

(21) フェアの表示による最終沈殿池の機能評価

東京都下水道局 (正) 福田 寛允

1. はじめに

活性汚泥法による下水処理施設において、最終沈殿池は(1)所定のSS除去率が得られること、(2)高濃度の返送汚泥が得られること、(3)種々の変動に対して安定性があること、(4)保守・点検が容易なこと、などの基本的条件を備えていなければならない。とりわけ、処理水のSS濃度は、それを直接公共用水域へ放流するにせよ、あるいは砂濾過などでさらに高度の処理をするにせよ、安定して低濃度を保たなくてはならない。現行の施設設計指針¹⁾は、上記の要件を満足する沈殿池を設計するための有力な手段であるが、沈殿池の機能を予知することができない。そのため設計者は、用地事情と“指針”が許す限り大きな沈殿池を設計する。

最終沈殿池をより合理的に設計し、管理するためには、流入負荷量に対する沈殿池のSS除去特性を知る必要がある。ここでは、沈殿池内の流況をフェアの静常係数を用いて示し、SS除去率を流入負荷量と沈殿池形状との関係によって求める方法について述べる。さらに、流入口付近の整流方法について考察する。

2. 沈殿除去理論と実際

沈殿池における沈殿除去率を求めるために多くの数式モデルが提案されており、それらは拡散モデル、槽列モデル、完全混合モデル、それに押し出し流れモデルに分類している。²⁾

最も理論的な除去率表示は2次元拡散モデルの解として求められているが、きわめて複雑であり、また、高松^{2) 3)}らはその簡易法として種々の混合状態における残留率を1次元拡散モデルの解として求めた。しかし、いずれも実際の設計式としては用いられていない。槽列モデルは、沈殿池全域を直列に結合したセルを仮想して除去率を求める方法であり、HazenとFairの考え方がある。これらの表示法は、沈殿池の除去効率を仮想セル数という単一指標で表わせるため取扱いが容易であるが、その数値を予知できないため設計方法としての発展性に乏しく、既設沈殿池の比較方法としてのみ用いられるものと考えられている。^{4) 5)}中川は、4種(導流壁式、中間整流壁式、平行2階槽式、折返し2階槽式)の矩形沈殿池の除去効率を、これらのモデルを用いて比較し、設計上の留意事項を整理した。

前出の“指針”では、最終沈殿池の除去率を押し出し流れモデルの単一粒度粗成の場合に単純化し、経験値として得られた設計水面積負荷($20\sim30\text{ m}^3/\text{m}^2/\text{日}$)から、所要沈殿池面積を算出する。設計者にとってこの方法は、活性汚泥の沈降速度を知らなくとも沈殿池の設計ができるためきわめて便利であるが、水面積負荷を合理的に選択する手がかりが何もなく、また、管理上負荷の変動による除去率の変化を予測できない。Pflanz⁶⁾は、処理水SS濃度をMLSS濃度、水面積負荷とSVI、固形物負荷との関係で整理したが、設計方法の確立にまで至っていない。

3. フェアの除去率表示

Fair⁷⁾は、沈殿池内で生ずる渦流や偏流の影響を考慮した沈殿除去率は、単位時間中に浮遊物が除去される割合 dc/dt が、その時刻に残存している浮遊物量 $(C_0 - C)$ に遅滞係数 $1/(t_0 + T/n)$ を乗じたものに等しいとし、また、理想沈殿において $T/t_0 = w_0/(Q/A)$ が成立することから次式を導いた。

$$E = \frac{C}{C_0} = 1 - \left(1 + \frac{1}{n} \cdot \frac{T}{t_0}\right)^{-n} = 1 - \left(1 + \frac{1}{n} \cdot \frac{w_0}{Q/A}\right)^{-n} \quad (1)$$

ここに、 C_0 は流入SS濃度、 C は T 時間後に除去されたSS量、 T は理論滞留時間、 t_0 は沈殿時間、 w_0 は着目粒子の沈降速度、 Q/A は水面積負荷、 n はセル数であり静常係数と呼ばれる。高松らは、(1)式の沈殿時間はある混合状態における見かけの沈殿時間であって、静水中における粒子の沈降速度から求められるような単純な定数でないことを指摘している。

4. 実験装置および方法

4-1 実験用沈殿池 実験に用いた沈殿池の概要は次のとおりである（表-1）。

(i) 中央流入型円形池（SCF） 直径10m，側深3.0m，中央駆動汚泥掻き機付きで，一般的な円形沈殿池である。

(ii) 周辺流入型円形池（SPF） 直径10m，側深2.5mの円形池で，流入水は周辺底部に設置された60本のノズルから流入し，処理水は周辺上部のトラフから流出する。汚泥は8本の吸引管によって引抜かれる。

(iii) 二層式矩形池（OHR，MER） 2つの処理場で使用されている二層式沈殿池で，OHRはMERと比較して一回り小型である。

(iv) 有孔整流壁式矩形池（MWR） 流入整流壁の他に，6m毎に2枚の中間整流壁（開口比10%）を持っている。

4-2 実験方法 沈殿池の静常係数はトレーサー実験によって求める。沈殿池の入口でパルス投入したトレーサーの投入後時刻tにおける観測濃度をCとすると，平均滞留時間tg，分散σ²はそれぞれ，

$$t_g = \frac{\sum tC}{\sum C} \tag{2}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_c^2}{t_g^2} = \left(\frac{\sum t^2 C}{\sum C} \right) / \left(\frac{\sum tC}{\sum C} \right)^2 - 1 \tag{3}$$

で表わされ，⁸⁾ 沈殿池を一端開放，他端閉合系とみなすと

$$\sigma^2 = 3d^2 + 2d \tag{4}$$

が成立つ。⁹⁾ ここで，dは拡散指標と呼ばれ，次の関係を満足するものである。¹⁰⁾

$$d = \frac{1}{Pe} = \frac{D}{uL} = \frac{1}{2n} \tag{5}$$

ここで，Peはペクレ数，Dは混合拡散係数，uは平均流速，Lは流下距離である。

実験時間は理論滞留時間の2倍とし，実験開始の少なくとも1時間前に流量調節をした。開始時に水に溶解させたウラニンを投入し，流末などの採水点において，最小採水間隔3分，1採水点における検体数が60本以上になるようにした。試料は暗箱内に保存し，3,000 r.p.m.，5分間の遠心処理の後，螢光分光光度計でトレーサー濃度を測定した。越流量は表-1の方法で測定し，30分間隔の平均値を用いた。

流入および流出SS濃度は，各採水点における30分間隔の平均値とし，1理論滞留時に池内のSS濃度分布を測定した。SS濃度の測定は遠心法および濾紙法によった。

汚泥の沈降速度は，直径22cm，高さ3mのカラムと1ℓのシリンダーを用いた。

表-1 実験池の形状と負荷条件

沈殿池名			SCF	SPF	OCR		MER		MWR
形状	直 径	単位			上 段	下 段	上 段	下 段	
形 状	直 径	m	10.0	10.0	397	414	550	550	470
	長 幅	"			46×4	46×4	50×5	69×5	46×4
	深	"	3.0	2.5	27	27	32	30	33
	長/幅	"			81	88	110	80	102
	深/幅	"			057	057	058	043	072
	面 積	m ²	78.5	78.5	1,550		3,795		865
実 験 条 件	容 積	m ³			4240		11,765		2,730
	整 流 方 法		中央ウエル	流入管(60本)	流入整流板		流入整流板		流入，中間整流壁
	汚泥掻き機		レーキ式	吸入式	リンクベルト式		リンクベルト式		ミード式(注)
	集水方法		越流式	越流式	越流堰と集水管		越流堰		リンクベルト式
									越流堰
実 験 条 件	水面積負荷	m ² /m ² /日	244~406	244~406	225~482		183~264		94~595
	懸 負 荷	m ³ /m ² /日	66~110	17~24	-		82~121		70~204
	滞 留 時 間	hr	1.9~3.1	1.6~2.6	1.4~2.9		2.8~4.1		1.3~85
	MLSS 濃度	g/L	25~48	15~60	0.7~1.6		1.2~1.3		0.8~24
	固形物負荷	kg/m ² /日	88~210	60~210	22~82		27~43		21~145
	流 量 測 定								
実 験 条 件	流 入		堰式	堰式					堰式
	流 出								
	返送汚泥								
実 験 条 件	トレーサー観測点		5	5	水位計 電磁流量計		水位計 電磁流量計		電磁流量計
					11		7		14

5. 結果と考察

5-1 活性汚泥の沈降速度 (1)式の粒子の沈降速度 w_0 として、活性汚泥界面の等速沈降速度を用いる。通常の MLSS 濃度において、等速沈降速度 v_i は、

$$v_i = a \cdot C^{-b} \quad (6)$$

で表わされ、定数 a 、 b によって汚泥の沈降特性が比較される。実験に用いた汚泥の処理場別、季節別の沈降速度を図-1に示す。Mynhierらは米国内のデータを整理し b 値が 2.5, 2.25, 1.6 に分類できると述べているが、今回の実験値はいずれも 0.7~1.2 で、濃度増加による速度低減が比較的緩慢であった。四季を通じての最低速度は ME の冬季に観測され、MLSS 1,000 ~ 2,000 mg/l では 158~89 $m/日$ (SVI 140~242) であったが、設計水面積負荷よりも相当速い値であった。図-2は、MWの実測値と SV_{30} の関係から得た沈降速度速算図であり、ME, OHの結果とも大きな差はない。

5-2 トレーサー実験 (i) 短絡流 図-3・1は最も速い短絡流、すなわちトレーサー流出開始時間を水面積負荷との関係で示したものである。MWRは短絡流の発生を阻止している。一方、OHRおよび円形池では短い沈殿時間しか与えられずに流出する水塊が存在する。これらを短絡流速に換算して Ingersol のフロック沈降限界流速 (V_c) と比較したところ、OHR ではすべての水面積負荷条件で V_c よりも大きかった。

(ii) 平均滞留時間 最終沈殿池の滞留時間に関する設計基準は 2.5 時間である。この値は沈殿池水系 3.0, 2.7, 3.3 m に対しそれぞれ 29, 24, 26, 32 $m^3/m^2/日$ の水面積負

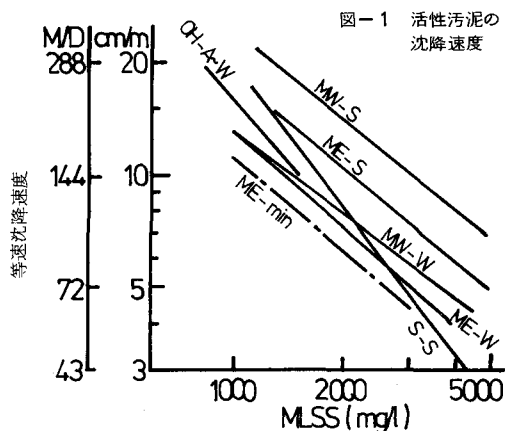


図-1 活性汚泥の沈降速度

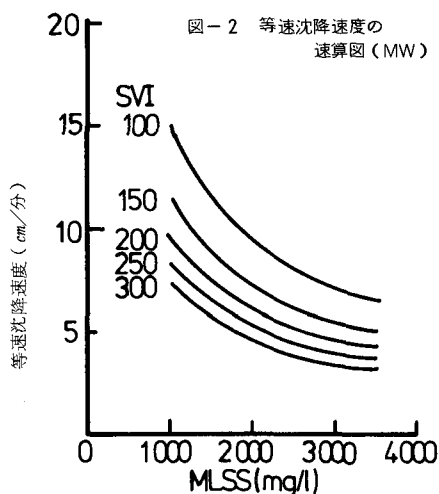
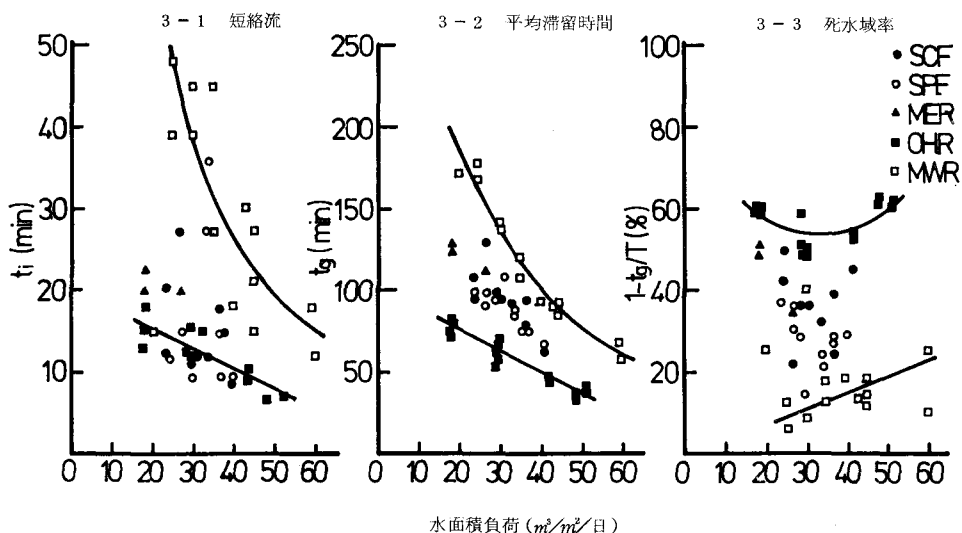


図-2 等速沈降速度の速算図 (MW)

図-3 沈殿池形状と流出特性



荷がかかったときの理論滞留時間である。この目的を達している沈殿池はMWR だけであり、OHR ではきわめて短い滞留時間しか得られない。円形池は両者の中間に位置し、流入方法による差はみられない。

(イ) 死水域 沈殿に関与しない沈殿池容積の割合と考えられている。OHR では 45~60% の死水域率を示しており、容積効率が最も悪い。これは、低負荷時には堰の最上流端への流達が多く、高負荷時には底部に高速流が発生し最下流端への到達が速いためである。円形池では 20~40%、MWR では 5~20% の死水域を生じた。

(ニ) 静常係数 フェアは静常係数 2

以下を不良、4 以上を良好と分類しているの、この値を目安にして沈殿池を見て行くことにする。円形池では、SCF が水面積負荷によらずほぼ一定の n 値を示した。一方、SPF では設計負荷の $31 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{日}$ の付近できわめて高い値を示したが、水面積負荷の増加とともに急激に低下し、 $40 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{日}$ では 2.2 になった。したがって、この型の沈殿池は水量変動に対して弱く、定量処理する場合に適しているといえよう。

OHR は $n = 3 \sim 4$ で変化は小さいが、処理水量の増加に伴って低下する。MER は OHR とほぼ等しい n 値を示しており、形状による分類と一致する。MWR は実験水面積負荷の範囲でつねに高い値を示し、高負荷に対しても池内は静常を保っている。以上のように、静常係数によって、沈殿池の安定性を論ずることができる。

MWR の実験では流入 SS 濃度を $1,000$ および $2,000 \text{ mg}/\ell$ に調節しているの、流入 SS 濃度の n 値への影響を見ることができる。MWR と OHR の n 値を水面積負荷と流入 SS 濃度の関数として表すと、次式を得る。

$$\text{MWR} : n = \exp \{ 2.74 - 9.83 \times 10^{-3} (\text{OFR}) - 3.42 \times 10^{-4} (C_0) \}$$

$$\text{OHR} : n = \exp \{ 1.45 - 8.79 \times 10^{-3} (\text{OFR}) + 6.12 \times 10^{-5} (C_0) \} \quad (7)$$

OHR では流入濃度の調節ができず、測定範囲が狭いが、比較のために算出した。MWR は流入 SS 濃度の影響を強く受ける。しかし、 $3,500 \text{ mg}/\ell$ 程度の流入濃度で OHR とほぼ等しい n 値にまで低下するにすぎない。

¹¹⁾ Trussell らは長いコンクリート製開水路において等流を仮定し、次の簡易式で拡散指標を与えた。

図-4 静常係数

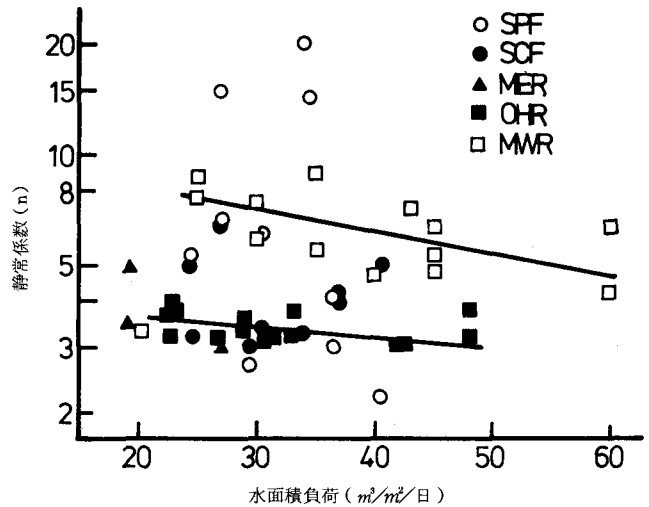
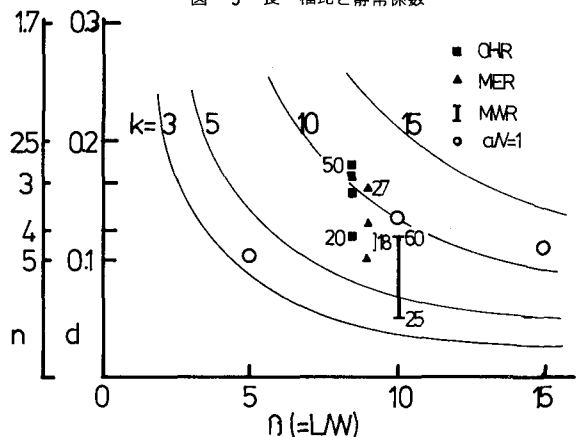


図-5 長一幅比と静常係数



$$d = \frac{2.27 n R h^{5/6}}{L} = \frac{0.14 K_1}{\beta} \quad (8)$$

ここで、 n はマンニングの粗度係数、 Rh は径深、 L は水路長、 $\beta = L/W$ = 長/幅、 K_1 は非理想性係数である。 K_1 は主に不等流による理想状態からの偏りを示し、通常の塩素接触槽では15、水理的な工夫をした場合3~5まで改善できることを明らかにした。この方法によれば、実験で求めた n 値は図-5に示したとおりで、OHRとMERでは $K_1 = 7 \sim 11$ 、MWRでは $K_1 = 4 \sim 9$ となる。(7)式によって、水面積負荷 $30 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{日}$ 、MLSS $1,250 \text{ mg/l}$ の場合両者の K_1 値はOHRで8.6、MWRで4.8となる。

5-3 SS 除去率

(i) 水面積負荷とSS除去率 処理水SS濃度およびSS除去率を水面積負荷との関係で図示すると図-6を得る。2つの円形池およびOHRの除去率曲線は良く近似しており、水面積負荷 $40 \sim 45 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{日}$ で処理水質が急激に悪化する。計画時間最大汚水量と1日最大汚水量の比を $1.3 \sim 1.8$ とすると、設計水面積負荷として $22 \sim 35 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{日}$ が得られる。MWRでは水面積負荷 $60 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{日}$ でも99.5%の除去率が得られ、この池の限界負荷量を見出していない。

(ii) フェア式によるSS除去率 実験時の静常係数と処理条件からフェアの式で算出された除去率と実際に測された除去率の間には大きな差を生じた。実用上、補正係数 K_2 を用いてフェアの式を書き改める。

$$E = \frac{C}{C_0} = 1 - K_2 \left\{ 1 + \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{v_i}{Q/A} \right)^{-n} \right\} \quad (1)$$

K_2 はすべての影響因子についての補正をするものであるが、 K_2 と流入SS濃度との関係を図-7に示す。OHRの値は狭い範囲にしか存在しないが、MWRやSCFの値と同一傾向を示した。ただ、SPFの K_2

値が他よりも大きい理由は、流れが上向流式であることだけでは説明不足である。

5-4 整流設備 上述のように、有孔整流壁式沈殿池はすべて評価指標で他よりも優れていることが確認できた。他との構造的な相違は中間整流壁の存在である。池内に生ずる密度流に着目し、流速分布による池内の流況変化を観察するため次のような実験を行った。

長15m、幅1m、深1mの実験水槽を用い長-幅比、深-幅比を変化させ、池内に清水および汚泥を流入させて種々の流速分布をつくり出し、静常係数との関係を求めた。流速分布は、池長の1/2地点の中央に設置した電磁流速計で水深5cm毎に測定した。さらに、中間整流壁の阻流機能を写真観測し、MWRでの実験結果を補足した。

図-8は模型実験の結果である。流速分布の大きさを標準偏差と平均流速の比で示した。 σ/V が1よりも大きくなると n 値は $2.5 \sim 4.0$ に低下する。このことは β 値に無関係である。しかし、一般的には β が大きい

図-6 処理水SS濃度とSS除去率

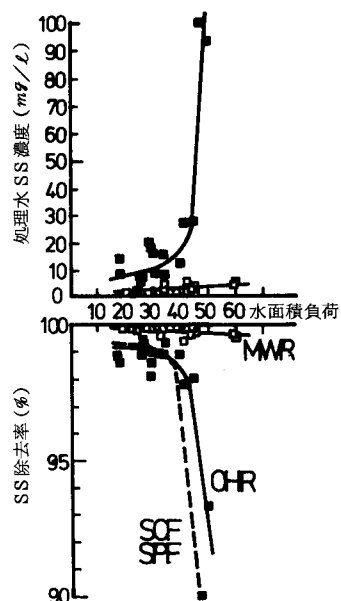
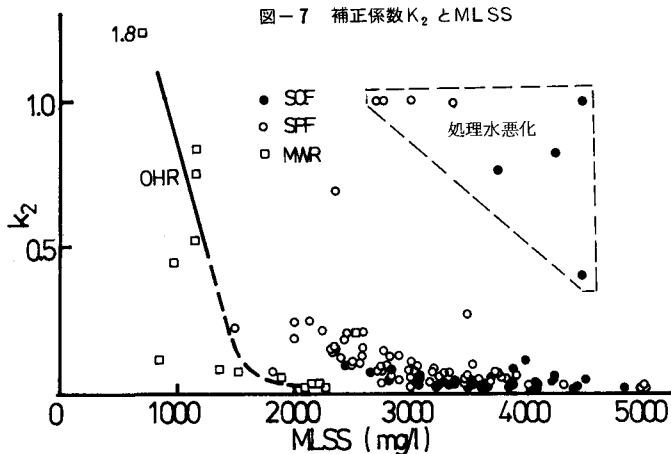
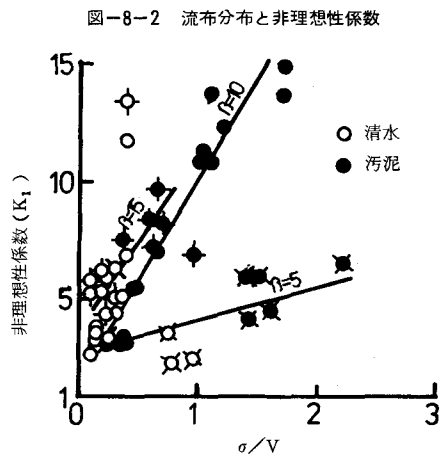
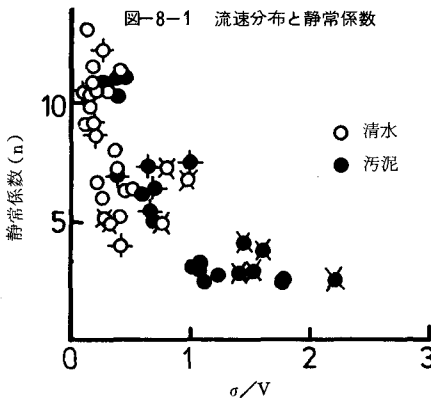


図-7 補正係数 K_2 と MLSS



ほど V が大きくなり、 σ/V が小さくなるはずである。さらに詳細には、密度流とそれに伴って生ずる循環流による流速分布に関して検討しなくてはならない。

通常の沈殿池には必ず流入整流壁が設備される。模型実験で見たとおり、流入整流壁の下流に発生する密度流の流下を阻止しないと、沈殿ゾーンにおける容積効率や静常係数の向上は望めない。このような機能を発揮する最も簡易な施設が中間整流壁であると言える。さらに、中間整流壁は汚泥の堆積位置を流入口に近ずける機能もあり、集泥効率が向上する。これらの効果は、集泥および排泥機構の複雑化の代償としては余りあるものと考えられる。



6. まとめ

4種類の異った形状の沈殿池のSS除去機能を、フェアの評価方法を用いて検討し、次の結論を得た。

- (1) 最も安定した除去機能を持つ沈殿池は有孔整流式であり、その安定性は中間整流壁による密度流の流下阻止力によってもたらされた。
- (2) 流入整流壁だけを持つ矩形池と中央流入型円形池は、流況および除去機能が良く似ている。
- (3) 周辺流入型円形池の静常係数は大きく変動した。
- (4) 沈殿池形状と負荷条件から除去率が概算できるので、設計の合理化が計られる。
- (5) 沈殿池の管理においては、過負荷時の除去特性が予想でき、対策が立て易い。

<文献>

- 1) 日本下水道協会：下水道施設設計指針と解説
- 2) 高松武一郎編：環境システム工学，日刊工業新聞社，1977
- 3) 高松武一郎・内藤正明：土木学会論文集，№139，1967
- 4) 土木学会：水理公式集 1971
- 5) 中川義徳：水道協会雑誌，№331，333，1962
- 6) Pflanz, P : Advances in Water Pollution Research, Pergamon Press, 1969
- 7) Fair, G.M. and Geyer, J.C. : Water Supply and Waste-Water Disposal, John Wiley & Sons Inc., 1954
- 8) Levenspiel, O : Chemical Reaction Engineering, John Wiley & Sons Inc., 1972
- 9) van der Laan, E.Th. : Chem.Eng. Sci., 1958
- 10) 合田健編：水質工学 演習編，丸善，1977
- 11) Trussell, R.R. and Chao, J.-L. : WPCF, 1977