

4. 沈澱池の基本現象に関する一考察 一場の乱れと粒子の沈降

東京大学工学部都市工学科 石橋多聞

〃 徳平淳

〃 松尾友矩

1 はじめに

理想的な沈澱池と乱れのある沈澱池とはかなりちがった水理条件を持つものと思われる。しかし、沈澱を支配するその本質的な現象においては、粒子が沈降すると云う現象だけをとりだして考えてみれば、まったく変らないものであるはずである。

このように、沈澱池における基本現象は“粒子の沈降”であり、沈澱池内の水理的条件は、それが粒子に作用した結果として“粒子の沈降”に影響を与えるものである、と考えれば、理想的な沈澱池と乱れのある沈澱池の関係についても、“粒子の沈降”と云う基本現象を中心として統一的に解析できるのではないかと考えられる。

すなわち、沈澱除去率は、表面負荷率（Over flow velocity）を一定とすれば、粒子の沈降速度の函数として求められるべきものであって、理想的な沈澱池と乱れのある沈澱池の除去率のちがいは、沈澱の場にある粒子の相対的な沈降速度のちがいによって生じてくるものであると考えられる。そして、それらの関係を定量化して行くことの可能性について考えてみる。

両者の除去率のちがいは、理想的な沈澱池における粒子の沈降速度は静水中での自由沈降の理論値に等しいのに対して、後者にあつては、乱れによって粒子の相対的な沈降速度が静水中の沈降速度より小さい速度にしか達し得ないからである、と云うように説明して行くことになる。

今回の研究会においては、上に述べてきたような基本的な立場に立って沈澱池の解析を進め、場の乱れと粒子の沈降速度との関係を中心として、沈澱池改良の一つの方策である傾斜板の諸効果のうち特にその整流効果について検討してみる。

2 場の乱れと粒子の沈降速度

乱れのある沈澱池と云っても、ここでは、連続式の沈澱池について、短絡流、対流、密度流、風の影響と云ったものは無視して、流れの中での変動流速の存在だけを考慮したような乱流状態を仮定した流れの場に限って考えて行くことにする。

1) 変動速度と粒子の沈降速度

沈澱池内の場の流れを、流速 U_i

$$U_i = \bar{U}_i + u'_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 $\bar{U}_i = \frac{1}{T} \int_{t-\frac{1}{2}T}^{t+\frac{1}{2}T} U_i dt$; 平均流速

$$u'_i \text{ ; 変動流速, } \bar{u}'_i = \frac{1}{T} \int_{t-\frac{1}{2}T}^{t+\frac{1}{2}T} u'_i dt = 0$$

i ; 空間における3つの座標軸を示す。

と仮定する。

このような流れの場にある粒子は、場の流れに完全に同化している場合を除いて、粒子と同じ体積を持った流体の粒子から、変動速度による加速度によって力 F を受けるものと思われる。¹

$$F = \frac{4}{3} \pi d^3 \rho f \ddot{u}_i$$

ただし、 d ; 粒子の半径

ρ_f ; 流体の密度

$\dot{u}_s = du'_s/dt$ ($\dot{u}_s$ は粒子の沈降速度に関しては、鉛直方向
だけについて考えることに対応している)。

重力の場合における力の釣合いを考えると、

$$\begin{array}{ccccccc} 4/3 T_1 \rho_s d^3 g & - & 4/3 T_1 \rho_f d^3 g & - & 4/3 T_1 \rho_f d^3 \dot{u}_s & - & 1/2 T_1 C_d \rho_f d^2 W_{re}^2 \\ \text{I} & & \text{II} & & \text{III} & & \text{IV} = 0 \cdots (2) \end{array}$$

ただし、 g ; 重力の加速度

ρ_s ; 粒力の密度

C_d ; 抵抗係数

W_{re} ; 乱れの影響を考え修正した相対的な沈降速度

と云った関係式が求められる。

(2)式の左辺第Ⅰ項は重力、第Ⅱ項は浮力、第Ⅲ項は乱れによって鉛直方向へ働らく力、第Ⅳ項は修正された相対的な沈降速度によって生じる粘性抵抗、をそれぞれ示すことになる。

しかし、(2)式について平均的な状態について考えてみると、変動速度 u'_i の特性($d\bar{u}'_i = 0$)から du'_i/dt もそのまま平均を考えれば、 $du'_i/dt = 0$ となって第Ⅲ項は消えてしまうことになる。そこで通常使われているように du'_i/dt の平均として $\sqrt{(du'_i/dt)^2}$ をとって考えなければならない。

$\sqrt{(du'_i/dt)^2}$ を使って(2)式の平均的な状態を変形すれば

$$W_{re} = \sqrt{\frac{8}{3 C_d \rho_f} \left\{ (\rho_s - \rho_f) g - \rho_f \sqrt{(\dot{u}'_0)^2} \right\} d} \cdots \cdots (3)$$

と示される。

結局、同じ粒子でも、乱れのある沈澱池においては、第Ⅲ項の分だけ静水中よりも小さい相対的な沈降速度 W_{re} を持つことになる。これが除去率低下の原因となるものであり、また、除去率算定の際の基本条件を与える量ともなるものであると考えられる。

2) 変動速度と場の安定

乱れのある流れに対して、(1)式で定義したような速度の関係を考慮するとき、運動エネルギーの^{2.3.}関係は、

$$T = T_0 + T' \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 T ; 全運動エネルギー

$$T_0 = \frac{1}{2} \rho f \iiint (\bar{U}_1^2 + \bar{U}_2^2 + \bar{U}_3^2) dx_1 dx_2 dx_3$$

平均運動による運動エネルギー

$$T' = \frac{1}{2} \rho f \iiint (\bar{u}'_1^2 + \bar{u}'_2^2 + \bar{u}'_3^2) dx_1 dx_2 dx_3$$

変動流による運動エネルギー

となる。

このとき乱れによる運動エネルギー T' については、その変化率の平均に^{2.3.}関して次のような関係が求められる。

$$\begin{aligned} \overline{dT'/dt} = & -\rho \iiint_R dx_1 dx_2 dx_3 (\overline{u'_i u'_j} \partial \bar{U}_j / \partial x_i) \\ & - \mu \iiint_R dx_1 dx_2 dx_3 (\overline{\partial u'_i / \partial x_j + \partial u'_j / \partial x_i}) \partial \bar{u}'_i / \partial x_j \dots\dots (5) \end{aligned}$$

ただし、 $\iiint_R dx_1 dx_2 dx_3$ は、動水半径が R であるような水路の全領域にわたって行なり積分を意味する。

これは、Reynolds によって導かれた関係式で、 $\overline{dT'/dt} \leq 0$ のとき乱れは減衰していき、 $\overline{dT'/dt} > 0$ のとき乱れは成長して行くことを示している。そして、 $\overline{dT'/dt} = 0$ となるような $[\bar{U}, R]$ の組みに対して $Re = \bar{U}R/\nu$ が定められ、これが層流と乱流の限界を示す限界レイノズル数として定義されることになる。

上に述べてきたような関係に注目するとき、同一程度の乱れが予期されるような流れに対しても、その $\bar{U}$ を変えなくても、積分領域 R (実際には管の径と云ったものに当たる) を変えることによって、 $\overline{dT'/dt} = 0$ とすることも可能ではないかと思われる。

すなわち、場の流れに乱れが存在したとしても、水路をいくつかの小さい区画に分けることによって、全体としての流量には変化を与えないようにしながら、小さい区画の中においては、乱れが減衰し消滅して行ってしまうと云った状況が実現されるのではないかと推測することである。

3) 傾斜板の整流効果との関係

傾斜板の整流効果に対する定性的な解説として、1)、2)で述べてきたことをまとめてみる。

1)でみてきたように、乱れの場合における相対的な粒子の沈降速度 W_{re} は、変動速度 v'_1 の函数として定まるものであり、もし変動の flow pattern が変らないとすれば、どんな形式の傾斜板を挿入してもその効果は期待できないことになってしまう。

しかし、2)でみてきたように、もし $\overline{dT/dt} = 0$ となるように積分領域を変えて行くことができるならば、同じ flow pattern の変動に対しても、適当な小区画に装置を分割してやることによって、乱れを減衰させることができ、理想的な沈澱池におけるのと等しい沈降速度を粒子に持たせることができることになる。そして、その結果として、沈澱除去率の改善となって現われてくるだろうということが予想されるわけである。

3 実 験

1) 目的および方法

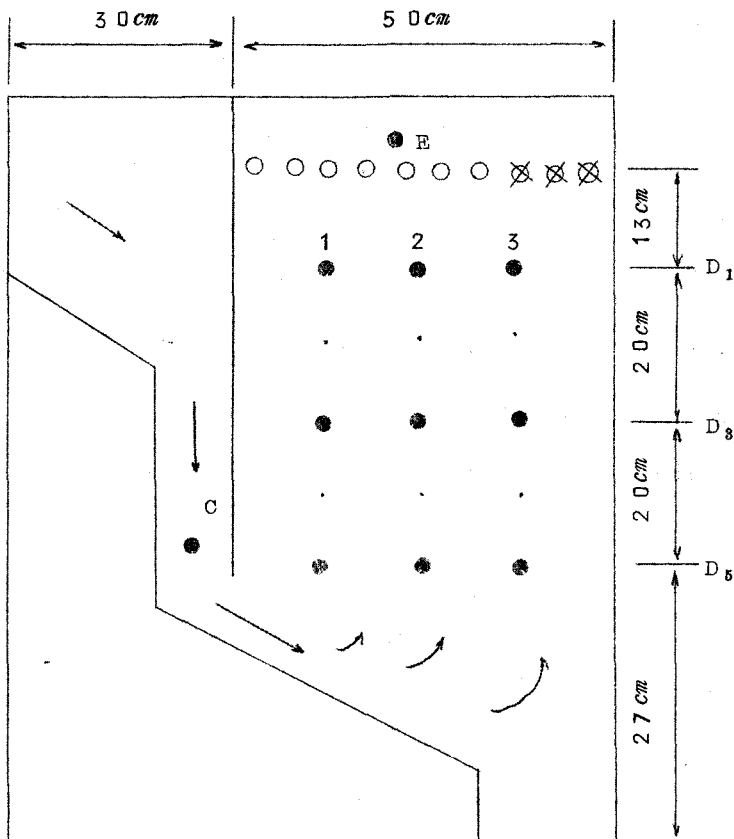
2章で予想したような“場の乱れと粒子の沈降”の関係について、傾斜板の整流効果と云う観点から整理したらどのようなものとして現われてくるかを調べてみようとするものである。

実験の手順としては、3-4)に示すような粒子を定められた水量に対して一定量ずつ加えて攪拌し、図-1に示した上向流水の沈澱槽に送り込む。次に図-1に示したC、D₁₁ ~ D₈₈、E、の合計11個所から採水し、採取した粒子について、それらの沈降速度を静水中で測定して行きどの程度の大き

さの粒子がどの位置まで達しているのかを上昇流速，傾斜板間隔（場のレイノズル数にもあたっている）を変えながら調べてみた。

2) 装 置

図-1 参照



○；越流堰

C；流入部

⊗；ゴム栓でつぶした堰（表2注参照）

D；沈降部

• 採水位置

E；流出部

沈降部水面積 $(24 \times 50) = 1200 \text{ cm}^2$

沈降槽略図（図-1）

3) 流量，傾斜板形式，場のレイノズル数

流量は，500 l/h (0.111 cm/s)，1000 l/h (0.222 cm/s)，1500 l/h (0.333 cm/s) の3種類とした。()内は平均上昇流速(表面負荷率)。

傾斜板形式は，整流効果を中心として考えたので垂直に挿入する場合だけに限った。間隔は2 cm, 4cm の2種類で両者とも挿入位置は，下端が D_8 の位置，上端は D_8 の2～3 cm 上方へ達する程度である。

場のレイノズル数算定のための動水半径としては，傾斜板のないとき25 cm，傾斜板のあるときはその間隔の1/2をとった。

以上の関係をまとめると表-1のように示される。

表-1 $Re = UR/\nu$ ，ただし $\nu = 1037 \times 10^{-6} \text{ (cm}^2/\text{s)}$

形式 \ 流速	0.333 cm/s	0.222 cm/s	0.111 cm/s
傾斜板ナシ	803	535	268
90° (4cm)	59	43	22
90° (2cm)	34	22	11

傾斜板形式と Re 数

4) 粒子

陰イオン交換樹脂(アンバーライト)

粒径分布: 200 μ ~ 800 μ + 粉末。比重: 1.11

粒径と静水中での沈降速度の関係は図-2のようである。

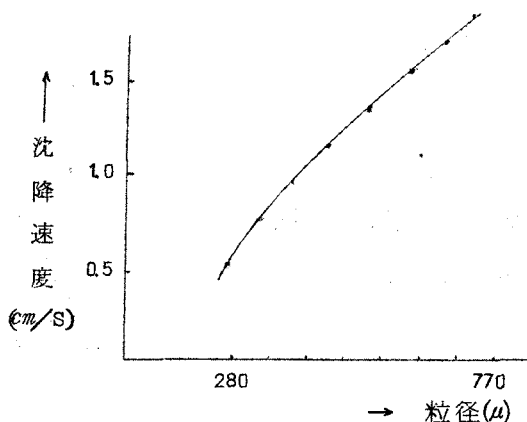
5) 沈降速度の測定

沈降速度の測定は，1 l メスシリンダー中に行ないほぼ等速運動に達したと思われる位置で測定した。蒸留水を使用し，水温は $18.7^\circ\text{C} \pm 0.2$ の範囲であった。

6) 結果および考察

i) 各位置での粒子の沈降速度

図-1で示した11個の採水点から取った粒子について、それぞれの位置ごとに、一粒ずつの沈降速度を測って測定値の大きい方から5個について平均し、各位置ごとに平均の沈降速度を求めた。それは、各位置における変動速度の大きさを現わす一つの指標となり得ると思われる。測定の結果は表-2のようである。



粒径と沈降速度の関係

図 - 2

表 - 2

(単位 cm/sec)

流 量	形 式	C	D ₅			D ₈			D ₁			E
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1500 l/h (0.333 cm/s)	ナシ(I)	1.54	0.92	1.08	1.18	0.89	1.11	1.15	0.68	0.78	1.05	0.83
	ナシ(II)	1.64	0.85	1.08	1.08	0.68	1.01	1.18	0.57	1.17	1.01	0.93
	90°(2cm)	1.60	0.68	0.92	1.13	0.45	0.73	0.95	0.28	0.79	0.97	0.54
	90°(4cm)	1.58	0.61	1.04	1.24	0.34	0.87	1.15	0.40	0.78	0.99	0.63
1000 l/h (0.222 cm/s)	ナシ(I)	1.62	0.60	0.81	0.92	0.70	0.82	1.12	0.65	0.78	0.92	0.54
	ナシ(II)	1.64	0.54	0.92	1.04	0.51	0.91	0.68	0.58	0.75	0.77	0.55
	90°(2cm)	1.70	0.48	0.82	0.98	0.33	0.65	0.88	0.27	0.51	0.53	0.42
	90°(4cm)	1.77	0.46	0.90	0.95	0.29	0.59	0.95	0.30	0.45	0.76	0.43
500 l/h (0.111 cm/s)	ナシ(I)	1.57	0.53	—	0.68	0.67	0.61	0.65	0.73	0.68	0.44	0.36
	90°(2cm)	1.54	0.40	0.76	0.75	0.35	0.58	0.67	0.28	0.40	0.72	0.24
	90°(4cm)	1.57	0.39	0.47	0.70	0.31	0.38	0.63	0.22	0.34	0.50	0.29

注. ナシ(I)は図-1において傾斜板なしでしかも右側3個の越流口を閉じたもの、ナシ(II)は閉じなかった場合に当たる。

ii) 有効水面積比の比較

(有効水面積比) = (平均上昇流速) ÷ (流出部中の粒子の平均沈降速度) × 100, として定義したもので, その関係は表-3の上段に示される。この値が100%に近づくことは, それだけ理想的な沈澱池に近づいて行くことを示している。

表 - 3

	1500 l/h				1000 l/h				500 l/h		
	ナシ(I)	ナシ(II)	90° (2cm)	90° (4cm)	ナシ(I)	ナシ(II)	90° (2cm)	90° (4cm)	ナシ(I)	90° (2cm)	90° (4cm)
有効水面積比	40.1%	35.8	61.7	52.9	41.1%	40.4	52.7	51.6	30.8%	46.3	38.3
水面積比の割合	100%	89	154	132	100%	98	128	126	100%	150	124

傾斜板なし(I)を基準としたときの各有効水面積比の割合を調べたのが表-3の下段に示してある。この割合は, 傾斜板の整流効果を表わす一つの指標となるものと思われる。

i), ii)において得られた関係についてみると, 定性的な解析ではあるが, 次のようなことは云えると思われる。

a) 流出水(II)に含まれている粒子の沈降速度を較べてみれば, あきらかに, 傾斜板を挿入したときの方が大きな粒子の流出がおさえられている。

b) 短絡流の存在がめだつが, これは傾斜板の有無とはあまり関係がないようであり, a)で述べた効果は傾斜板による短絡流の防止とはまた別のものであると思われる。

c) 場の流速が変われば, 傾斜板の効果も変わってくるものと予想していたが, 今回使った流速の範囲ではほぼ同程度の効果となっている。

投与した粒子の粒度分布がおさえられれば, 除去率の関係が, IIの部分に流出してきた粒子の大きさからの推定値と実測値とを比較することからいく

らか定量的な解析ができたと思われる。しかし、粒度分布がうまくつかめなかったため今回の表に加えることができなかったのは残念であった。

4 結 論

沈澱池に傾斜板を挿入したり、その間隔を変えてみることは、装置の流れに対するレイノズル数を変えることになり、それが沈澱池内での流れの場を安定化させる方向に働き、相対的な沈降速度を大きくさせ理想的な沈澱池のそれに近付けることとなるので、同じ表面負荷率に対しても、結果として、大きな沈澱除去率が得られるようになってくるのであると考えられる。

今回の研究においては、乱れの大きさを定量的に測定するような手段がなかったり、流速分布が測ってなかったりのため、説得力に乏しい感じはあるが、2章で述べてきた整流効果に対する理論的な考察にはある程度の裏付けは与えられたと思われる。

この考え方は、傾斜板の効果のみならず、沈澱池に装置される整流板、導流壁と云ったものの沈澱効率改善におよぼす効果の定量化の方向へも応用して行くことができると思われる。

参 考 文 献

1. Levich, V.G. "Physicochemical Hydrodynamics" P.176,

1962

2. Hinze, J.O. "Turbulence" P.67, 1959

3. Lamb, H. "Hydrodynamics" P.639, 1924