

高濃度凝集性粒子群の沈降特性

北海道大学工学部衛生工学科 正会員 丹 保 憲仁
。 学 生 員 宇 土 澤 光 賢

1. はじめに

水処理における固液分離の手法の一つである沈降分離において、高濃度の凝集性粒子群を扱う場合がきわめて多い。例えば活性汚泥処理法の最終沈殿池、上昇流式沈殿池のフロックブランケット、高濃度工業廃水の凝集沈殿池、汚泥処理のシックナー等、多岐にわたる。在来、このような沈殿池における粒子群の沈降性は同一懸濁液のシリンドラ沈降試験の結果により評価するのが通常である。この場合、一般的な解析の基礎としてKynch¹⁾の理論等が用いられているがこの方法は沈降性を濃度の関数として数量化することが出来るのみで、沈降粒子そのものの性質について直接の情報を与えるものではない。等速沈降領域における群沈降速度の算出に体積濃度と単粒子の沈降速度を導入した諸研究があり、特にSteinour²⁾、Richardson³⁾、Leva⁴⁾等の諸式が広く用いられている。しかしながら、これらの諸知見はいずれも非凝集性の分離粒子を母体とする懸濁液についてのものである。凝集性粒子群に対しては、その条件下で最大成長に達した凝集性粒子を原粒子として扱う疑似非凝集条件についてののみ成立するに過ぎない。丹保、穂積等⁵⁾は先にフロックブランケットを構成する凝集性粒子群はその水流条件下で最大成長径に達しており、その挙動は見かけ上非凝集性であることを明らかにしている。したがって、かかる粒子を静置沈降すれば等速沈降区間においてはフロックブランケットの場合と同一の水に対する速度で粒子が沈降することから静置沈降試験でも同一の定常沈降速度をうることも明らかにした。活性汚泥処理法の横流式最終沈殿池や濃縮沈殿池の沈降のパターンは通常、高濃度密度流となって沈殿池の清澄部と濃厚懸濁底層の境界面に流入する流入フロック群が全直方向に沈降しつつ、上方に清澄水を残していく。このような場合、粒子群濃度が極めて高いので成層沈降状態に入った粒子群はその定速沈降速度に対応する最大粒子径に極めて短い時間内で達し、以後疑似非凝集性の沈降パターンを示す。そこで本論ではある粒子径と密度を持った初期粒子が集塊してその粒径を増し、その条件下で得られる沈降速度と平衡するある大きさに達した場合にどのように群沈降特性が変化していくかを明らかにしようとするものである。この場合の平衡フロック径(初期粒子集合数)、平衡フロック密度、平衡沈降速度とフロック強度等の疑似非凝集性粒子の沈降特性を支配する因子間の関係については別報で論じたい。そこで本論では高濃度凝集性粒子群の沈降特性の内ある粒子径と密度をもった凝集性粒子が集塊し、考える沈降条件における平衡フロック径が初期粒子径のある倍率(M倍)に達した場合の群沈降特性を凝集性フロックの密度特性との関連で論じてみることもする。

2. 凝集性粒子の等速成層沈降領域における速度式

成層等速沈降速度の算出に際しそれを構成している単粒子の沈降速度とその体積濃度を考慮したSteinour, Richardson等の式がある。

Steinour の式²⁾

$$w_c = w_t \cdot \varepsilon^2 \times 10^{-1.02(1-\varepsilon)} \quad (1)$$

Richardson の式³⁾

$$w_t = w_t \cdot \varepsilon^{1/n} = w_t (1-C)^{1/n} \quad (2)$$

ここで、 w_t ：体積濃度 C （空隙率 ε ）のときの沈降速度（cm/sec）

w_t ：粒子群を構成する単一粒子の終末沈降速度（cm/sec）

ε ：空隙率（ $=1-C$ ）， $1/n$ ：指数

$1/n$ はレイノルズ数の範囲により次のような値をとる⁴⁾

$$\begin{aligned} Re < 0.2 & \quad 1/n = 4.65 \\ 0.2 < Re < 1 & \quad 1/n = 4.36 Re^{-0.03} \\ 1 < Re < 500 & \quad 1/n = 4.45 Re^{-0.1} \\ 500 < Re < 7000 & \quad 1/n = 2.36 \end{aligned} \quad (3)$$

単一粒子の終末沈降速度 w_t は直径 d_i 粒子の密度を ρ_i ，水の密度を ρ_w とし，フロック形状を正八面体に近似すると次のようにかける。

$$w_t = \frac{4g}{735\mu} (\rho_i - \rho_w) d_i^2 \quad (4)$$

凝集性単粒子の沈降速度は集塊の成長と共に変化する。フロックの強度を変えればフロックの最大成長平衡径が変わり，径が大きくなればフロック構造中に取りこまれる間隙水量が増すのでフロック群の総体積濃度が大きくなり，反対にフロック密度 ρ_i ，フロック間の全空隙率を減少する。したがって群沈降速度の導出にあたっては単粒子の集塊成長に伴う粒子径と粒子密度の変化の関係を考慮に入れて沈降速度の変化を計算するのみならず，個々のフロックの粒子密度変化に対応するフロック粒子間の空隙率の粒径成長による変化をも考慮に入れて式-(1)，(2)等も運用しなければならない。

今，考えている容積 V の中に直径 d_i の粒子が n_i 個存在するならば空隙率 ε_i は次のようになる。

$$\varepsilon_i = 1 - \frac{\pi}{6} n_i d_i^3 \quad (5)$$

直径 d_i の初期粒子が i 個集まって構成されている直径 d_i の i 倍粒子の体積は径 d_i の初期粒子 i 個の体積とフロック形成過程中にフロック内に取り込まれた水の体積 V_w の和であるから

$$\frac{\pi}{6} d_i^3 = \frac{\pi}{6} d_i^3 i + V_w \quad (6)$$

直径 d_i および d_i の粒子の有効密度を ρ_{ei} ， ρ_{ei} として次のように定義する。

$$\rho_{ei} = \rho_i - \rho_w, \quad \rho_{ei} = \rho_i - \rho_w \quad (7)$$

ここで， ρ_i ：直径 d_i のフロックの密度（g/cm³）， ρ_i ：直径 d_i のフロックの密度（g/cm³）

ρ_w ：水の密度（g/cm³）

したがって i 倍粒子の重量は

$$\frac{\pi}{6} d_i^3 (\rho_{ei} + \rho_w) = \frac{\pi}{6} d_i^3 i (\rho_{ei} + \rho_w) + V_w \cdot \rho_w \quad (8)$$

式-(6)，(7)，(8)より

$$d_i^3 \rho_{ei} = i d_i^3 \rho_{ei} \quad (9)$$

また有効密度 ρ_{ei} は丹保，渡辺⁷⁾によって定義されたフロック密度関数のように粒径と共に変化する。

$$\rho_{ei} = a / (d_i)^n \quad (10)$$

ここで、 α , K_g :凝集剤, フロック形成助剤の種類とその添加量等の凝集条件によって決まる定数。
式-(10)を式-(9)に代入して

$$d_i^3 \alpha / (d_i/d_1)^{K_g} = i d_1 \alpha / (d_1/d_1)^{K_g}$$

$$d_i^{3-K_g} = i d_1^{3-K_g}$$

ゆえに、 i 倍粒子の直径と d_1 粒子の直径の間には次の関係が成立する。

$$d_i = i^{\frac{1}{3-K_g}} d_1 \quad (11)$$

式-(5)に式-(11)を代入すると

$$\varepsilon_i = \left[1 - \frac{\pi}{6} n_i \left(i^{\frac{1}{3-K_g}} d_1 \right)^3 \right] = \left[1 - \frac{\pi}{6} \cdot \frac{n_i}{i} \left(i^{\frac{1}{3-K_g}} d_1 \right)^3 \right]$$

$$= \left[1 - \frac{\pi}{6} n_i d_1^3 \frac{1}{i} \left(i^{\frac{1}{3-K_g}} \right)^3 \right] \quad (12)$$

$$\text{ただし, } n_i \cdot i = n_1 \quad (13)$$

ここで、 n_1 , n_i :それぞれ1倍粒子、 i 倍粒子の単位体積中の個数。

また、初期において空隙率 ε_1 は

$$\frac{\pi}{6} n_1 \cdot d_1^3 = 1 - \varepsilon_1 \quad (14)$$

よって i 倍粒子の生じた時の空隙率 ε_i は式-(12), (14) から

$$\varepsilon_i = 1 - (1 - \varepsilon_1) \frac{1}{i} \left(i^{\frac{1}{3-K_g}} \right)^3 \quad (15)$$

式-(15)より

$$i = \left(d_i/d_1 \right)^{3-K_g} \quad (16)$$

式-(16)を式-(15)に代入して整理すると、 i 倍粒子群の空隙率 ε_i は

$$\varepsilon_i = 1 - (1 - \varepsilon_1) (d_i/d_1)^{K_g} \quad (17)$$

ここで、 $d_i/d_1 = M$, $1 - \varepsilon_1 = C_0$ とおくと

$$\varepsilon_i = 1 - C_0 M^{K_g} \quad (18)$$

したがって群沈降速度 u_i は式-(2), (4), (18) より次のようになる。

$$u_i = \frac{4g}{135\mu} (\rho_i - \rho_w) d_i^2 \cdot \varepsilon_i^{1/2}$$

$$= K \cdot \varepsilon_i \cdot d_i^2 (1 - C_0 M^{K_g})^{1/2} \quad (19)$$

ただし、 $K = 4g/135\mu$

また、式-(9) より

$$\rho_i = i (d_i/d_1)^3 \rho_i = i M^3 (\rho_i - \rho_w) \quad (20)$$

式-(16)を式-(20)に代入して整理すると

$$\rho_i = M^{K_g} (\rho_i - \rho_w) \quad (21)$$

式-(21)を式-(19)に代入すると求める群沈降速度 u_i は最終的に次のような式でえられる。

$$u_i = K \cdot M^{K_g} (\rho_i - \rho_w) d_i^2 (1 - C_0 M^{K_g})^{1/2} = K' (1 - C_0 M^{K_g})^{1/2} M^{3-K_g} d_1^2, \quad \{\text{cm/sec}\} \quad (22)$$

ここで、 $M = d_i/d_1$, $K' = \frac{4g}{135\mu} (\rho_i - \rho_w)$, $C_0 = 1 - \varepsilon_1$

したがって単位面積、単位時間に沈降除去することの出来る粒子量(沈降FLUX) F は次式で示される。

表-1 フロック単粒子の Reynolds 数

ALT比	1:20	1:10	1:5	1:2.5	1:1.5	1:1.0
d_i (mm)	100	200	500	1000	2000	4000
ρ_i (g/cm ³)	0.110	0.082	0.023	0.0088	0.0033	0.0013
V (cm/sec)	0.008	0.009	0.018	0.025	0.048	0.082
$Re - N$	0.008	0.02	0.08	0.24	0.8	2.3

ALT比	1:10	1:5	1:2.5	1:1.5	1:1.0	1:0.5
d_i (mm)	100	200	500	1000	2000	4000
ρ_i (g/cm ³)	0.181	0.065	0.017	0.005	0.018	0.0097
V (cm/sec)	0.005	0.007	0.012	0.018	0.022	0.032
$Re - N$	0.005	0.02	0.08	0.2	0.5	1.3

ALT比	1:30	1:15	1:7.5	1:4	1:2.5	1:1.5
d_i (mm)	100	200	500	1000	2000	4000
ρ_i (g/cm ³)	0.17	0.080	0.031	0.015	0.007	0.003
V (cm/sec)	0.003	0.009	0.022	0.043	0.082	0.157
$Re - N$	0.003	0.02	0.08	0.2	0.5	1.3

ALT比	1:20	1:10	1:5	1:2.5	1:1.5	1:1.0
d_i (mm)	100	200	500	1000	2000	4000
ρ_i (g/cm ³)	0.18	0.083	0.018	0.007	0.003	0.0012
V (cm/sec)	0.005	0.007	0.014	0.021	0.033	0.085
$Re - N$	0.005	0.02	0.07	0.2	0.7	2.2

ALT比	1:1	1:0.5	1:0.25	1:0.15	1:0.1	1:0.05
d_i (mm)	100	200	500	1000	2000	4000
ρ_i (g/cm ³)	0.37	0.15	0.025	0.0073	0.0023	0.0018
V (cm/sec)	0.011	0.017	0.018	0.022	0.028	0.038
$Re - N$	0.01	0.03	0.09	0.2	0.5	1.1

ALT比	1:1	1:0.5	1:0.25	1:0.15	1:0.1	1:0.05
d_i (mm)	100	200	500	1000	2000	4000
ρ_i (g/cm ³)	0.30	0.18	0.023	0.0073	0.0024	0.0018
V (cm/sec)	0.008	0.012	0.017	0.022	0.028	0.038
$Re - N$	0.008	0.02	0.08	0.2	0.8	1.5

ALT比	1:1	1:0.5	1:0.25	1:0.15	1:0.1	1:0.05
d_i (mm)	100	200	500	1000	2000	4000
ρ_i (g/cm ³)	0.035	0.0085	0.0018	0.0003	0.00003	0.00001
V (cm/sec)	0.001	0.0011	0.0018	0.0014	0.0017	0.002
$Re - N$	0.001	0.002	0.006	0.014	0.07	0.16

ALT比	1:1	1:0.5	1:0.25	1:0.15	1:0.1	1:0.05
d_i (mm)	100	200	500	1000	2000	4000
ρ_i (g/cm ³)	0.084	0.0023	0.0073	0.0028	0.0011	0.00032
V (cm/sec)	0.0018	0.0028	0.0053	0.008	0.013	0.023
$Re - N$	0.002	0.005	0.08	0.08	0.3	1.2

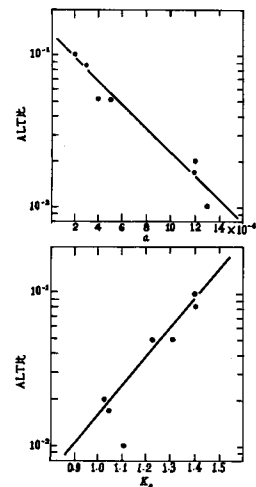


図-1 ALT比と密度関数の定数 α , K ,
(参考文献(8)より引用)

$$F = \omega_c (1 - \varepsilon_i) \varepsilon_i = K' (1 - C_0 M)^{\frac{1}{n}} M^{2-K_F} d_i^2 C_0 M^{K_F} M^{-K_F} (P_1 - P_w) \\ = K' (1 - C_0 M^{K_F})^{\frac{1}{n}} M^{2-K_F} d_i^2 C_0 (P_1 - P_w) = \omega_c C_0 (P_1 - P_w), \quad (23)$$

上述の式-(22), (23) で示されるように凝集性懸濁液の沈降速度, 沈降除去量は単粒子の沈降速度と空隙率の変化の両者を考慮して集塊の効果を評価しなければならない。

丹保, 渡辺⁹⁾が先に明らかにした凝集性単粒子沈降速度のフロック成長による変化の関係式によればフロック密度指数の指数 K_F が2より小さい場合には常に粒径の増大が沈降性の改善をもたらすことを示している。しかしながら, 高濃度の凝集性粒子群にあっては沈降性に影響する大きな空隙率の減少が粒径の増大に伴って生じて, 必ずしも粒径の増大が沈降性の改善につながる場合が考えられる。そこでフロック粒径の増大と粒子沈降量の関係も次のように吟味してみることにする。

粒径の増大による単粒子沈降速度の増加と空隙の減少と相反する二つの傾向の平衡の上で最大の沈降速度 ω_c maximum, したがって最大沈降フラックス F maximum を与える粒子の成長条件があるならば次のようなフラックス F の変化量が0となる極値があるはずである。

$$dF/dM = K' d_i^2 C_0 (P_1 - P_w) (1 - C_0 M^{K_F})^{\frac{1}{n}-1} \{ M^{K_F} (2 - K_F) - C_0 (2 + K_F (\frac{1}{n} - 1)) \} \quad (24)$$

式-(24) から $dF/dM = 0$ となる極値は次のいずれかの場合である。

$$1 - C_0 M^{K_F} = 0$$

$$\text{あるいは } M^{K_F} (2 - K_F) - C_0 (2 + K_F (\frac{1}{n} - 1)) = 0$$

ところが, $1 - C_0 M^{K_F} = 0$ はフロック群が全沈降容積を占めてしまうような状態すなわち, ゲル化したフロイドで粒子間空隙率が零になる突なので現実には考慮する必要がない。したがってある濃度 C_0 の粒子群の最大フラックスを与える粒子成長倍率 M は極値条件の後者から次のように与えられる。

$$M = \left\{ \frac{2 - K_F}{C_0 (2 + K_F (\frac{1}{n} - 1))} \right\}^{\frac{1}{K_F}} \quad (25)$$

参考のために Steinar の式-(1)を用いて前述の手順で沈降パターンを求めてみると次のようになる。

$$\omega_c = K d_i^2 M^{2-K_F} (1 - C_0 M^{K_F})^2 10^{-1.82 C_0 M^{K_F}} \quad (26)$$

$$F = \omega_c C_0 (P_1 - P_w) \quad (27)$$

沈降フラックスが最大になる成長倍率 M の値は

$$M = \left(\frac{2 + K_F + A - \sqrt{(2 + K_F)^2 + 6 A K_F + A^2 - 4 A}}{2 A C_0} \right)^{\frac{1}{K_F}} \quad (28)$$

ここで, $A = 1.82 K_F \log 10$

しにがって凝集性高濃度沈降現象では式-(25), (28)等では最大沈降除去速度を与える粒子径にまでフロックを成長させるような凝集条件(フロック強度等)を選定すれば最も速やかに粒子群の沈降除去を行うことが出来る。さらにこの最適成長度 M を越えて過大にフロックを成長させれば沈降性はかえって損なわれることになる。

3. 沈降特性曲線

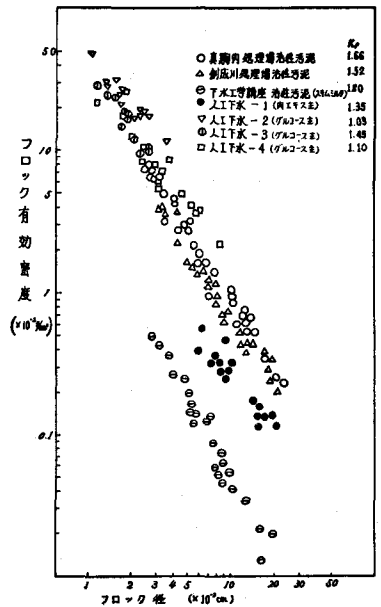


図-2 凝集性汚泥の有効密度とフロック径

この現象はフロック密度関数の指数 K_F およびフロック濃度 C_0 等の関数であり、沈降速度の制御のためには最大値前後の粒径変化に伴う沈降性の変化の状態も上述の変数をパラメータにしてさらに詳細に知る必要がある。そこで実際に遭遇するような諸状態を想定して次に沈降フラックスの変化状態を示す特性曲線を式-(23), (27)等によって求めてみることにしよう。

ここでは、代表例として粘土アルミニウムフロックと活性汚泥フロックの両者を対象物質として沈降速度、沈降フラックスと成長度に関する曲線を次のような手順で描いてみた。

a) Richardson の式の指数決定

式-(2)の指数 n は単粒子の終末沈降速度 w_t とその径 d に関する Reynolds 数 $Re = w_t \cdot d / \nu$ によって定められ、Richardson 等によれば式-(3)のような値をとる。渡辺⁷⁾、宇土澤⁸⁾の実測結果を用いて実用の範囲での単粒子沈降速度を求めて Reynolds 数を計算したのが表-1である。この結果、Reynolds 数はほとんどが1以下であるから、指数 n は式-(3)より $n = \frac{1}{2} (4.65 + 4.36) = 4.5$ を使用することにした。

b) フロック密度関数の指数 K_F の範囲

フロック密度関数の指数 K_F はフロックが集塊成長していく際に間隙水を取り込んで有効密度を減じ見かけ体積を増大していく程度を示す数値である。粘土アルミニウムフロックの K_F 値は図-1のように凝集条件により $K_F = 1.0 \sim 1.5$ 程度の値をとる⁹⁾。活性汚泥の有効密度とフロック径の関係すなわち密度関数は図-2に示されており、 $K_F = 1.0 \sim 1.8$ と活性汚泥の状態によって大きく変化している。すなわち、バルキング状態の活性汚泥の場合 K_F 値は大きく一方、良く馴化された人工下水(グルコースあるいは肉エキス)活性汚泥では K_F 値は小さくなっている。

c) 計算のための標準径の設定

粘土アルミニウムフロックについて密度関数の成り立つ最小半径は丹保、渡辺の研究により $D > 10 \sim 20 \mu m$ とされているが、活性汚泥の場合は原粒子の真密度が不詳であるためその最小適用限界を明らかにしていない。したがって実測の結果から式-(10)の関数形が成立することが保証されている $D_1 = 100 \mu m$ を一応標準径すなわち $M = 1$ の計算のベース径にとって式を運用することとする。さらに両者の比較の容易のために、粘土アルミ粒子も $D_1 = 100 \mu m$ を一応の標準径とした。実測値(表-1, 図-2)を参照して活性汚泥では $D_1 = 100 \mu m$ の密度 ρ を1.03, 1.30の2水準、密度関数の指数 $K_F = 2.5$ とした。粘土アルミニウムフロックではA/L/T比により表-1, 図-1から $D_1 = 100 \mu m$ の密度 ρ をすべての場合について $1.17 g/cm^3$ とし、密度関数の指数も $K_F = 1.4, 1.3, 1.17, 1.03$ の4水準とした。

d) 計算の濃度条件と粒径条件

等速成層沈降をする体積濃度の範囲は単粒子密度によって異なるが通常、 $10^2 mg/l \sim 10^4 mg/l$ ぐらいの範囲であると考えられる。ここではいずれの場合をも包括しうものとして $100 mg/l \sim 200 mg/l$ の範囲に重量濃度($S.S$)を変化させて計算、作図を行った。

一方粒子倍数 M の範囲としては通常の濃度のフロックを扱う場合に実際に問題となるであろう粒径の範囲を想定して標準粒子 $100 \mu m$ ($M = 1$)の0.1倍($10 \mu m$)から400倍($400 \mu m$)までの間を一応の計算対象とした。式-(23), (27)に従って上述の変数範囲で計算を行い両対数グラフの横軸に粒子径 D (粒子倍数 M)を、縦軸に沈降フラックス F をとり重量濃度($S.S$)をパラメータとして沈降特性を描いたものが図-3である。

また、上述のようにして描いた図から等沈降フラックスを与える粒子径 D (粒子倍数 M)と重量濃度 (SS) も求め、横軸に粒子径 D (粒子倍数 M)も、縦軸に重量濃度 (SS) もと等沈降フラックスをパラメータとして描いた沈降特性図が図-4, 5, 6, 7, 8, 9, である。なお図-10は $S_{teinson}$ の式も適用した場合である。

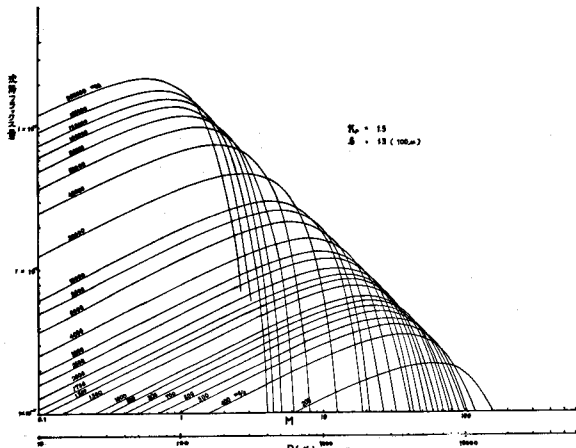


図-3 フロック径と沈降量

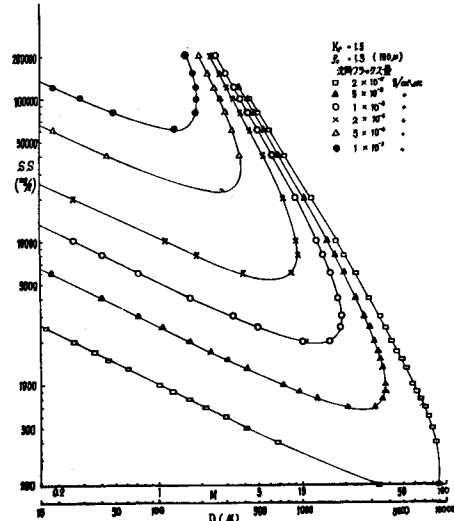


図-5 濃度とフロック径

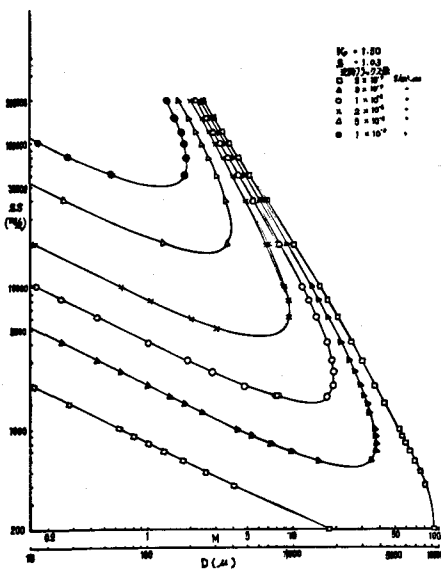


図-4 濃度とフロック径

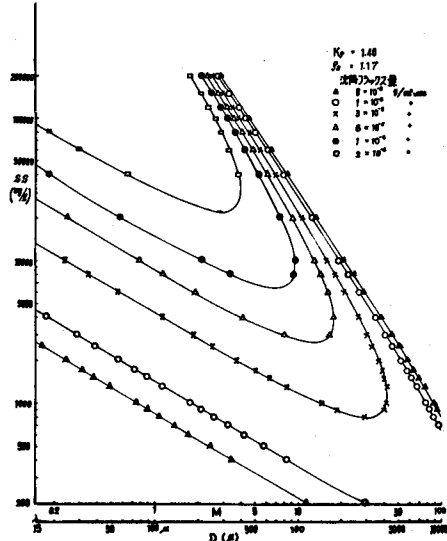


図-6 濃度とフロック径

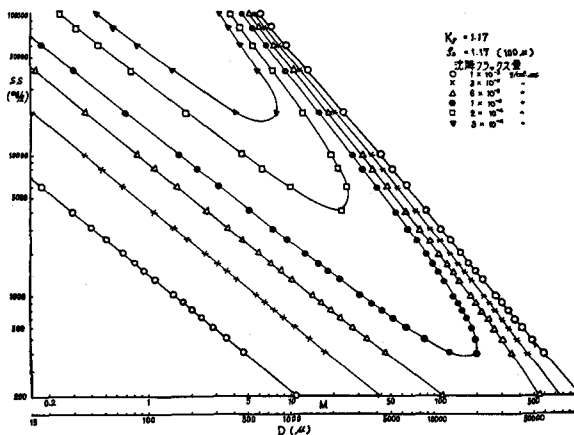


図-7 濃度とフロック径

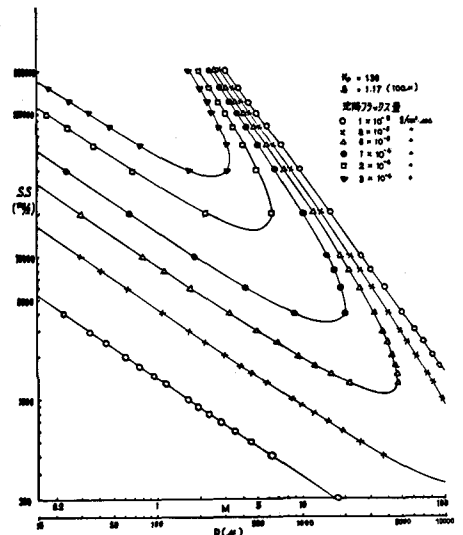


図-9 濃度とフロック径

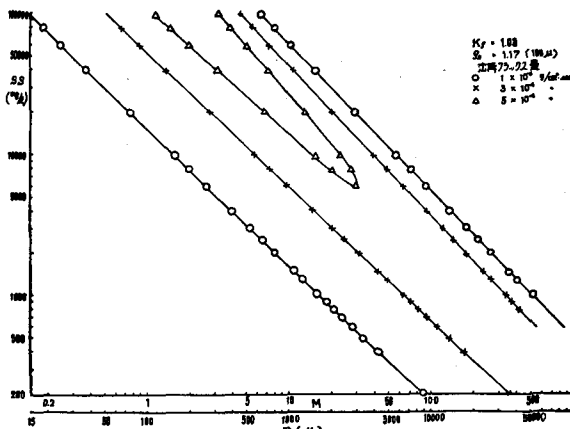


図-8 濃度とフロック径

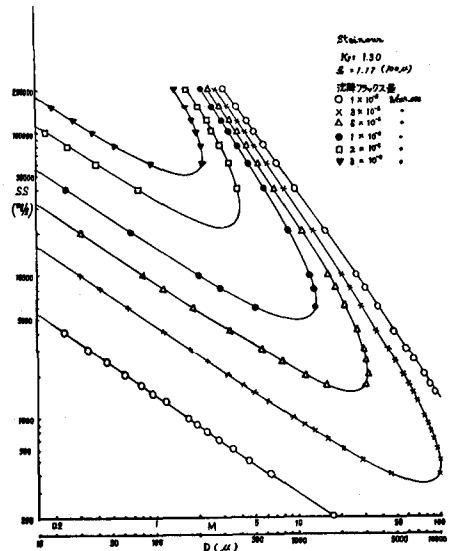


図-10 濃度とフロック径 (Steinour)

4. 考察

上述のような諸式および計算の結果得られた特性図から次のような凝集性粒子群の等速成層沈降領域における特性が明らかとなった。

- (1) 同一濃度の粒子群の場合、沈降速度および沈降フラックスが最大となる粒径が存在する。
 - (2) 同一濃度の粒子群の場合、沈降フラックスが最大となる粒径は濃度が低ければ低い程大きい。
- 濃度と最大沈降速度を与える粒径の間には両対数図上で右下りの直線関係がある。この状態は密度関数の指数 K_f が同じであれば濃度、粒子の初期有効密度等に関係なく沈降フラックス、沈降速度が最大となる粒径の時の空隙率は同一であるという関係を生ずる。したがって低濃度の粒子群の場合にはフロク強度を大とするような凝集条件を選定し、数 mm に達するまではフロクを大型化することによ

って沈降性を増大しうる。しかし数万 mg/l におよぶ高濃度ではフロック径を数百 μm 程度にとどめなければならない。

(3) 最大沈降フラックスを与える径を越えてフロックを大型化すると急激に沈降速度、フラックスが低下するので過大成長はきわめて危険である。

(4) 一般に凝集性粒子群の沈降性の改善をはかる場合には最大フラックスを示す粒径よりも初期粒径が小さい場合は集塊成長をはかって最大フラックス径に近ずける。一方最大フラックス径より粒径が大きい方の側に初期粒径がある場合、なんらかの方法で粒径を下げる必要がある。

(5) 濃縮槽のような沈降の終期に大きな濃度のあらわれてくる場合には粒子径を高濃度域を考慮して定めなければならない。この場合高濃度域における前述(3)のフラックスの急低下が生ずる以前の径に粒径をとどめることが必要である。

(6) 凝集性粒子群の場合には粒子の有効密度がきわめて大きく沈降フラックス量を左右するので粒子径を小さくしても密度を上げうるような方法(例えば、上水汚泥のアルミニウムストリッピング)等が有効な手段となる場合がある。

終りに適切な助言をいただいた当教室高桑哲男助教授に感謝する。

参考文献

- 1) Kynch, G. J. : A theory of Sedimentation. Trans. Faraday Soc., vol. 48, P. 166, 1952
- 2) Steinhour, H. H. : Rate of Sedimentation, Ind. Eng. Chem. vol. 36. No 7. P. 618, 1944.
- 3) Richardson, J. F. and R. A. Meikle : Sedimentation and fluidisation III, Trans. Instr. Chem. Engrs., vol. 39, No. 5, P. 348, 1961.
- 4) Leva, M., et al : Introduction to Fluidization. Chemical Engineering progress, Vol. 44, No. 7, P. 511, 1948
- 5) 丹保, 穂積, 福原 : 上昇流式沈降池におけるフロックグラデーションの挙動(III), 水道協会誌, 第425号, P. 18, 昭和45年2月
- 6) 土木学会編 : 水理公式集(昭和46年改) P. 414
- 7) 丹保, 渡辺. etc. : アルミニウムフロックの密度に関する研究(I), (II), (III), 水道協会誌, 第397号, P. 2, 昭和42年10月, 第410号, P. 14, 昭和43年11月, 第445号, P. 2, 昭和46年10月.
- 8) 丹保, 穂積, 渡辺 : フロキュレートの合理的設計(I), 水道協会誌, 第431号, P. 20, 昭和45年8月
- 9) 宇正澤 : 北海道大学修士論文, 昭和45年3月