

# 矩形沈殿池における流入口形状の影響

Effect of inlet structure on flow in rectangular settling tank.

藤崎一裕<sup>1</sup>・島田立季<sup>2</sup>・長田直己<sup>3</sup>

Kazuhiro FUJISAKI, Tatsuki SHIMADA and Naoki NAGATA

<sup>1</sup>正会員 工博 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-0015 北九州市戸畑区仙水町1-1)

<sup>2</sup>学生会員 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程 (同上)

<sup>3</sup>学生会員 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程 (同上)

A laboratory experiment and numerical simulations were executed to analyze the flow field in a rectangular settling tank. Special attention is paid to the influence of the inlet structure on the performance of the tank. Two cases were investigated by setting the different aperture height of the inlet wall  $D$ ;  $H/D=3$  and  $H/D=2$ , where  $H$  is the depth of the tank. In the case of  $H/D=3$ , that is relatively lower feed with higher velocity, the flow pattern looks like a shallow settling tank with high inlet velocity, near the inlet zone. While in the case of bottom half feed  $H/D=2$ , the density-affected acceleration becomes predominant when densimetric Froude number is small. This density current enhances the turbulent diffusivity in a tank. It is also shown that the increased turbulent diffusivity decreases the treatment efficiency of finer sediments.

**Key Words :** settling tank, inlet structure, turbidity current,  $k-\epsilon$  model

## 1. まえがき

沈降濃縮操作は、水処理操作の基本的な一つとして広く利用されている。沈殿池の処理効率に影響を及ぼす、形状に関する主な要因としては、流入、流出口の形状、池の長さ、深さ、溢流せきの配置などが挙げられていて、なかでも流出口の形状に関してはその影響に多くの関心を持たれ、これまでも種々の検討がなされている。

これらの研究の多くは実用的観点からの実測、実験を中心としたものであるが、一方では、流体数値解析の手法を応用した研究も多数発表されている。沈殿池内の流れは一般に非常に遅いが、流れのスケールが大きいため乱流状態になり、しかも非常に不安定な流れの場となっている。これらの流れ場の数値シミュレーションを行うことは流体数値解析上重要であり、また実用上からも有益なことであるため、種々の乱れモデルを用いた解析が今日でも報告されている。例えばモデル実験装置を用いて実測を行い、流入条件の相違による池内の乱れの状況を調べたもの<sup>1)~3)</sup>、また現地の実測結果に基づく検討も報告されている<sup>4)</sup>。他方、流入口を下部、中間部、上部などに変化させたときの流況の数値解析についても、多くの研究を挙げることができる<sup>5)~10)</sup>。

これらの研究は数値解析の手法の妥当性、精度の検討に主眼をおいたものが多く、特定の限られた状態の考察が詳しくなされている場合が多い。筆者らの知る範囲では、沈殿池流入口の形状が池内の流況に及ぼす影響について系統的に論じた報告は見当たらない。そこで本研究では、入口形状、特に下端部側からの流入が、池内の流速分布や粒子濃度分布に及ぼす影響について調べた。

具体的にはまず、室内実験で現象を測定し、これを再現する数式モデルを用いて考察を行った。このモデルは、これまでに筆者らが横流式沈殿池の密度流解析に用いたモデル<sup>11)</sup>を応用したものである。沈降のパラメータや密度フルード数が池内の流れに及ぼす影響について、流入口の形状との関係を数値解に基づき考察した。

## 2. 実験

図-1に実験装置の概略を示す。流体の水と粒子の珪砂粉末は上部の水槽で混合され、モデル沈殿池内に一様濃度、一様流速で流入する。この場合、流入口の下部1/3より流入するように設定されている ( $D/H=1/3$ )。また、水路幅は0.1mである。

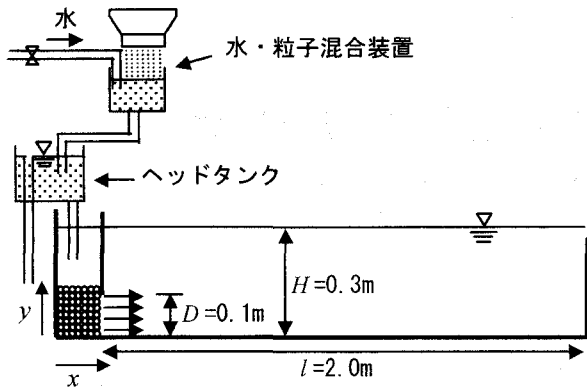


図-1 実験装置

表-1 実験条件

	実験 1	実験 2
容量 $V(\text{cm}^3)$	60000	60000
流入量 $Q(\text{cm}^3/\text{s})$	600	600
理想滞留時間 $V/Q(\text{sec})$	100	100 </td
表面負荷率 $Q/A(\text{cm}/\text{min})$	18	18
沈降速度 $w_0(\text{cm}/\text{s})$	0	0.75
流入粒子濃度(%)	0	0.06

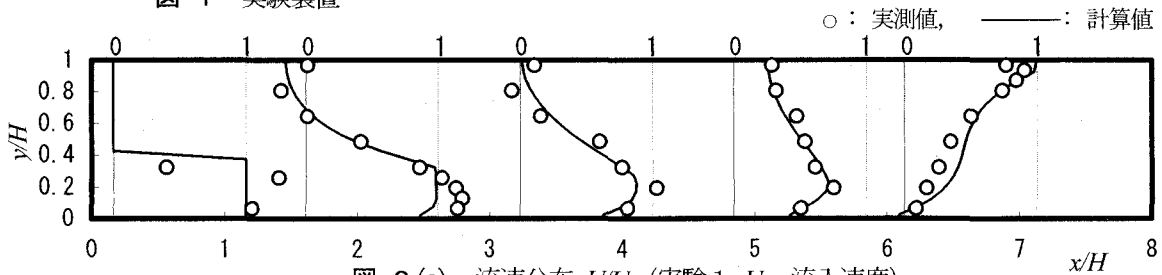


図-2 (a) 流速分布  $U/U_i$  (実験 1,  $U_i$ : 流入速度)

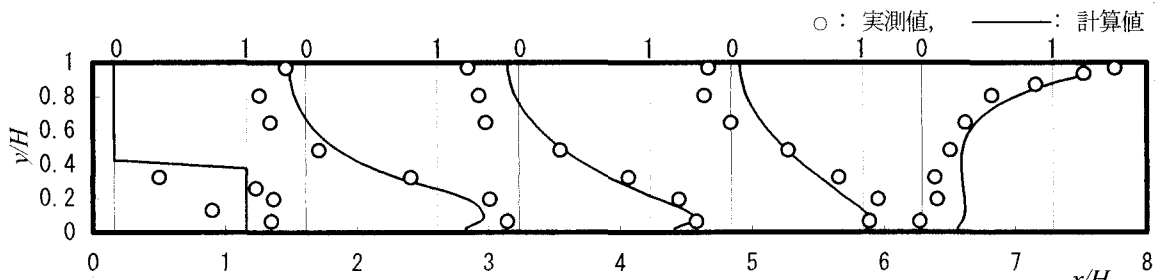


図-2 (b) 流速分布  $U/U_i$  (実験 2)

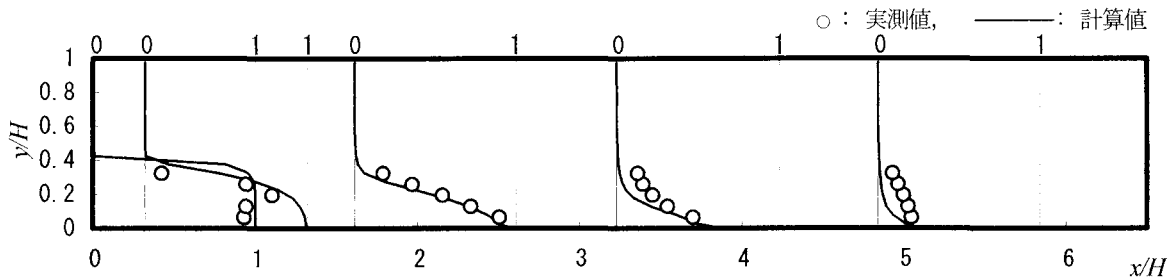


図-2 (c) 粒子濃度分布  $c/c_0$  (実験 2,  $c_0$ : 流入粒子濃度)

実験条件の詳細は表-1 に示されている。流速分布は電磁流速計(プローブ寸法:  $\phi 4 \times L18\text{mm}$ )で、粒子濃度は懸濁水を直接採取した後(一測点あたり 200cc)、乾燥秤量して求めた。

実験の結果が図-2 (a) ~ 2 (c) に示されている。プロットした点が測定値で、実線は後述する手法で求めた計算値である。データはいずれも流入口での値で無次元化されている。

図-2 (a) は粒子を懸濁していない場合の流速分布を示す。粒子を含む場合、図-2 (b) と比べると図-2 (b) の方に密度流による底部の加速が認められる。これは、池内平均流速の密度フルード数が 1 以下であることから妥当な結果であると考えられる。これらの図には、本研究で対象とした現象の概略が表れていて、流下に伴う流速

分布の変化の概略を知ることができる。まず、流入による底部の加速のため水面近傍に逆流域が生じ、沈降の進行に伴い加速域は減衰して、出口近傍では逆に水表面が越流堰の影響で加速されている。なお、本研究では流入口の状況に着目し、流出口の影響については検討していない。

### 3. 数値解析

#### (1) 基礎方程式および計算方法

現象の状況を一般的に論じるため数式によるシミュレーションを行う。解析に用いる基礎式は次の(1)式で一般化表示される。

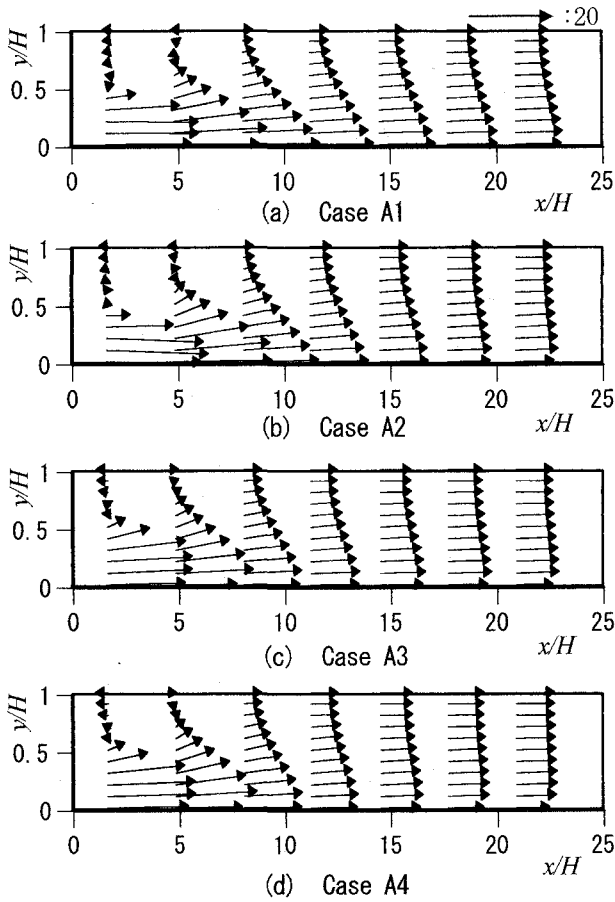


図-3 流速ベクトル  $U/u_*$

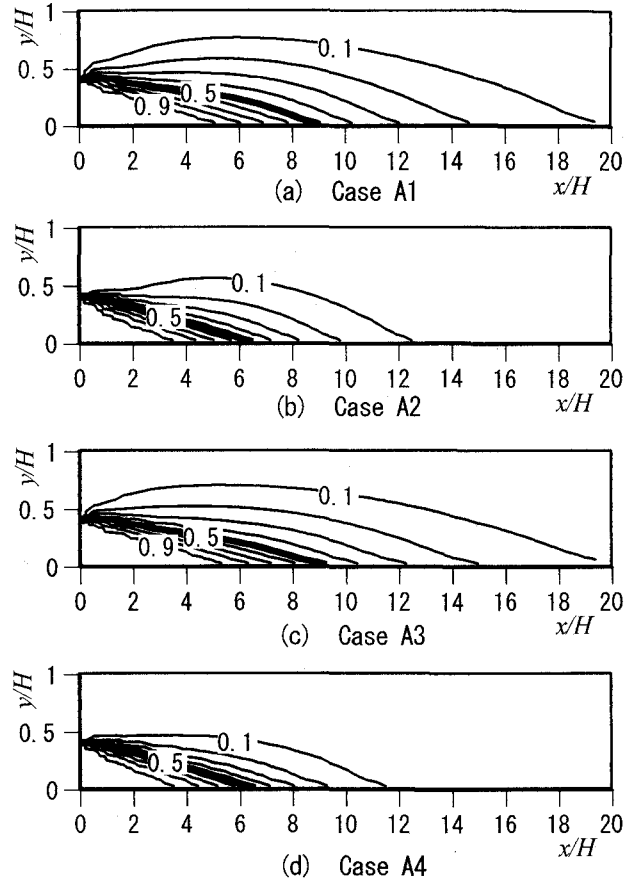


図-4 粒子濃度コンター  $c/c_0$

$$\frac{\partial(U\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(V\phi)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\Gamma_\phi}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\Gamma_\phi}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi \quad (1)$$

ここに  $x, y$  はそれぞれ流下、鉛直方向座標、 $U, V$  は  $x, y$  方向流速で  $\Gamma_\phi$  は拡散係数、 $S_\phi$  は生成項である。物理量  $\phi$  に  $U, V, k, \epsilon, c$  をそれぞれ代入することにより流体質量、運動量をはじめ、その他の物理量それぞれについての保存則が導かれる。なおここで乱れのモデルには通常  $k-\epsilon$  モデルを用いた。  $k-\epsilon$  モデルは簡便で流れの状況を比較的よく再現するために、この種の現象の解析によく用いられている<sup>5), 8), 11)</sup>。なお、基礎方程式において密度流効果は鉛直方向の運動方程式にのみ取り込まれている。この種の現象の取り扱いにおいて厳密には、 $k, \epsilon$  方程式中にも重力の影響を取り込むべきである。しかし本報で取り扱ったような非常に遅い流れにおける  $k, \epsilon$  方程式中の重力項の取り扱いについてはまだ結論が得られていない状態である。したがって、本報では、多くの研究者の例にならってこのような取り扱いをした<sup>12), 13)</sup>。基礎式は水深  $H$ 、摩擦速度  $u_*$  を用いて無次元化した。また現象を規定するパラメータとして、慣用に従って次の二つを用いた。

$$F_{dc} = \frac{U_0}{\sqrt{\Delta\rho/\rho_0 \cdot c_0 gH}} \quad (2), \quad \overline{W_0} = \frac{W_0}{u_*} \quad (3)$$

表-2 計算条件

		$D/H$	$F_{dc}$	$F_{dci}$	$\overline{W_0}$
A	CaseA1	1/3	0.5	2.6	0.5
	CaseA2		0.5	2.6	1.0
	CaseA3		1.0	5.2	0.5
	CaseA4		1.0	5.2	1.0
B	CaseB1	1/2	0.5	2.6	0.5
	CaseB2		0.5	2.6	1.0
	CaseB3		1.0	5.2	0.5
	CaseB4		1.0	5.2	1.0

ここに、 $U_0$ : 池内平均流速、 $\Delta\rho$ : 粒子と流体との密度差、 $\rho$ : 流体の密度、 $c_0$ : 基準粒子濃度である。

また、流入口フルード数  $F_{dci}$  は次式で与えられる。

$$F_{dci} = \frac{U_i}{\sqrt{\Delta\rho/\rho_0 \cdot c_i gD}} \quad (4)$$

添字  $i$  は流入口の値を意味する。

池内の流動現象は流入口近傍では(4)式の  $F_{dci}$  で与えられる挙動をとり、流下とともに(2)式で与えられる  $F_{dc}$  で規定される挙動に移行する。

計算の方法は、有限体積法により基礎式の離散化を行い、圧力項関連の扱いは SIMPLE 法によった。計算

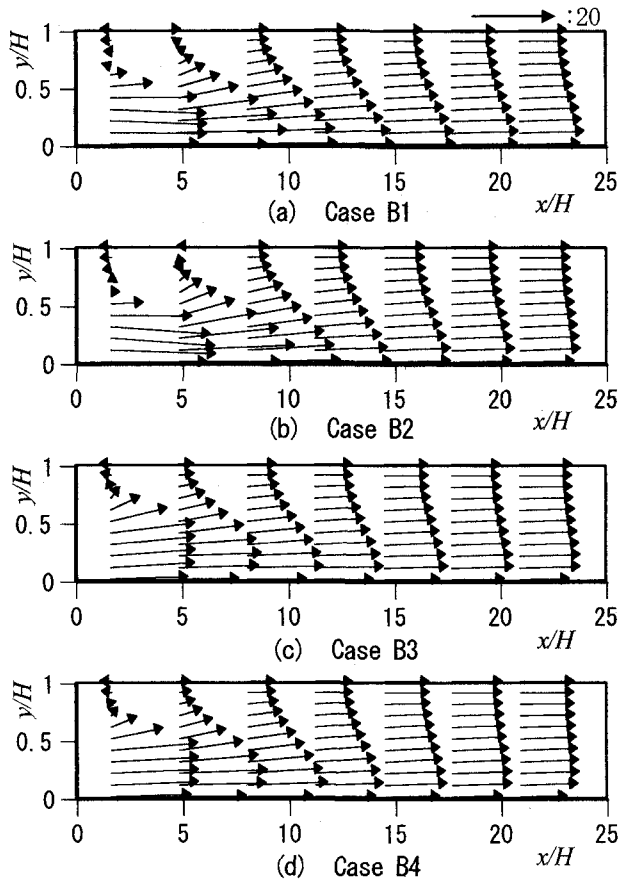


図-5 流速ベクトル  $U/u_*$

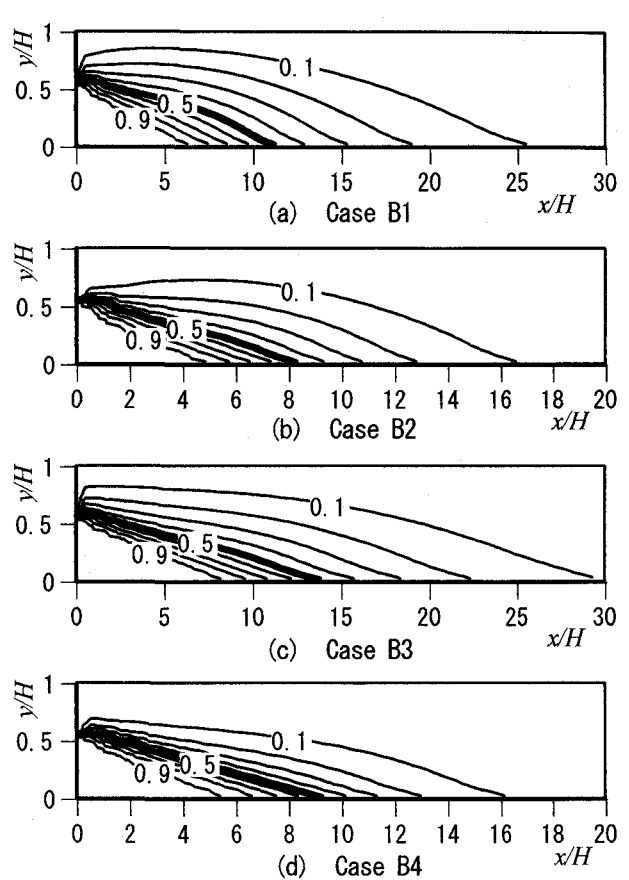


図-6 粒子濃度コンター  $c/c_0$

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。具体的な計算手法は前報<sup>11)</sup>と同様である。

## (2) 計算結果と考察

実験条件を用いて数値計算を行った結果が、図-2 (a)~2 (c) 中に実線で示されている。これらの図によると、計算値は満足できる程度に実験値を再現しており、数式モデルの有用性は確かめられたといえる。

流入口の影響に関する計算は底部より、1/3(Case A), 1/2(Case B) の高さで流入する場合について行った。このときの計算条件が表-2にまとめられている。図-3~4に Case A1~A4 の場合の流速分布と粒子濃度分布を示す。

一般に一様流入の横流式沈殿池の場合には、粒子沈降速度  $\bar{W}_0$ 、流入流速  $U$ 、流入部の水深  $D$  (この場合流入口の高さ) が与えられると、最上部に流入した粒子の流下距離  $L$  は理想状態の場合、overflow rate の理論にしたがって次のように与えられる。

$$L = \frac{D}{W_0} \cdot U \quad (5)$$

部分流入の場合にも、流入口が縮小した分だけ流入流速が増すことを考慮すると、現象の概略の検討に(5)式

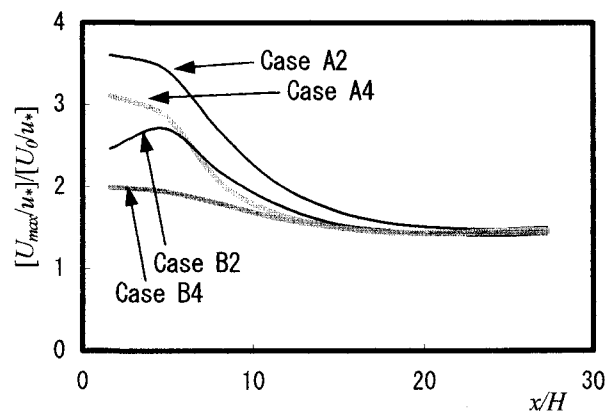


図-7 最大主流速の流下方向変化

が利用できる。表-2より Case A1, A3 および A2, A4 の場合の  $L/H$  の値はそれぞれ13.3および6.7となり、また、B1, B3 および B2, B4 の場合は20および10となる。このことを考慮して計算結果を比較すると、 $F_{dk}$  が小さい Case B1, B2 の方が沈降が促進されている。また同じ  $F_{dk}$  の場合を比較すると、 $\bar{W}_0$  が大きい方が相対的に流下距離が長くなっている。これは、 $\bar{W}_0$  が大きく、比較的短い流下距離で (すなわち懸濁部の流速変化が少ない部分で) 沈降が終了するために、底面摩擦の影響を受けることが少ないためと考えられる。

また今回の計算では、A1 と A3, A2 と A4 を比較すると密度流による加速現象は認められるものの、 $F_{dk}$  の値があまり小さくないために密度流効果は顕著には表れて

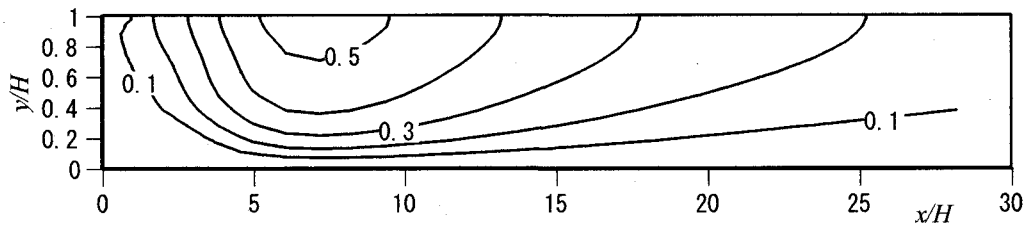


図-8 (a) 渦動拡散係数コンター  $v_e/Hu_*$  (Case A2)

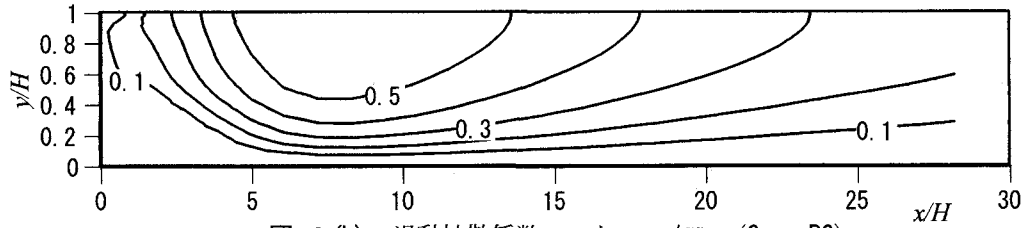


図-8 (b) 渦動拡散係数コンター  $v_e/Hu_*$  (Case B2)

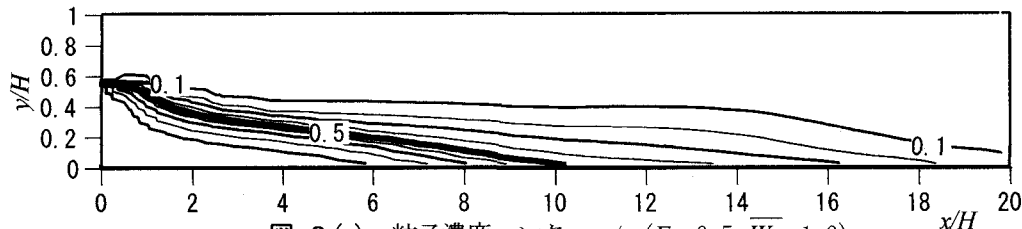


図-9 (a) 粒子濃度コンター  $c/c_0$  ( $F_{dk}=0.5, \overline{W_0}=1.0$ )

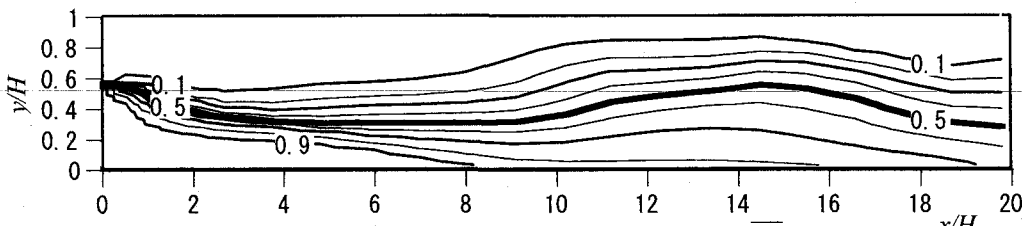


図-9 (b) 粒子濃度コンター  $c/c_0$  ( $F_{dk}=0.5, \overline{W_0}=0.5$ )

いない。これは、一様流入の場合には、 $F_{dk}=0.5$  程度でかなりの密度流効果が表れるが<sup>11)</sup>、部分流入の場合には、流入流速が増す分だけ(4)式の  $F_{dk}$  で流れが支配される部分が多く、慣性力の効果が強くなるためであろう。

次に水深の半分の深さから流入する Case B の場合について考える。Case B1, B2は、B3, B4に比べて、懸濁部の加速が大きく生じていて、 $F_{dk}$  の差による密度流効果の違いが表れている。またこの現象は Case A に比べて、より明白に生じている。これは下半分流入の方が流入水が全エネルギーの中で位置エネルギーとして有している比率が大きいことにも関係していると推定される<sup>14)</sup>。

図-7に水平方向流速の最大値の流下方向変化を示した。縦軸は池内の平均流速  $U_0$  で基準化されている。 $H/D=2$  の場合には、密度流効果のため  $x/H=5$  の近くで水平流速が流入流速の1.3倍程度にまで加速された後に、徐々に池内の等流状態時の最大流速に移っている。

一方、流入流速がはやい  $H/D=3$  の場合には、流入流速よりはやくなる部分はないが、密度流効果のため流入口近くで、流速の減少の程度が小さくなっている。沈殿池

底部に高速部分が生じると沈降粒子の再浮上の可能性が生じる。また、大きな速度勾配は池内の乱流拡散を増大させる。一般に沈殿池内の乱れは沈降を妨げるように作用し、好ましくない。しかし他方、池内入口近くにおける適度な乱れは、粒子の凝集を進め、沈降を促進するという報告もある<sup>3)</sup>。

このような事項に対する検討のために、池内の拡散係数の分布を図-8に示した。図によると密度流が最大値をとる流下距離の前後で、拡散係数は特に大きな値を示している。また密度流効果がより顕著に表れているCase B2の方が、大きな渦動拡散係数の値を有する部分が多い。

図-9は微細粒子（この場合は  $1/2$  の沈降速度の粒子）の濃度分布を調べた例である。沈殿池内に懸濁する粒子はすべて同一のサイズではなく、常に分布を有しており、このことを考慮して解析をする必要性も指摘されている<sup>15)</sup>。図-9に示されているように沈降速度が  $1/2$  になっただけで粒子の沈降除去効果は極端に落ちている。このようなことは流出水の濁質濃度の増加をもたらすことになり、特に避けなければならない。

したがって密度流による加速や、部分流入により大きな高速部が発生するような場合に関して、乱れが微細粒子の沈降に及ぼす影響について今後さらに詳しく調べる必要がある。

#### 4. あとがき

横流式沈殿池において流入部の高さが池内の流況に及ぼす影響について調べた。乱れのモデルとして $k-\varepsilon$ モデルを用いた基礎式を利用して現象の概略を考察した。

本報で検討したことを要約すると以下の通りである。

- (1) 流入口の高さ $D$ が全水深 $H$ の $1/3$ ( $H/D=3$ )の場合には、池内に流入した懸濁水は池内の上部水との混合が比較的少なく、流入水の挙動は、流入口高さ $D$ の水深を沈殿池水深に接するような挙動で近似できる部分が多い。この傾向は粒子沈降がはやく、流下距離が短いほど著しい。
- (2) 流入口高さ $D$ が全水深 $H$ の $1/2$ ( $H/D=2$ )の場合には $H/D=3$ に比べて、濁度密度流効果が顕著に表れる。この効果は粒子の相対沈降速度が大きいほど明白になる。
- (3) 下部より懸濁粒子を流入させる場合は、全断面流入に比べて流れの安定性は増す。しかし流入断面積が小さいため部分的な高速域が生じ結果的に乱流拡散が増大する箇所が生じる。
- (4) 特に、下半分より流入する場合は、発生、減衰する濁度密度流のために池内に大きな乱流拡散係数を持つ箇所が生じる。

#### 参考文献

- 1) Kim Younghun., Seo Il Won. and Ahn Jung Kyu.: Laboratory experiments on flow characteristics in settling tanks, Twelfth Congress of the APD-IAHR, November 13-16, pp.699-706, 2000.
- 2) Amir Taebi-Harandy. and Edward D. Schroeder.: Analysis of structural features on performance of secondary clarifiers, Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol.121, pp.911-919, 1995.
- 3) D.A.Lyn and W.Rodi : Turbulence Measurements in Model Settling Tank, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.116, No.1, pp.3-21, 1990.
- 4) Ulrich Bretecher., Peter Kerbs. and Willi H.Hanger.: Improvement of flow in final settling tanks, Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol.118, No.3, pp.307-321, 1992.
- 5) Eric W.Adams. and Wolfgang Rodi.: Modeling flow and mixing in sedimentation tanks, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.116, No.7, pp.895-913, 1990.
- 6) Emad Imam., John A. McCorquodale.: Numerical modeling of sedimentation tanks, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.109, No.12, pp.1740-1754, 1983.
- 7) Peter Kerbs., Daniel Vischeer. and Willi Gujer.: Inlet-structure design for final clarifiers, Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol.121, No.8, pp.558-564, 1995.
- 8) Siping Zhou., J.A.McCorquodale.: Influences of density on circular clarifiers, Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol.118, No.6, pp.829-847, 1992.
- 9) John A. McCorquodale. and Siping Zhou.: Effects of hydraulic and solids loading on clarifier performance, Journal of Hydraulic Research, Vol.31, No.4, pp.461-478, 1993.
- 10) Peter Kerbs., Martin Armbruster. and Wolfgang Rodi.: Laboratory experiments of buoyancy-influenced flow in clarifiers, Journal of Hydraulic Research, Vol.36, No.5, pp.831-851, 1998.
- 11) 藤崎一裕, 島田立季, 長田直己: 横流式沈殿池における密度流の挙動, 水工学論文集, 第45巻, pp.973-978, 2001.
- 12) DeVantier, B.A. and Larock, B.E.: Modeling Sediment-induced density currents in sedimentation basins, Journal of Hydraulics Engineering, ASCE, Vol.113, No.1, pp.80-94, 1987.
- 13) Zhou, Z. and McCorquodale, A.: Modeling of rectangular settling tanks, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.118, No.10, pp.1391-1405, 1992.
- 14) P.Krebs : The Hydraulics of Final Settling Tanks, Wat. Sci. Tech., Vol.23, pp.1037-1046, 1991.
- 15) G.Mazzolani, F.Pirozzi and G.d'Antonio: A Generalized Settling Approach in the Numerical Modeling of Sedimentation Tanks, Wat. Sci. Tech., Vol.38, No.3, pp.95-102, 1998.

(2001. 10. 1受付)