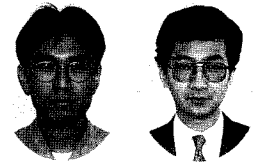


上向流傾斜管式沈澱池における 密度流とその防止対策

A density current and its suppression method in the inclined tube settler



技術開発本部 研究開発部
小西 嘉雄
Yoshio Konishi
高田 一貴
Kazutaka Takata

The removal efficiency is sometimes reduced in inclined tube settlers on summer afternoon, since flocs flow out without being caught. This phenomenon is considered to be caused by a density current. The purpose of this study is to establish a method for reducing effluent flocs. The density current in the settler was examined by means of computational fluid dynamics. The simulation was conducted to clarify the flow structure in the settler between the time the density current occurs and the time it comes to settle. The computational and observational results show that the density current occurs because of a temperature difference between the influent into the settler and the ambient fluid in it. Further simulation showed that the use of barrier walls is effective for reducing the effluent flocs, and optimum barrier wall conditions such as their number and clearance are determined by the simulation. The computationally designed optimum barrier wall conditions are confirmed to be effective in greatly reducing the effluent flocs by using actual settlers.

まえがき

阪神企業団猪名川浄水場の上向流傾斜装置式沈澱池（以下、沈澱池と呼ぶ）では、夏期、水源が悪い条件では、前段処理のフロック形成池で凝集形成されたフロックが、沈澱池内に設置されている傾斜管で沈澱分離されずに、そのまま処理水として集水される、いわゆるキャリアオーバー現象を引き起こす。

このキャリアオーバーの原因に密度流（自然対流）の影響が考えられている⁽¹⁾。密度流は、夜間一定水温で充満した沈澱池内へ、午後になり水温が高くなった原水が流入することにより、沈澱池内で密度が異なる原水同士が、自然対流を引き起こす現象と考えられている。この密度流により傾斜管内の流速分布が不均一になり、沈澱池内で逆流を起こしたり、設計流速を越える上昇流速となったりして、正常なフロック沈澱を妨げる。

本論では、キャリアオーバー時の沈澱池内流速分布、温度分布を実測することにより沈澱池内の流動状態を実験的に把握する。同時に、熱流動数値解析（CFD）の手法を用いてシミュレートさせ、沈澱池内の流動機構を解明することにより、キャリアオーバー現象（密度流増大）を明らかにすることを試みた。

さらにキャリアオーバー対策（密度流低減）に阻流板の設置が有効であると考えられている⁽²⁾⁽³⁾。そこで阻流板の設置場所・設置数の特定を、CFDの手法により試みた。さらに、実設備にこの考案を具体的に適用することにより、本考案がキャリアオーバーに対して有効な抑制手段となりうることの検証を行った。

1. 沈澱池の密度流

1. 1. 沈澱池内の水温及び濁度測定

調査に用いた沈澱池の形状は、1池当たり幅21 m×長さ25 m×深さ5.4 mで、日量約40 000 [m³] の施設能力となっている。傾斜管は管長1 300 [mm]、管断面形状50 mm×100 mmのV字型モジュールで、設置面積は、465 [m²/池]、傾斜管上端から水面までは約1.2 [m] となっている。

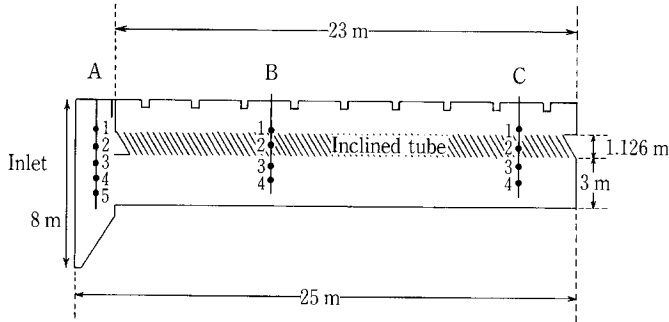
1994年8月9日に沈澱池内の水温測定を行った。この日の沈澱池の運転条件は、1池当たりの処理水量1 700 m³、沈澱池内滞留時間87分であった。第1図に測定箇所を模式的に示す。測定平面位置は沈澱池中央軸線上である。温度計には測温抵抗体（精度±0.1℃）を用いた。処理水濁度は、集水トラフに流出した直後にサンプリングした処理水を濁度計（三菱ケミカル製 SEP-PT-501D）を用いて測定した。以後CFDによる数値実験でもこの日のデータを採用している。

1. 2. 密度流現象の観察ならびに水温及び濁度測定結果

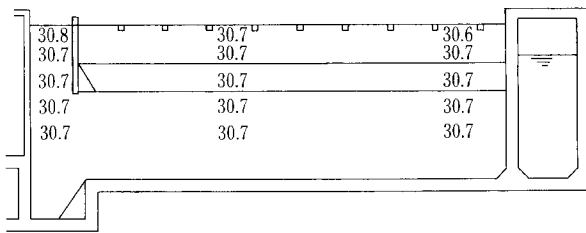
上記水温と濁度測定結果を第1表に示し、これに基づく観察結果は次に示す通りであった。まず沈澱池内が定水温時（午前中）には濁度はほぼ一定値を示しており、フロックのキャリアオーバーも認められなかった。第2図に示すように沈澱池内の水温の実測値からも池内では、ほぼ一定水温であることがわかる。14時頃になるとフロックが沈澱池流入側の傾斜管を通過して浮き上がり、そのフロックの一部はトラフにより集水されるが、集水されないフロックは、そのまま清澄ゾーン内を漂った。15時頃になると大量のフロックが流入側から浮上し下流側へ移動した。この時

第 1 表 原水水温と濁度(1994年 8月 9日)
Table 1 Measured temperature and turbidity of raw water (August 9, 1994)

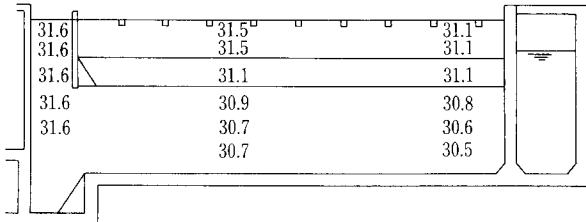
Time	Temperature [°C]	Turbidity [Degree]
10 : 00	30.7	0.5
11 : 00	30.7	0.4
12 : 00	30.8	0.4
13 : 00	30.9	0.6
14 : 00	31.3	0.5
15 : 00	31.5	1.7
16 : 00	31.7	1.9
17 : 00	31.8	2.0
18 : 00	31.7	1.8
19 : 00	31.8	1.3
20 : 00	31.8	1.1
21 : 00	31.9	1.1



第 1 図 沈殿池断面図及び水温測定箇所
Fig. 1 Cross section of settler (side view) and temperature measuring points.



第 2 図 水温測定結果 (平常時 (11時測定) 単位 [°C])
Fig. 2 Measured temperature in settler (no density current (at 11:00)).



第 3 図 水温測定結果 (キャリーオーバー時 (16時30分) 単位 [°C])
Fig. 3 Measured temperature in settler (effects due to density current included (at 16:30)).

フロックの一部は処理水と共に集水され、集水されずに下流へ流れる分は、沈殿池最下流側の傾斜管上部から下部へ逆流する現象がみられた。この現象は、着色水をトレーサーとして、流れの可視化実験を行うことにより確認された。この現象を還流と呼称している⁴⁾。第 3 図に 16 時 30 分における沈殿池内水温の実測結果を示す。水温は上流側ほど、また水面に近いほど高くなり、これら水温差は、1.1 °C にも達していることがわかる。さらにこの状態が長時間継続しており、16~17 時には沈殿池全体がフロックで覆われた。17 時を過ぎると傾斜管上に浮遊していたフロックが沈降し始め、平常時の状態へ回復する兆しを見せた。濁度の測定結果からも明らかのように、フロックのキャリーオーバー

は水温差が大きいほど著しい。これらの観察により、キャリーオーバーの原因は沈殿池内での水温差に基づく密度流(自然対流)による上昇流速の増大(特に流入側)と、それに伴う還流の影響が考えられ、その度合は水温差に比例することが定性的に確認された。

1. 3. 密度流数値シミュレーション

沈殿池内の密度流メカニズムを解明するためには沈殿池内の詳細な流速分布が必要であるが、現在市販されている流速計では、精度が不十分であったり計測システムが複雑であること等の理由により実際のフィールドに適用するには問題が多い。そこで CFD の手法を用いて密度流の流動数値シミュレーションを行うことで、沈殿池内の詳細な流速分布を把握することを試みた。CFD の手法を用いると、解析領域内の流速と温度分布等の時々刻々の変化を知ることが出来るため、密度流発生メカニズムを考察する上において本手法は有効な数値実験ツールとなり得る。

1. 3. 1 計算モデル

数値解析では、沈殿池内に流入する原水温度の経時変化に起因する沈殿池内密度流の変化を解明することを目的とした。沈殿池内に流入する原水濁度を一定とすることで、計算の簡略化と沈殿池全体の流れを把握することが容易となる。

本数値解析の基礎方程式は、次の通りである。

[連続の式]

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

[Navier-Stokes の式]

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_j \rho U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_i} - \rho u_i u_j \right] - \rho g_i \beta (T - T_0) \quad (2)$$

[時間平均エネルギーの輸送方程式]

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} + \frac{\partial U_j \rho C_p T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[K \frac{\partial T}{\partial x_j} - u_j t \right] \quad (3)$$

[乱流エネルギーと粘性消散率の輸送方程式 ($k-\varepsilon$ モデル)]

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_s + G_T + \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_s + G_T) (1 + C_3 R_f) - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

(レイノルズストレス項)

$$u_i u_j = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \mu_t \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] \quad (6)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

ただし,

$$u_j t = - \frac{K_j}{\rho C_p} \frac{\partial T}{\partial x_j}, \quad K_j = \frac{\mu_t C_p}{P_r}$$

$$G_s = \mu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$G_T = g_i \beta \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

$$R_f = \frac{G_T}{G_s + G_T}$$

$$\sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3, \quad C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \\ C_3 = 0.00, \quad C_\mu = 0.09$$

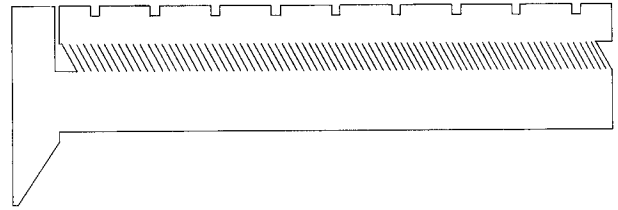
(式中の大文字は時間平均項を意味する。)

物性値には

$$\rho = 9.9623 \times 10^2 \text{ [kg/m}^3\text{]}, \quad \mu = 1.000 \times 10^{-3} \text{ [kg/m} \cdot \text{s]}, \\ C_p = 4.18 \times 10^3 \text{ [J/kg} \cdot \text{°C]}, \quad K = 6.12 \times 10^{-1} \text{ [J/m} \cdot \text{s} \cdot \text{°C]}, \\ \beta = 2.9 \times 10^{-4} \text{ [1/°C]}$$

記号は, U_i : 流体速度 [m/s], x_i : 位置座標 [m],
 ρ : 流体密度 [kg/m³], p : 圧力 [N/m²],
 g_i : 加速度 [m/s²], β : 体積膨脹率 [1/°C],
 T : 流体温度 [°C]
 T_0 : 流体基準温度 [°C],
 C_p : 定圧比熱 [J/kg · °C],
 K : 熱伝導率 [J/m · s · °C]
 k : 乱流エネルギー [m²/s²],
 ε : 乱流消散率 [m²/s³], σ_{ij} : 応力テンソル,
 μ : 粘性係数 [kg/m · s]

を用いた。



第4図 数値計算モデル

Fig. 4 Settler model for numerical calculation.

これら方程式を熱流体解析用のコードを用いて解き、沈澱池内の流速及び温度の時々刻々の変化を求めた。

解析では移流項に1次風上差分を採用した。また安定した解を得るためにクーラン数 (= 解析系内の最大流速 × タイムステップ/解析系内のメッシュ最小幅) を0.8とした。平常時の解析 (13時) では圧力の変化率が十分に小さくなって流れが準定常に達した時を収束とみなした。13時以降は密度流発生時からそれが終息する21時までの8時間の非定常流動を計算機上で再現した。

計算に用いたモデルを第4図に示す。計算に使用したメッシュは500 × 98 × 1 = 49 000である。沈澱池内の流れは奥行き方向 (Z方向) には流れの変化は小さく流動状態は一樣と考えられるため、解析系を2次元モデルに近似した。原水流入場所・トラフの位置は第4図に示す通り実際の沈澱池と同じ場所に設けた。傾斜管の総数については計算の安定、計算時間の短縮を考え、傾斜管数を実際の1/6とした。

1. 3. 2. 解析条件と境界条件

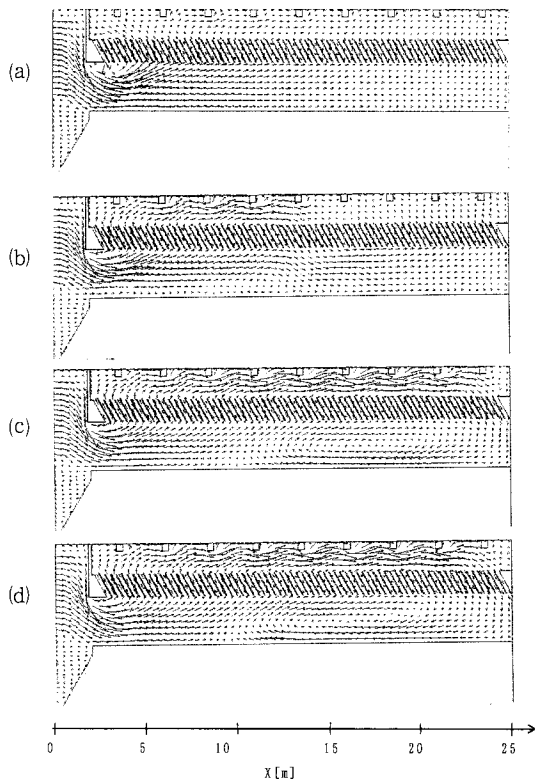
1994年8月9日13時の状態を平常時の代表例として数値解析を行った。すなわち沈澱池内の初期水温を30.9度で均一とし、この沈澱池内に同温度の原水を流入させて定常状態になるまで計算を行った。密度流発生から終息時までの解析 (13~21時) に関しては、先に求めた定常状態の解の中に第1表に示す13~21時の原水温度を流入条件とした。

境界条件を次のように設定した。すなわち原水流入入口部に所定の流速、乱流エネルギーと粘性消散率を、トラフ部の流出口には自然流入流出条件を各々与えた。水面には、すべりあり条件を与えた。沈澱池内の壁面にはすべりなし (対数則) 条件を与え断熱壁とした。計算機にはIBM MODEL 7013-590 (130.4MF) を使用した。計算時間は13~21時までの密度流現象を再現するのに約300時間を要した。

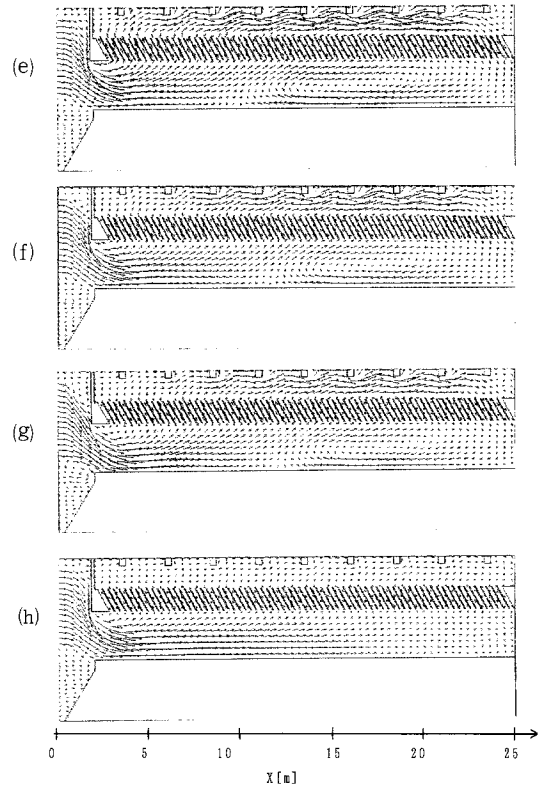
1. 3. 3. 解析結果

第5図に沈澱池内の流速ベクトルの計算結果を、第6図に傾斜管出口より10 cm上方の上昇流速分布を経時変化とともにそれぞれ示す。平常時 (キャリアオーバー発生直前) の流速分布 (第5図(a), 第6図(a)) より傾斜管上部では、沈澱池流入口付近 $X = 3 \sim 7$ mの流速は他の領域に較べて速いものの、ほぼ均一速度で上向きに流れている。

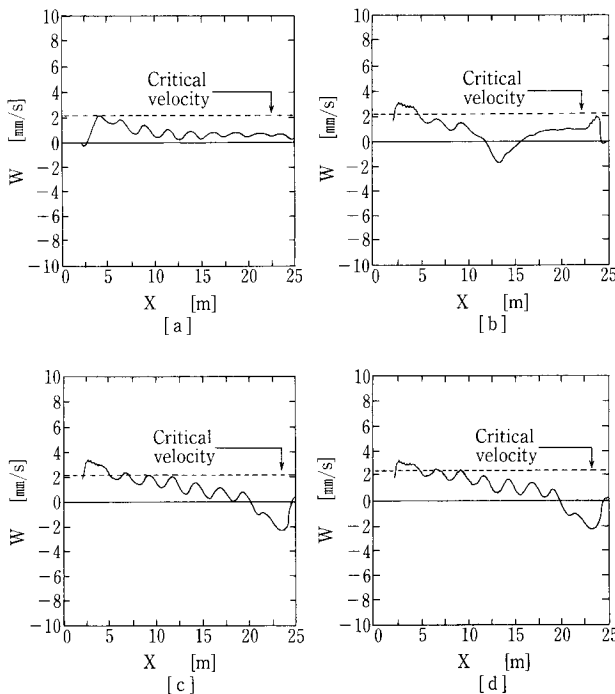
13時30分頃 (第5図(b), 第6図(b)) には、高水温の原



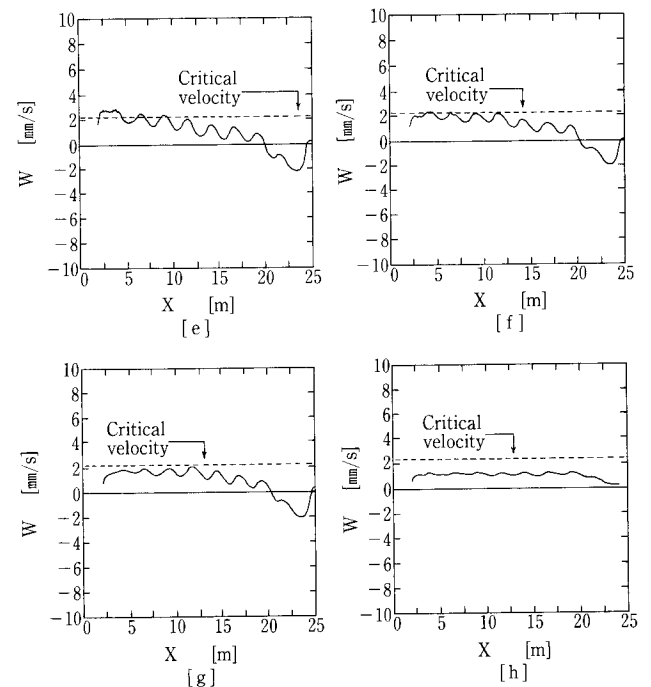
第5図 (1)流速ベクトル図(阻流板なし: 解析結果13時~16時30分)
 (a)13時; (b)13時30分; (c)14時30分; (d)16時30分
 Fig. 5 (1)Velocity vector plot (no baffles: computational time 13:00~16:30).
 (a)13:00; (b)13:30; (c)14:30; (d)16:30



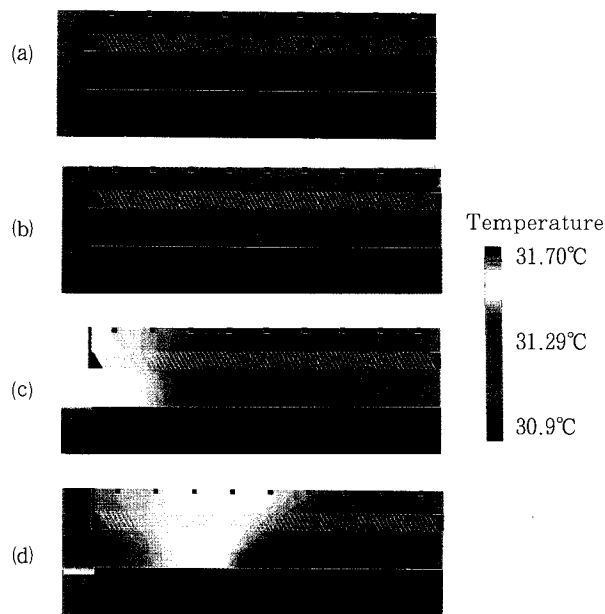
第5図 (2)(続き: 解析結果17時~21時)
 (e)17時; (f)18時30分; (g)19時; (h)21時
 Fig. 5 (2)Continued: computational time 17:00~21:00
 (e)17:00; (f)18:30; (g)19:00; (h)21:00



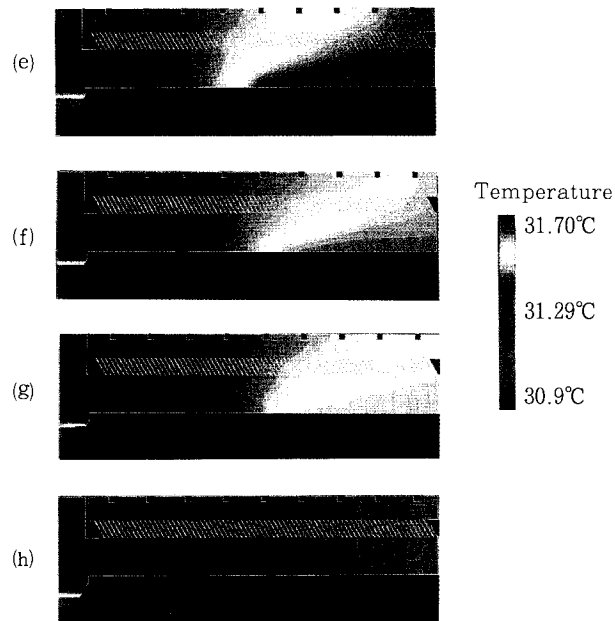
第6図 (1)傾斜管出口付近での上昇流速分布(阻流板なし)
 (解析結果13時~16時30分)
 (a)13時; (b)13時30分; (c)14時30分; (d)16時30分
 Fig. 6 (1)Vertical velocity distributions at the exit of inclined tube settler (no baffles)
 (computational time 13:00~16:30)
 (a)13:00; (b)13:30; (c)14:30; (d)16:30



第6図 (2)(続き: 解析結果17時~21時)
 (e)17時; (f)18時30分; (g)19時; (h)21時
 Fig. 6 (2)Continued: computational time 17:00~21:30
 (e)17:00; (f)18:30; (g)19:00; (h)21:00



第7図 (1)温度コンター図(阻流板なし:解析結果13時~16時30分)
 (a)13時;(b)13時30分;(c)14時30分;(d)16時30分
 Fig. 7 (1)Temperature contour line (no baffle)
 (computational time 13:00~16:30)
 (a)13:00;(b)13:30;(c)14:30;(d)16:30



第7図 (2)(続き:解析結果17時~21時)
 (e)17時;(f)18時30分;(g)19時;(h)21時
 Fig. 7 (2)(Continued; computational time 17:00~21:00)
 (e)17:00;(f)18:30;(g)19:00;(h)21:00

水(低密度)が流入するため、流入口付近で上昇流速の増大が、 $X=12.5$ m付近では下降流(還流)が起きる。14時30分頃(第5図(c), 第6図(c))には、上昇流速が増大する箇所は13時30分と大差ないが、下降流を生じる箇所は下流側へと移動し、16時30分(第5図(d), 第6図(d))では、最下流部で還流が生じる。還流の発生は傾斜管内を上昇してきた高温水(低密度)が、傾斜管上部からトラフにかけて存在する低温水の高密度水を傾斜管内を下部に押し出すように逆流させることにある。このような上昇流速の増加とそれに伴う還流発生という密度流の発達過程でキャリーオーバーが起きたものと考えられる。温度差によって沈澱池内の流速が増大することとキャリーオーバー発生との間には強い相関がある。

しかし、キャリーオーバーが起こるこのような流動状態は、流入原水の温度差がなくなる17時頃から変化が起こる。17時(第5図(e), 第6図(e))には $x=2\sim 5$ m付近での上昇流速が減少を始め、18時30分(第5図(f), 第6図(f)), 19時(第5図(g), 第6図(g))になると、上昇流速の増大が完全に抑制され上流側から密度流の影響が喪失する。21時(第5図(h), 第6図(h))になると、沈澱池内では上昇流速の増加、還流が、ともに発生しない均一な流速分布を形成する。このように、17時を過ぎると密度流が低減し始めるのは、流入原水の温度変化がなくなるか、沈澱池内の水温より低い水温の原水(高密度)が供給されることにより、沈澱池内で安定成層化が助長されたことによる。

第7図に、計算より求めた沈澱池内の温度分布の経時変

化を示す。時間の経過とともに高温水が傾斜管上部を下流方向に流れる。従って、キャリーオーバーが著しい16時30分には沈澱池左斜め上方で高温域、沈澱池右斜め下方で低温域を形成する。温度分布の計算値と実測値を比較したものを第2表に示す。実測値、計算値いずれも沈澱池全体からみて左斜上半分が水温が高い領域、右斜下半分が水温が低い領域となっており、計算と実測の傾向は一致している。計算値と実測値の差は実測値を基準にすると $+0.6$ °C以内である。計算結果は実測値に比べて多少高めに評価されているが、この誤差は数値計算においてNS方程式の対流項に1次風上差分法を適用しているために起きる数値拡散に起因するものと考えられる。この誤差は、高精度の風上差分法の適用で減少させるが、実時間で8時間以上の事象を追う様な計算に対しては、計算時間の観点から高精度風上差分法の適用は制約される。しかし、上記計算法でも実際とほぼ一致する流れが再現出来ていると判断される。

前述の結果より、CFDの手法を用いて沈澱池内の熱流機構を近似的に予測することが可能であり、数値実験を物理実験に置き換えることが出来ると考えられる。次に本手法を用いて密度流の対策方法について考察し、現状沈澱池に対して有効と考えられる方法の提案を試みた。

2. 現状沈澱池の密度流対策

2.1. 阻流板を設置した数値実験

密度流の発生により生じる上昇流速増大を抑制するため、傾斜管上部から液面にかけて、下流への流れを止める阻流板の設置が有効と考えられる。阻流板以外の対策として、傾斜管を集水部まで延長させる方式や、原水流入面積を小

第 2 表 沈殿池内水温比較 (1994年 8月 9日)
Table 2 Comparison of calculated and measured temperatures in settlers (August 9, 1994)

Time	Measuring point	Temperature [°C]	
		Experiment	Computation
16 : 30	A-0	31.6	31.7
	A-1	31.6	31.7
	A-2	31.6	31.7
	A-3	31.6	31.7
	A-4	31.6	31.7
	B-0	31.5	31.6
	B-1	31.5	31.6
	B-2	31.1	31.5
	B-3	30.9	31.5
	B-4	30.7	31.5
	C-0	31.1	31.3
	C-1	31.1	31.3
C-2	31.1	31.3	
C-3	30.8	31.3	
C-4	30.6	31.3	

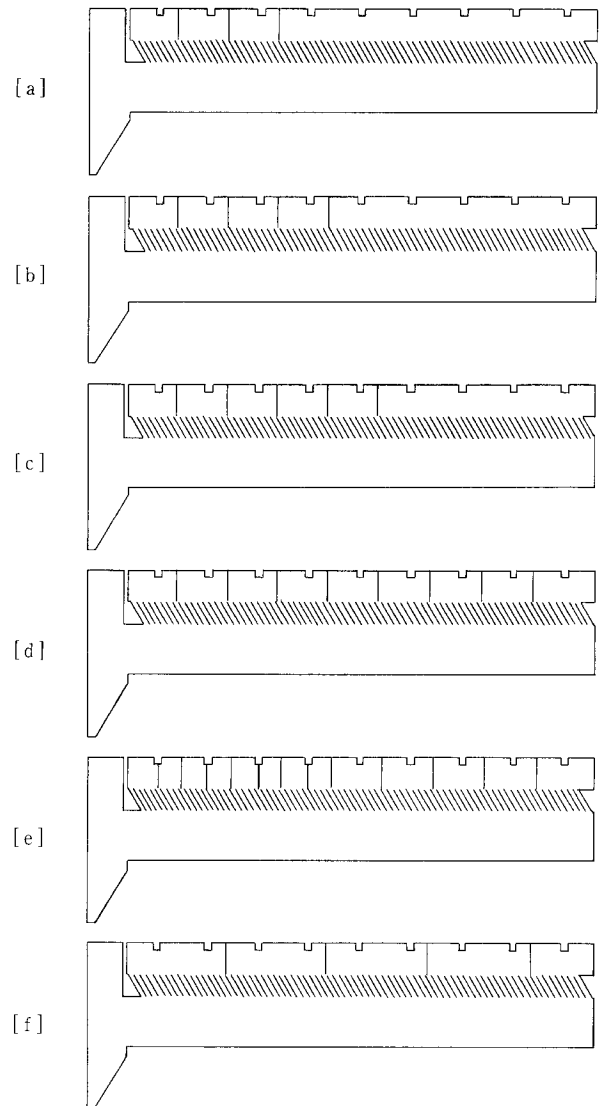
さくして流入流速を増加させる方法がとられている⁵⁾。しかし、本沈殿池に対する具体的な手法を検討した結果、阻流板の設置が最も経済的と判断されたため、ここでは阻流板の設置方法を検討した。阻流板を設置する手法は俵谷により提案されているが、具体的設置条件を特定していないことが問題として残されていた³⁾。そこで本検討では阻流板の枚数、位置を変えた数値実験を繰り返し、密度流低減に有効な阻流板の設置条件の特定を試みた。

2. 2 計算条件

第 8 図に計算条件の模式図を示す。阻流板設置枚数 3, 4 (2 ケース), 5, 8, 12 枚の 6 条件の数値実験を行った。解析条件は 1. 3. 2 で述べた条件と同一である。なお、ここで検討する 6 条件については計算時間短縮のため、キャリーオーバーが発生し始め、それが最も大きくなる時間帯 (13時~16時30分) のみとした。その結果計算時間は 1 条件あたり約 130 時間要した。

2. 3 解析結果と考察

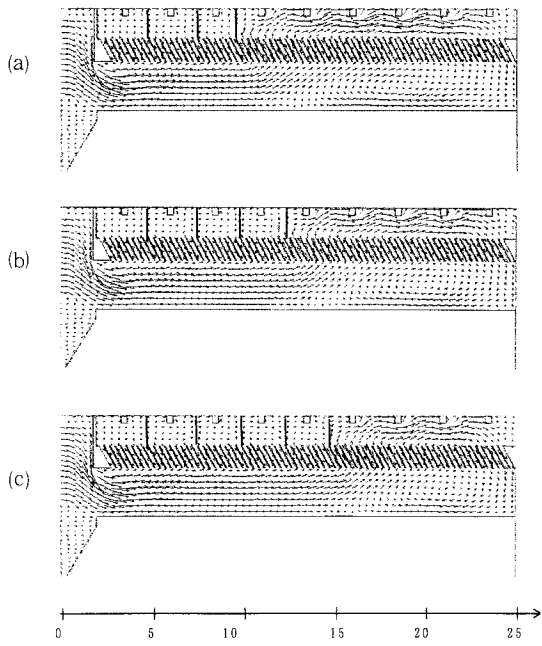
全ての条件に関しキャリーオーバーが最も著しい 16 時 30 分の結果で比較した。第 9 図には各阻流板設置条件における沈殿池内の流速ベクトル分布を、第 10 図には傾斜管出口より 10cm 上部の上昇流速分布をそれぞれ示した。阻流板 3 枚 (第 9 図 (a), 第 10 図 (a)) では、阻流板で区切られたセクションの上昇流速値は阻流板のない状態 (第 5 図 (d)) に比べて小さいが、阻流板がない $X=10$ m より下流側にかけては、その上流側で上昇流速の増大、下流側で還流を生じており密度流を抑制できていない。同様に阻流板 4 枚 (第 9 図 (b), 第 10 図 (b)), 5 枚 (第 9 図 (c), 第 10 図 (c)) では阻流板で区切られたセクションで密度流は抑制されているが、最下流に設置されている阻流板より下流では上昇流



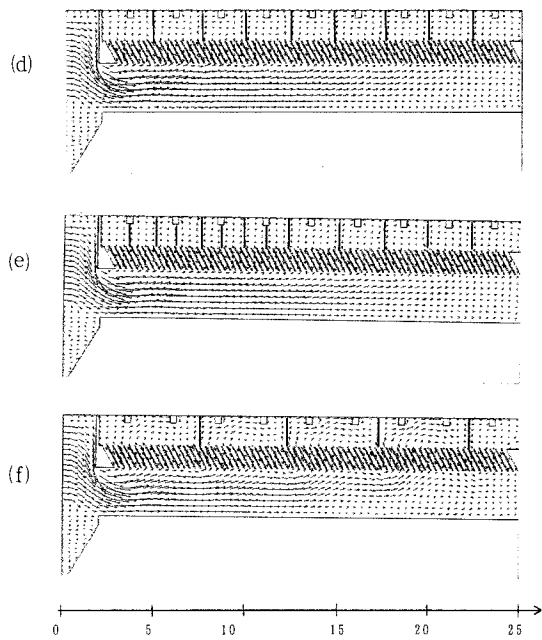
第 8 図 阻流板設置位置・枚数
(a)阻流板 3 枚 ; (b)阻流板 4 枚 ; (c)阻流板 5 枚
(d)阻流板 8 枚 ; (e)阻流板 12 枚 ; (f)阻流板 4 枚
(等間隔配置)
Fig. 8 Number of baffles and their positions
(a)three baffles ; (b)four baffles ; (c)five baffles
(d)eight baffles ; (e)twelve baffles ; (f)four baffles
(at regular intervals)

速の増大、還流現象ともに発生している点で 3 枚の場合と大差がない。しかし阻流板 8 枚 (第 9 図 (d), 第 10 図 (d)), 12 枚 (第 9 図 (e), 第 10 図 (e)) の場合には全てのセクションで上昇・下降流速は十分に抑えられており、密度流が抑制されているのがわかる。

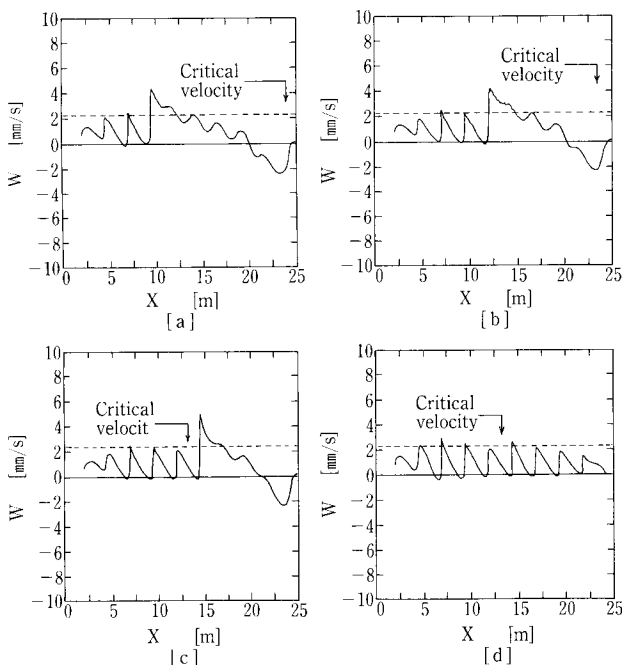
このように、設置枚数 8 枚以上の結果が密度流を抑制する上で有効であるのは阻流板を沈殿池内で等間隔に設置したことが影響していると考えられる。このため、阻流板 4 枚を等間隔で設置した数値実験を行った。第 9 図 (f), 第 10 図 (f) に流速ベクトルと傾斜管上部の上方向流速分布をそれぞれ示す。全てのセクションにおいて上流側では上昇流速の増加、下流側では還流が形成されており、密度流は低減されないことがわかる。このことは、阻流板を設置した場合、阻流板で挟まれるセクションの寸法に、水温及び運



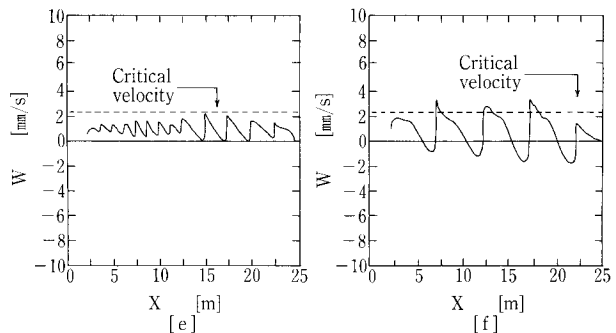
第9図 (1)ベクトル図 (解析結果16時30分)
 (a)阻流板3枚 ; (b)阻流板4枚 ; (c)阻流板5枚
 Fig. 9 (1)Computed velocity vectors
 (computational time 16:30)
 (a)three baffles ; (b)four baffles ; (c)five baffles



第9図 (2)(続き : 解析結果16時30分)
 (d)阻流板8枚 ; (e)阻流板12枚 ; (f)阻流板4枚
 (等間隔配置)
 Fig. 9 (2)(Continued computational time 16:30)
 (d)eight baffles ; (e)twelve baffles
 (f)four baffles (at regular intervals)



第10図 (1)傾斜管出口付近での上昇流速分布(解析結果16時30分)
 (a)阻流板3枚 ; (b)阻流板4枚 ; (c)阻流板5枚
 (d)阻流板8枚
 Fig.10 (1)Vertical velocity distributions
 at the exit of inclined tube settler
 (a)three baffles ; (b)four baffles ; (c)five baffles
 (d)eight baffles

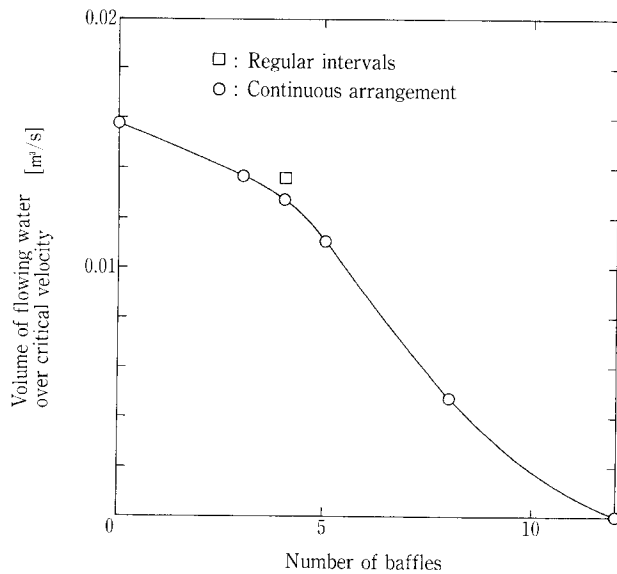


第10図 (2)(続き : 解析結果16時30分)
 (e)阻流板12枚 ; (f)阻流板4枚 (等間隔配置)
 Fig.10 (2)(Continued computational time 16:30)
 (e)twelve baffles ; (f)four baffles
 (at regular intervals)

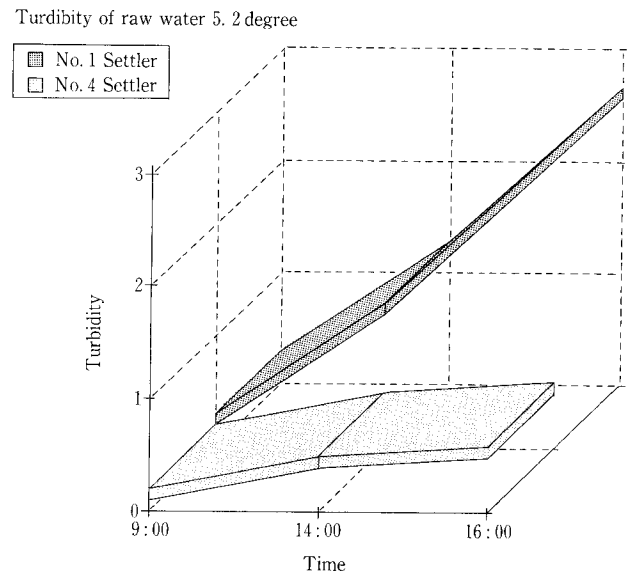
転条件をパラメータとする最適なアスペクト比が存在することも示唆している。

このように、各阻流板設置条件にて沈澱池内部の流動状態を計算したが、どの条件が本沈澱池のキャリーオーバー抑制に最も有効かを検討する必要がある。

そこでキャリーオーバー発生直前の状態 (第6図 (a)) の最大流速2.1 mm/secを臨界流速とし、これまで計算した各阻流板設置条件に関し臨界流速値以上の流量を算出し、この量が小さくなることをもって、密度流に対して有効な対策手段になりうるものと考えた。第11図に阻流板枚数に



第11図 阻流板枚数と臨界流速以上の流量との関係
Fig.11 Number of baffles VS flow rate of water above critical velocity



第12図 処理水濁度の経時変化依存性(実験2)
Fig.12 Change in turbidity of effluent water (Experiment 2)

第 3 表 濁度測定結果

Table 3 Results of turbidity measurement

Time	Temperature in raw water [°C]		Turbidity [Degree] at 16 : 00		
	10 : 00	16 : 00	No. 1 Settler (no Baffle)	No. 2 Settler (4 Baffles)	No. 4 Settler (8 Baffles)
August 1995					
8	29.1	29.9	2.4	0.65	0.45
9	29.1	30.1	2.5	1.05	0.6
16	29.0	29.6	1.85	0.6	0.35
18	29.1	30.0	3.2	0.5	0.35

対して臨界流速値以上の流量をプロットした結果を示す。この流量は傾斜管上部における臨界流速以上の上昇流速の計算値を面積積分することにより求められる。第11図より臨界流速値以上の流量は阻流板枚数に反比例し、阻流板枚数が8枚付近からその流量が著しく低下し、12枚の時にその流量がゼロになる。従って実設備では、8~12枚の阻流板設置が密度流においてはキャリーオーバー抑制に対して有効になると考えられる。

3. 実証実験

2. で述べた数値実験により密度流低減に有効な阻流板の最適設置枚数・位置を特定できた。しかし、本数値実験ではフロクの挙動を考慮せず沈澱池内を均相流体と仮定したため、この数値実験結果が実際の沈澱池でも効果を発揮するかどうかを確認する必要がある。そこで、猪名川浄水場の上向流傾斜管式沈澱池に阻流板を設置して、処理水濁度の測定を行うことにより阻流板の効果の確認を試みた。

3. 1. 実験条件及び実験方法

1995年8月に前述沈澱池3池にて検証実験を行った。阻

流板設置条件は4枚及び8枚であり、第8図(b), (d)と同一である。なお阻流板を設置しない条件でも濁度測定を行い、阻流板を設置した場合と比較出来るようにした。まず実験1では、16時の最下流側トラフで集水される処理水濁度を測定した。次に、実験2では、1995年8月9日に1号池(阻流板0枚)、4号池(阻流板8枚)の処理水濁度を9時、14時、16時の3回測定し処理水濁度の経時変化を調べた。実験3では、上流から下流側にかけての処理負荷を調べるため、1995年8月24日16時に阻流板0枚(1号池)、8枚(4号池)を設置した沈澱池2池を対象として、各トラフから集水した処理水の濁度測定を行った。

3. 2. 実験結果

第3表に実験1の結果を示す。第3表より、阻流板を設置することにより、処理水濁度が著しく低減していることがわかる。このことは、阻流板を設置することで密度流が抑制され、キャリーオーバーが低減したことに起因する。また阻流枚数が4枚と8枚の場合を比較すると、いずれの観察日でも8枚設置の方が濁度が小さい。

第 4 表 トラフ毎の濁度測定結果(実験 3)
測定日1995年 8月24日16時

Table 4 Results of Turbidity Measurement in each weir measurement date August 24, 1995.

Measuring Point	Turbidity [Degree]	
	No. 1 Settler (no Baffle)	No. 4 Settler (8 Baffles)
First Weir	1.9	0.4
Second Weir	1.0	0.4
Third Weir	0.7	0.3
Fourth Weir	0.7	0.3
Fifth Weir	0.7	0.2
Sixth Weir	0.5	0.3
Seventh Weir	0.4	0.3
Eighth Weir	0.3	0.3
Ninth Weir	0.3	0.3
Average Turbidity	0.72	0.31

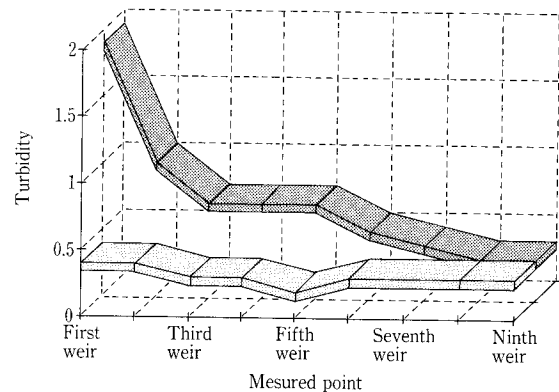
Turbidity of raw water : 6.7 degrees

次に、実験 2 の結果を第 12 図に示す。第 12 図より、阻流板の設置がない 1 号池では時間経過とともに、処理水濁度は上昇するが、阻流板 8 枚設置した 4 号池では時間変化とともに濁度は上昇するものの、その濁度変化は 1 号池に比べると非常に微小である。

そして、第 4 表、第 13 図に実験 3 のトラフ毎の濁度測定結果を示す。第 4 表、第 13 図より、全ての測定箇所において、阻流板 8 枚の方が阻流板 0 枚よりも濁度が小さい。阻流板 0 枚では、上流側トラフの処理水濁度が下流側に比べて大きく、上流側の負荷が高いのに対し、阻流板 8 枚では、若干上流側の濁度は大きい、全ての箇所でもほぼ均一濁度であり、均等に負荷がかかっていると言える。この結果は、キャリアオーバー時での流動状態が、阻流板 0 枚では上流側の傾斜管上部での上昇流速が増大し、阻流板 8 枚では、どの箇所においても上昇流速が抑制されるという数値計算結果と一致する。

よって、これらの結果は、数値実験で予測した結果が妥当なものであることを裏付けると同時に、密度流の発生の程度を臨界流速値以上の流量で表示することが実用上有用であることも示している。

■ No. 1 Settler
□ No. 4 Settler



第 13 図 各集水トラフ部における処理水濁度(実験 3)
Fig.13 Turbidity of effluent water in each weir (Experiment 3)

むすび

本稿では、実測・観察よりキャリアオーバーの原因が、密度流に起因する流入口付近での上昇流速増大及び最下流域での下降流（逆流）であることを確認し、また数値解析により密度流発生から低減までの流動状態を把握した。そして、数値実験を行うことにより、キャリアオーバーが抑制出来る阻流板設置枚数・位置を特定し、その結果を用いて、実際の沈澱池を用い実証実験を行い、阻流板にキャリアオーバー抑制効果があり、かつ阻流板枚数が多いほどその効果が大きいことを実証出来た。

〔参考文献〕

- 1) 粟谷陽一、楠田哲也：く形沈澱池における密度流と死水，土木学会論文報告集，168号，pp25-36（1969年 8月）
- 2) 藤崎一裕、向井保紀、西政秀、粟谷陽一：横流式沈澱池における濁度密度流の特性，土木学会論文集，399号／Ⅲ-10（ノート），（1988年11月）
- 3) 俵谷道彦、北田利行、樋浦貞雄、本間勝也：上向流傾斜板沈澱池の還流現象と防止策に関する実験，第39回全国水道研究発表会 3-14，pp137-139，（昭和63年）
- 4) 徳平淳、茂庭竹生、金成秀：矩形沈澱池における還流現象に関する研究，東海大学紀要，1号，pp127-132（1978年）
- 5) 木本伸一：村野階層浄水場の上向流式傾斜管沈でん池に関する改良報告，大阪府第 9 回建設技術発表会論文集，pp167-172，（昭和56年）