

円形沈殿池における粒子懸濁による密度流

九州工業大学大学院 学生員 ○長田 直己
九州工業大学工学部 正会員 藤崎 一裕

1. はじめに

沈降濃縮は水処理操作の一つとして広く利用されているにもかかわらず、沈殿池内の流れについてはまだ十分には解明されていない。一般に池内の流れは非常に遅いため複雑な流れが生じやすく、その解析も困難である。特に円形沈殿池では、流下に伴い低流速になるために、その流況は非常に不安定で、流入水と池内水との密度差の影響を受けて複雑に変化する。本研究では、流入水と池内水の密度差により生じる密度流について数値解析により検討した。

2. 基礎式

流下(半径)方向に r 軸、水路底から鉛直方向に y 軸をとり、二次元問題として考える。解析に用いる基礎式は次の(1)式で一般化表示される。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(ru\phi)}{\partial r} + \frac{\partial(v\phi)}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\Gamma_\phi}{\rho} \frac{\partial(r\phi)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\Gamma_\phi}{\rho} \frac{\partial\phi}{\partial y} \right) + S_\phi \quad (1)$$

(1)式中の物理量 ϕ 、拡散係数 Γ_ϕ 、生成項 S_ϕ は表 1 に記されている。ここに、表 1 中の(2),(7)式は流体、粒子の保存則、(3),(4)式は r, y 方向の運動方程式、(5),(6)式は乱れエネルギーおよびエネルギー散逸率の輸送方程式である。 u および v はそれぞれ r, y 方向の流速、 c は粒子濃度、 W_0 は粒子沈降速度、 p は圧力、 ρ は流体の密度、 $\Delta\rho$ は粒子と流体の密度差である。またモデル定数については常用されている値を用いた。なおここで、乱れのモデルには通常 $k-\varepsilon$ モデルを用いた。 $k-\varepsilon$ モデルは簡便で流れの状況を比較的良好に再現するために、この種の現象に解析によく用いられている。基礎式は水深 H 、摩擦速度 u_* を用いて無次元化した。ただし、 u_* は流入流速 u_0 の 1/10 の値を用いた。このとき現象を規定するパラメータは次の二つである。 F_{dc} は密度流の代表流速と流入流速からなる密度フルード数である。

$$F_{dc} = \frac{u_0}{\sqrt{\Delta\rho/\rho \cdot c_0 g H}} \quad (8), \quad \bar{W}_0 = W_0/u_* \quad (9)$$

ここに、 u_0 : 流入流速、 $\Delta\rho$: 粒子と流体との密度差、 ρ : 流体の密度、 c_0 : 初期粒子濃度である。なお密度流効果は鉛直方向運動方程式のみで考慮する方法を用いた。

粒子懸濁による密度流の影響を検討するために、密度フルード数 F_{dc} を 0.5, 1.0, 10 と変え計算を行った。計算の方法は、有限体積法により基礎式の離散化を行い、圧力項関連の取り扱いには SIMPLE 法によった。計算にはスタックカード格子配列を利用し、格子数は水平、鉛直とも、20~40 とした。

3. 解析結果

図 1 に池内の流速ベクトルを示す。図中の横軸は r/L で、 $L(= \sqrt{2 \cdot u_0 \cdot H / W_0} - r_0)$ は理想沈殿池において水面に流入した粒子の到達距離である。ここで、 r_0 は原点から計算開始点までの距離である。図 1(a) は流入水と池内水に密度差を生じていない場合で、流れの状況が流入流速と底面摩擦による境界層の発達として形成されると同時に、流下が進むにつれ断面積が増加するために、平均流速が減少していく様子が表れている。図 1(b),(c) は粒子懸濁のため流入水が池内水より重い場合で、粒子懸濁による密度流効果により池内底部に加

表 1 基礎方程式

ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ	No.
1	0	0	(2)
u	μ_e	$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}$	(3)
v	μ_e	$\frac{1}{\rho} \left(-\frac{\partial p}{\partial y} + \Delta\rho g \right)$	(4)
k	$\frac{\mu_e}{\sigma_k}$	$\frac{1}{\rho} \left(G - \rho\varepsilon + \Delta\rho g \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial c}{\partial y} \right)$	(5)
ε	$\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon}$	$\frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho\varepsilon) \right\}$	(6)
c	$\frac{\mu_t}{\sigma_t}$	$\frac{\partial}{\partial y} (W_0 c)$	(7)

ここに、 $\mu_e = \mu + \mu_t$, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$
 $G = 2\mu_t \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right\}$

速が生じている。また、底部の加速に伴い池内上部では逆流が生じている。 F_{dc} が小さい程底部に大きな加速が生じ、上部では大きな逆流が生じている。

図2に渦動粘性係数コンター図を示す。図2(b),(c)の密度流効果がある場合には、池内底部に加速が生じることにより、池内上部は流速が減速され、鉛直方向の速度勾配が増加する。このため、池内上部に大きな乱れが生じる様子が表れている。図2(c)の場合には、流入後の早い段階で水面近傍に大きな乱流拡散が生じている。

図3に粒子濃度コンター図を示す。濃度は初期濃度 c_0 で無次元化されている。図3(a)~(c)に太線で示した相対濃度0.5の等値線に着目すると、 F_{dc} が小さい程、粒子の沈降が流入部で早く進行している。特に図(c)の場合、流入水が重いために、流入直後に池内底部に向かう流れが生じ、粒子がその流れに引きずられるようにして粒子の沈降が進行する。その後は、池内底部に生じた加速により粒子の流下距離は長くなるが、流入直後に粒子の沈降が促進された影響が大きく、粒子の沈降が終了するまでの最終的な流下距離は密度流効果のない図3(a)よりも短くなっている。また、図3(a)の場合、池内底部において粒子の沈降が促進されている様子が表れている。これは、底面摩擦により池内底部が減速され、粒子の沈降が促進されたためだと考えられる。図3(b),(c)の場合には、池内底部が加速されており、底面摩擦による減速が表れる前に粒子の沈降が終了してしまっている。

次に、相対濃度0.1の等値線に着目すると、 F_{dc} が小さい程、粒子の沈降が遅れている。これは、密度流効果により生じた乱流拡散により低濃度域での粒子の沈降が妨げられたためだと考えられる。特に図(c)の場合には、より大きな乱れが生じているために、流入後の早い段階から低濃度域の粒子の沈降が遅れている。

4. まとめ

円形沈殿池において、流入水と池内水の密度差により生じる密度流の影響について数値解析により調べた。密度流効果により生じる流入直後の池内底部への流れは、流入口近傍の粒子群の沈降を促進するが、密度流効果により池内に生じた乱流拡散は、下流における低濃度域での粒子の沈降を妨げる。

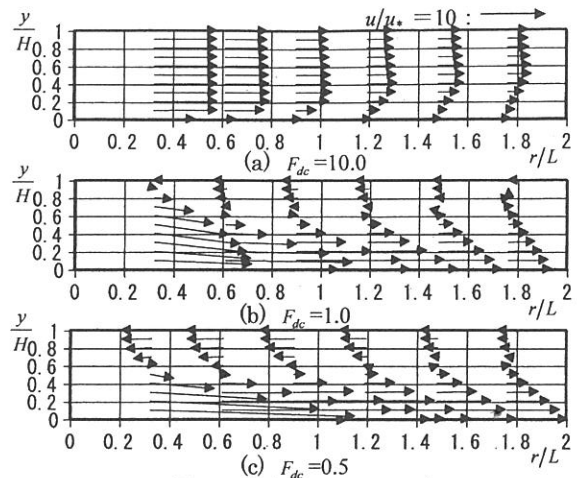


図1 流速ベクトル u/u_*

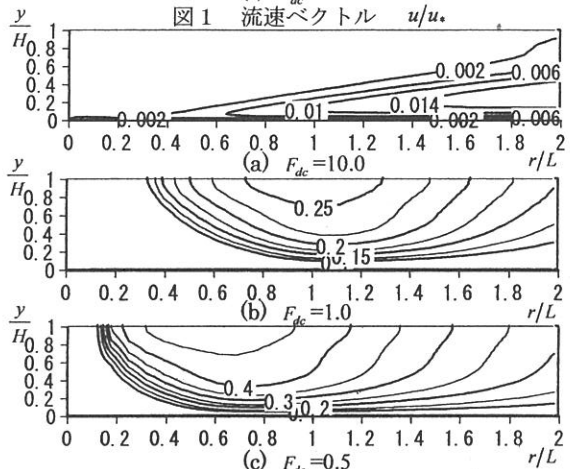


図2 渦動粘性係数コンター μ_e/Hu_*

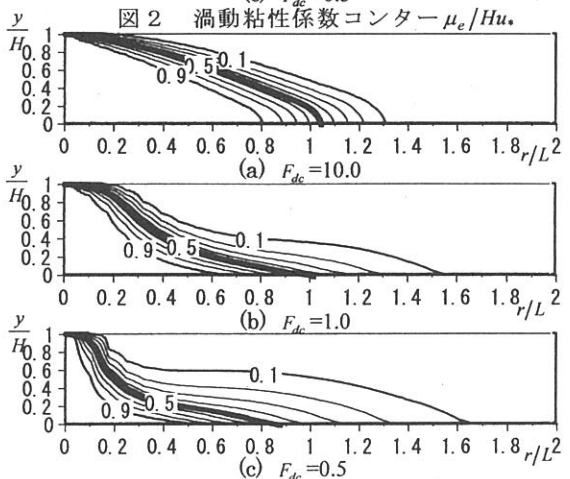


図3 粒子濃度コンター c/c_0