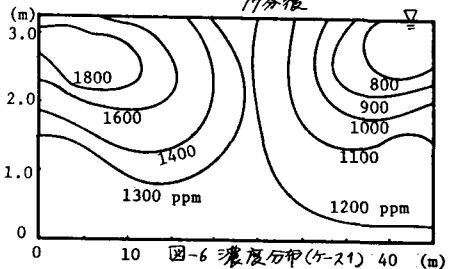


図-6 濃度分布(ケース1) 100分後

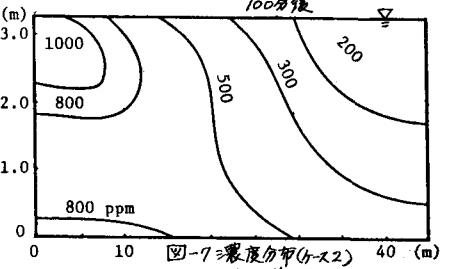


図-7 濃度分布(ケース2) 33分後

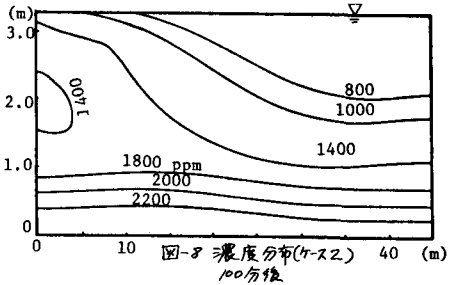


図-8 濃度分布(ケース2) 100分後

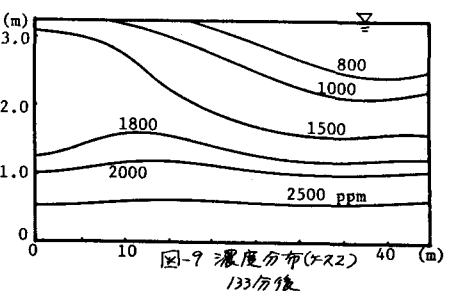


図-9 濃度分布(ケース2) 133分後