

II-181 沈降性粒子および温度に起因する密度流のシミュレーション

武蔵工業大学 学生員 坂口 元保
日本下水道事業団 正員 三上 譲
武蔵工業大学 正員 綾 日出教

1. はじめに

沈降池内の流れは濁質の沈降、移流拡散、および乱流拡散の影響による濁度密度流と、水面上の放吸熱や流入水温の変動による温度密度流のために複雑な流れとなっている。特に温度の影響は顕著であり、低温の流入水の場合、密度流は沈降池底部に発達して沈降物質を巻き上げ、再浮上を誘発する。また、水面付近に死水域を発生させ、実滞留時間の低下により処理水質を悪化させる。高温流入水の場合も水面付近に密度流を発達させ池内の流れを乱す。

本報告では、沈降池内を粘性流れとし2次元非定常解析を行うことで、沈降性粒子および温度に起因する密度流のシミュレーションを行った。

2. 基礎方程式

質量、運動量、エネルギー、および物質の各保存式より導いた基礎方程式を用い、流れ関数-渦度法による解析を行った。基礎方程式である流れ関数式、渦度方程式、温度拡散方程式、および濃度拡散方程式を(1)~(4)式に示す。渦度方程式には浮力項、濃度拡散方程式には粒子沈降速度をそれぞれ導入した。

$$\nabla^2 \psi = -\omega \quad (1)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = \nu \nabla^2 \omega + \frac{\partial F}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \kappa \nabla^2 T \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + (v + v_s) \frac{\partial C}{\partial y} = E \nabla^2 C \quad (4)$$

浮力に関する項は温度について(5)式、濃度について(6)式にそれぞれ示すものである。

$$F_T = \frac{\rho_o - \rho}{\rho_o} g = \beta g (T - T_o) \quad (5)$$

$$F_o = \frac{\rho_o - \rho}{\rho_o} g = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_o} (C - C_o) g \quad (6)$$

但し、 u : x 方向流速、 v : y 方向流速、

ψ : 流れ関数、 ω : 渦度、 ν : 動粘性係数、 T : 温度、

κ : 熱拡散係数、 C : 濃度、 E : 濃度拡散係数、

F : 浮力項($=F_T + F_o$)、 v_s : 沈降速度、 F_T : 温度浮力項、 F_o : 濃度浮力項、 g : 重力加速度、

β : 体積膨張率、 ρ_w : 媒体密度、 ρ_s : 粒子密度、 $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ である。

解析には Fig.1に示す座標系を用いた。(1)~(4)式を Galerkin法により空間方向へ離散化し得られた要素方程式を全要素について重ね合わせ、(7)~(10)式の全体方程式を誘導した。

$$[D]\psi - [M]\omega - \Gamma_2 = 0 \quad (7)$$

$$[M]\dot{\omega} + [A(\psi)]\psi + \nu[D]\omega - F - \Gamma_4 = 0 \quad (8)$$

$$[M]\dot{T} + [A(\psi)]T + \kappa[D]T - \Gamma_6 - \Gamma_7(T) = 0 \quad (9)$$

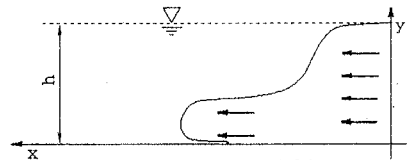
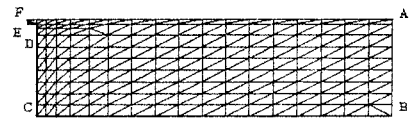


Fig.1 解析の座標

$$\text{EF間: } \frac{\partial \psi}{\partial n} = 0, \omega = 0, \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \frac{\partial C}{\partial n} = 0$$

$$\text{FA間: } \psi = 0, \omega = 0, \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha(T - T_{air}), \frac{\partial C}{\partial n} = 0$$



$$\text{AB間: } \psi = yu, \omega = 0, T = T_{in}, C = C_{in}$$

$$\text{BC, CD, DE間: } \psi = \psi_o, \omega = \omega_o, \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \frac{\partial C}{\partial n} = 0$$

Fig.2 要素分割および境界条件

$$[M]C + [K^*]uC + [K^*]v^*C + E[D]C + \Gamma_9 = 0 \quad (10)$$

ここに、 $[D]$ 、 $[M]$ 、 $[A]$ 、 $[K^*]$ 、 $[K^*]$ ：全体行列、 Γ_2 、 Γ_4 、 Γ_6 、 Γ_9 ：自然境界条件を導入する項、 Γ_7 ：放吸熱条件を導入する項、 F ：浮力項、 $\dot{\omega}$ 、 $\dot{T}$ 、 $\dot{C}$ ：時間微分、および $v^* = v + v_s$ である。

時間に関する離散化はパーソナルコンピュータでの高速化を考慮し、左辺係数行列が対称で陰的スキームの性質を持つ準陰的解法を用いた。(11)～(14)式に準陰的スキームを示す。式中の k は計算段階である。

$$[D]\psi^{k+1} = [M]\omega^k - \Gamma_2^{k+1} \quad (11)$$

$$\frac{[M]\omega^{k+1}}{\Delta t} + \nu[D]\omega^{k+1} = \frac{[M]\omega^k}{\Delta t} - [A(\psi^{k+1})]\omega^k + F^k + \Gamma_4^{k+1} \quad (12)$$

$$\frac{[M]T^{k+1}}{\Delta t} + \chi[D]T^{k+1} = \frac{[M]T^k}{\Delta t} - [A(\psi^{k+1})]T^k + \Gamma_6^{k+1} + \Gamma_7^k(T^k) \quad (13)$$

$$\frac{[M]C^{k+1}}{\Delta t} + E[D]C^{k+1} = \frac{[M]C^k}{\Delta t} - [K^*]u^{k+1}C^k - [K^*]v^{*k+1}C^k + \Gamma_9^k \quad (14)$$

3. 解析条件

解析は実沈澱池を対象に行った。解析領域分割、境界条件をFig.2に示す。 n は法線方向を示す。

解析モデルは水深方向に対し流入流速、領域内温度が一様である粘性流れ場に一定温度、濃度の濁水が連続的に流入するものとした。流れ関数により流れは右から左へ流下するように与えた。流出端は越流堰を想定した。

4. 解析結果

Table 1に示す諸物性値での解析結果を、Fig.3に示す。低温、高濃度の流入水によって底部に密度流が発達し、理論的滞留時間(4時間)内にほぼ定常状態に達した。

Table 1 解析に用いた諸物性値

媒体密度	ρ_w (g/cm ³)	0.9984346
熱伝達係数	α (cm/sec)	0.
熱体積膨張率	β (/°C)	0.00021
粒子比重	G_s	0.999454
粒子径	d_s (cm)	0.1
粒子沈降速度	V_s (cm/sec)	0.0555
流入流速	u_0 (cm/sec)	0.365
流入濃度	C_{in} (mg/l)	80.0
動粘性係数	ν (cm ² /sec)	0.01
熱拡散係数	χ (cm ² /sec)	0.0014
濃度拡散係数	E (cm ² /sec)	0.
流入水温	T_{in} (°C)	18.5
初期槽内水温	T_0 (°C)	19.0

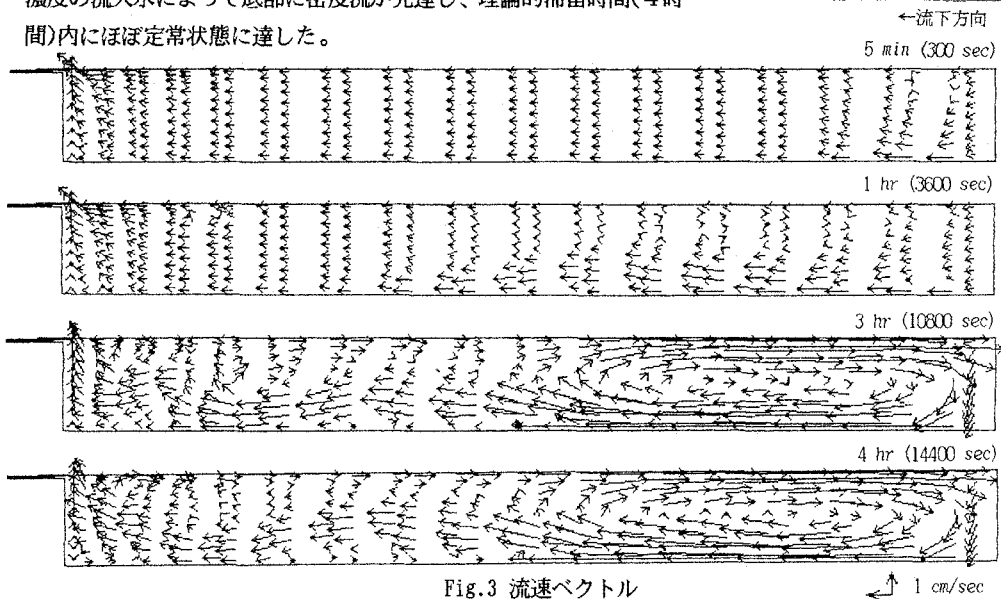


Fig.3 流速ベクトル

5. おわりに

本解析に用いた準陰的解法は非定常時の誤差が大きいことがわかった。陰的解法での高速化が必要である。

参考文献 1) 三上、綾；沈澱池濁度密度流のシミュレーション，第41回全国水道研究発表会，1990