

凝集沈降に関する基礎的研究

九州大学工学部 正 員 栗谷 陽一
同 同 楠田 哲也
同 学生員 口古賀 憲一

1. まえがき 横流式沈降池および、最終沈降池内におけるフロックの成長現象は攪拌槽内でのフロック形成過程でのフロックの捕捉、曝気槽内での基質除去等と共に水処理のプロセスにおいて重要な役割を占めている。沈降池内での凝集沈降特性はフロック群の粒度分布、沈降速度、物理化学的性質、池内での流動特性等に左右され、沈降池内での除去特性がろ過池での捕捉状態や下水放流水質に影響を与える。凝集性を有する粒子群の沈降特性に関する研究は丹保らによって成され、工学的適用に対する簡便な方法が提案されている。フロック形成の条件による粒度分布、沈降速度、密度変化等を考慮に入れた考察は未だ成されていない。沈降池及び最終沈降池内の凝集沈降現象と明らかにする意味で、まず静水中での凝集沈降に関するシミュレーションを考えた。実験は粘土フロックを用い、粒子群の粒度分布を変える意味で攪拌強度を変化させたものを行ない、数値実験との簡単な比較を行なってみた。

2. 計算方法 沈降成長は一般に三次元の現象であり、粒子濃度が低い (A): 沈降筒内の初期粒度分布

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial m_i}{\partial x} = \sum_j \alpha \cdot m_{ij} \cdot n_j \frac{\pi}{4} \cdot (d_{ij} + d_j)^2 \cdot |u_{ij} - u_j| - \sum_k \alpha \cdot m_{ik} \cdot n_k \frac{\pi}{4} \cdot (d_i + d_k)^2 \cdot |u_i - u_k| \quad (1)$$

上式において m_i , u_i , d_i は各々単位体積当りの粒子個数、沈降速度、粒径である。 α は Camp の衝突効率に対する補正係数である。上式を計算する際、差分法を用いると時間、粒径を差分化したための著しい誤差が生じる²⁾。従って著者は、(1) で示される三次元の現象を一次元化して考えた。まず、ある断面積 A [L²] を持つ円柱を考え、この円柱内に存在する全粒子を、そのレベルを保ち、円柱の中心線上に集める。この操作により式(1)は下式の如くなる。

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial m_i}{\partial x} = \sum_j \alpha \cdot m_{ij} \cdot n_j \frac{\pi}{4} \cdot \frac{(d_{ij} + d_j)^2}{A} \cdot |u_{ij} - u_j| - \sum_k \alpha \cdot m_{ik} \cdot n_k \frac{\pi}{4} \cdot \frac{(d_i + d_k)^2}{A} \cdot |u_i - u_k| \quad (2)$$

ここで $m_i = m_i \cdot A$ である。以上の事により、一線上に配置された粒子を沈降させ、粒子が同一レベルに並んだ時点で「見かけ上の衝突係数」 $(d_{ij} + d_j)^2/A$ ($0 < (d_{ij} + d_j)^2/A < 1$) を考慮して、衝突するかしないかを判定する事が可能となる。衝突すれば合体させ、しなければ通過させる。この際「見かけ上の衝突係数」を 1 と仮定すると、考えている円柱の断面を埋めつくすフロックが存在する事を意味するので、三次元的な振りを考える事ができなくなる。(F): 従って空間内に粒子がなかりの粒子間隔を保って存在している条件を満足させるためには制約条件として $(d_{ij} + d_j)^2/A \ll 1$ が課せられる。このような考え方のもとに、著者は粒度分布、粒子配置、見かけ上の衝突係数の決定に乱数を使用し、凝集沈降のシミュレーションを行なった。計算方法の詳細はフローチャートに示している。今回は第 1 段階として、粒度分布が空間的に定常な場合のシミュレーションを行なった。これにより、十分深い所の空間をある長さで取りだして考える事が可能となり、この空間に対しては粒子の

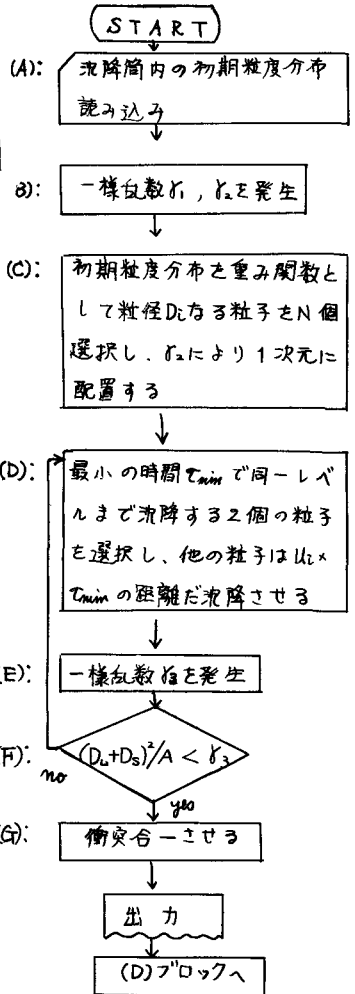


図-1 フローチャート

flux の保存が成立する事になる。従って、考えている空間の最下部を通過した粒子はその空間の最上部から沈降させる事ができ、その空間での粒子総個数の減少は衝突合一のみによって支配される。以上の事から、(2)式を単位長さ当りの代表粒子個数 m_0 、代表流速 u_0 で無次元化を行なうと、次式の如くなる。ただし $\tau = d \cdot \pi \cdot m_0 \cdot u_0$ である。ここで、 $d=1$ とした場合、実験での実験時間 t に対応する無次元化時間 τ の時のシュミレーションから得られる粒度分布は粒子が衝突すれば必ず合一した場合の結果を表わす事になる。

$$\frac{\partial m_i}{\partial \tau} = \sum_j m_{i-j} \cdot m_j \cdot \frac{(d_{i-j} + d_j)^2}{A} \cdot |u_{i-j} - u_j| - \sum_k m_i \cdot m_k \cdot \frac{(d_i + d_k)^2}{A} \cdot |u_i - u_k| \quad (3)$$

沈降速度はストークス式に従うものとして、粒子の成長に伴う密度の減少を考慮した場合とそうでない場合の二通りで計算を行なった。フローチャートのブロック(A)において、初期粒度分布は実験値の個数濃度分布を用いた。ブロック(C)のNは計算時間の制限上100個が200個のいずれかに選んだ。上述の無次元化時間により、 $N=100$ とした時の τ を τ_{100} とし、 $N=200$ とした時の τ を τ_{200} とすれば $\tau_{100} = \tau_{200}$ となる。ブロック(B)のAは計算時間の都合上 $A=3 \cdot D_{max}^2$ (D_{max} は初期条件下での最大径)となるように与えた。

3. 実験装置及び方法 装置図は図-2の如くである。沈降筒(A)は $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 10\text{cm}$ のアクリル製の角筒である。気温と水温との温度差による対流が生じないように実験は恒温室で行ない、ストロボ、人体の熱源等の影響を避けるために角筒(B)により二重構造になっている。(C)の部分には径 $7 \sim 8\text{mm}$ の鉛の散弾を充填する事により、ジャーテスタ内からの流入水の整流を行ない、初期のパイプスケールの乱れを消した。これにより、30秒も経過すれば、十分鉛弾のスケールの乱れは消散した。実験方法として、まずジャーテスタの

に所定量のカオリン、アルギン酸ソーダ、硫酸バンドを添加後、所定量の攪拌強度で10分間、急速攪拌を行なう。フロック形成終了後、沈降筒に流入させる。(B)を開じた時点を実験開始時刻とする。初期粒度分布は筒内に設けたしきり板と壁との間にあるフロック群を近接撮影する事により求めた。近接撮影はベローズと望遠レンズとの併用によってある程度の倍率及び焦点深度が得られるようにしてある。粒子の沈降速度を求めるために、2秒間隔の近接撮影も同時に行なった。粒度分布は筒の底部の近接撮影により求めた。

4. 実験結果、計算結果及び考察 カオリン濃度15ppm、アルギン酸ソーダ3ppm、硫酸バンド75ppm、攪拌強度をG値で400, 200, 100 sec^{-1} とした時の筒内の初期粒度分布を図-3に示す。縦軸は D_0/D_1 (累加体積/全体積)、横軸はフロック径である。

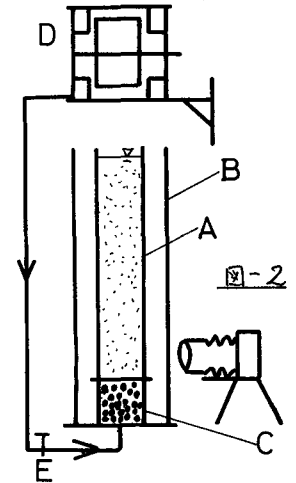


図-2

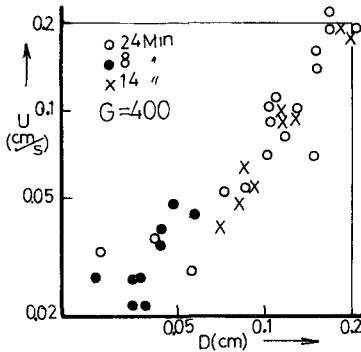


図-4

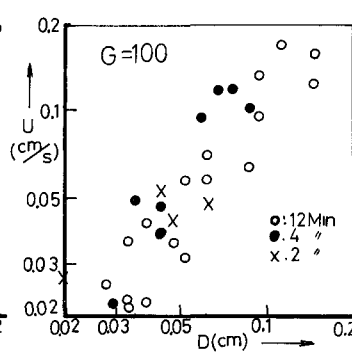


図-5

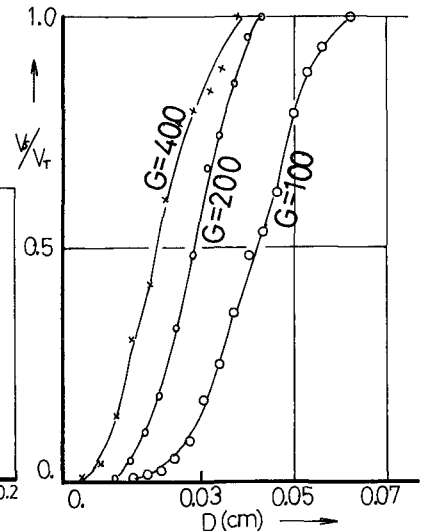
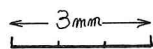
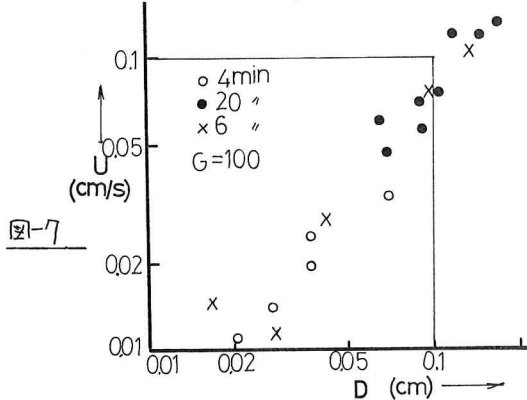
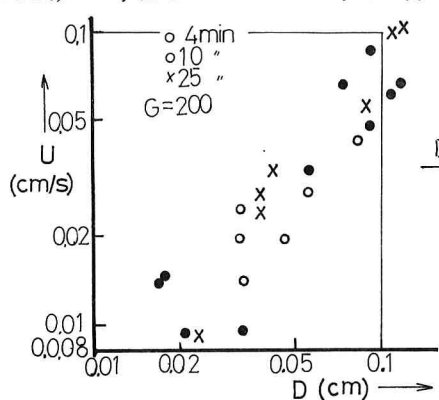
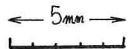


図-3

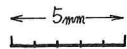
図4,5,6,7(図4,5と図6,7は各々一連の実験結果である。)は沈降速度 U とフロック径 D を表わしたものである。いずれにおいても実験初期からフロック体積濃度がかなり変化しているにもかかわらず U と D は同一直線上にある事から、干渉作用の影響は差程受けてない事が認められる。沈降開始後、2分、4分、6分の時の筒の底部を近接撮影した写真を下に示す。これらの写真より求めた U と D の関係を図-8,9,10に示す。横軸の D は初期の



$G = 400 \text{ sec}^{-1}$



$G = 200 \text{ sec}^{-1}$



$G = 100 \text{ sec}^{-1}$

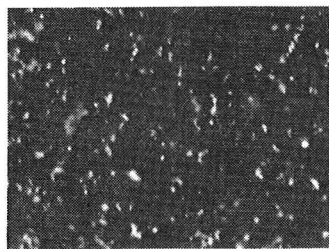


写真-1 2分

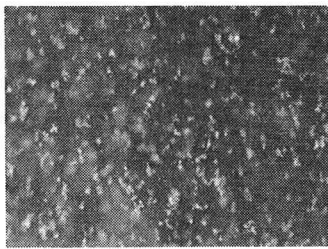


写真-4 2分

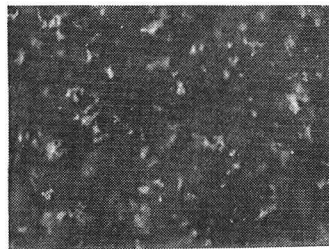


写真-7 2分

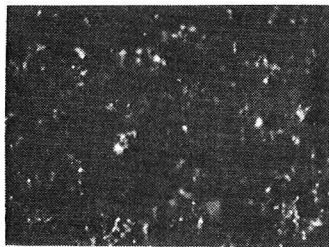


写真-2 4分

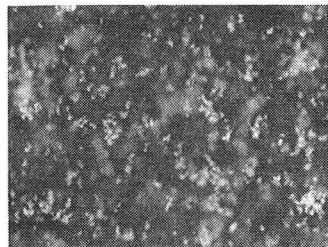


写真-5 4分



写真-8 4分

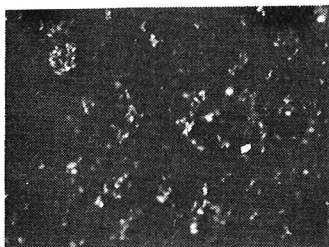


写真-3 6分

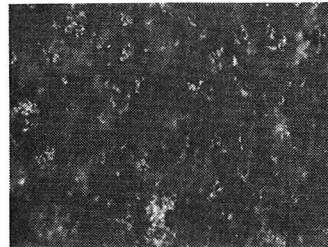


写真-6 6分

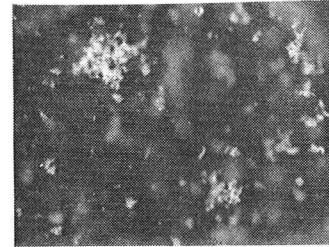


写真-9 6分

最大径で無次元化したものである。図-5の実験から求めた D/D_0 と $\tilde{D}$ との関係は図-7のそれとほとんど差が認められなかった。今回の実験における初期の最大径 D_{max} 、単位体積中の初期粒子個数 n 、フロック体積濃度 V_f 、 D/D_0 が0.5となるフロック径 $d_{0.5}$ を表-1に示す。

表 1	$D_{max}(cm)$	$n(1/cm^3)$	V_f	$d_{0.5}(cm)$
G=400	0.039	321	0.00093	0.021
G=200	0.043	134	0.0012	0.029
G=100	0.063	42	0.0011	0.042

図4~7において、図4,5の差は図6,7の差より大きい。すなわち図-5,7 ($G=100 sec$)を基準とした場合、同一粒

径のフロックでも、ジャーテスト内での攪拌強度が大きい程、それが小さい場合に比して、沈

降速度が小さくなっており、いわゆる

水中でのフロックの見掛け密度が減少

している。この現象はジャーテスト内

で急速攪拌、緩速攪拌を経てフロック

形成を行なう場合、急速攪拌と緩速攪

拌との強度比が大きくなる時、沈降速度とフ

ロック粒径が示す傾向と同様である。この事

はジャーテスト内で急速攪拌により形成され

た基本粒子なるものを考えた場合(今回のそ

れはフロック形成終了時の代表的なフロック

とみなして良い)、急速攪拌の強度が大になる程

基本粒子の粒径が小さくなり、基本粒子の径が小

になる程成長フロックの内部構造がラフになる事を示し

ている。また、ジャーテスト内のフロックに関しては、

攪拌強度比が大になる程、 $u \sim d^n$ とした場合の指数 n の

値が減少する傾向を示しているが、本実験の場合それ程

は変化していないようである。電子計算機によるシミュ

レーションは初期条件として、図-8~10の粒子個数濃度

分布(図中の破線)の初期分布と与えて計算を行なった。

まず始めに行なったのは粒子の沈降速度がス

トークス式に従うとして、さらに粒子の成長

による密度の変化を考慮しない場合である。

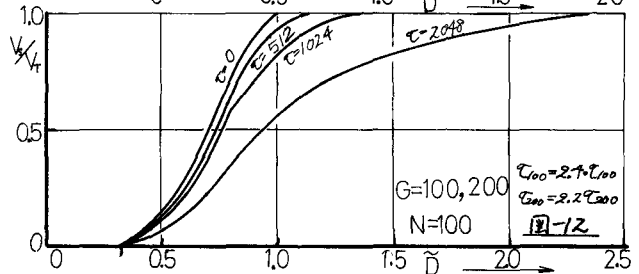
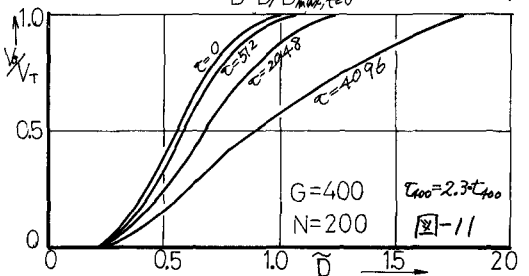
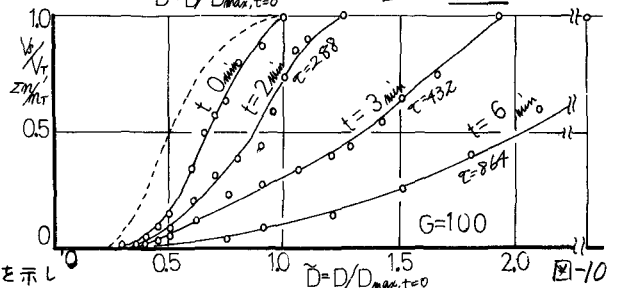
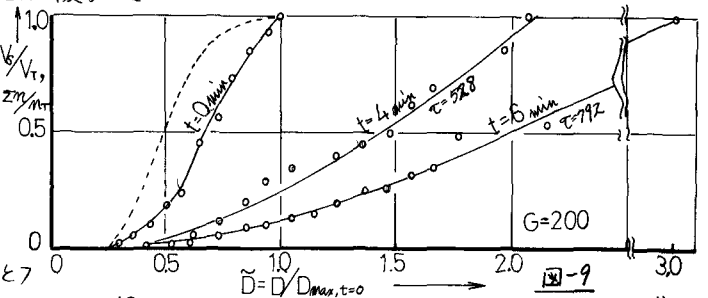
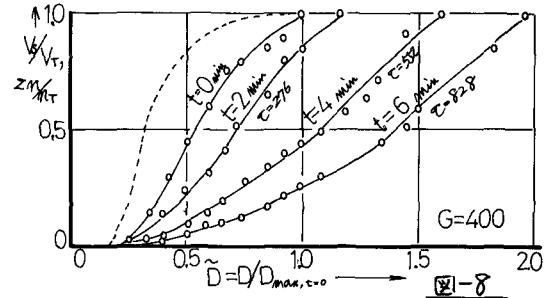
計算結果を図-11, 12に示す。ただし 図-11の

場合のみ、1次元に粒子を配置した場合の総

個数が200個の場合である。個数を100とし

た時の無次元化時間 $\tilde{t}$ と個数200とした時の

$\tilde{t}$ とは前述の如く $\tilde{t} = 2 \cdot \tilde{t}_0$ (0.5が同一とすれば)となる。図-12の計算は図-9, 10において、初期条件の粒子個



10中の値になる。同一の無次元化時間をとった時、実験の最大粒径を含め全粒子径がシュミレーションのそれらより格段に大きい。この事は以下の定義からして矛盾であるが、著者らは二番目の問題点として粒度分布形の形状にも差がある事に注目して検討を加えてみた。すなわ

るシュミレーションの方がそれぞれの曲に比べ大粒子の先走りが著しい。この事は、粒子の沈降成長による密度の減少を考慮していない事が、沈降速度がストークス式に従うという仮定に悪影響を与えているためと考えられる。前掲の図8-10は成長に伴う密度の減少を考慮しなければならぬ事を示唆している。粒子の成長に伴う密度減少を考慮する場合、本質的には沈降成長した

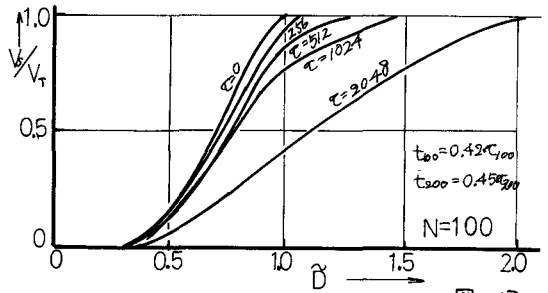


図-13

ブロックに対する構造を知る必要がある。何故ならば、ブロック形成終了時(ジャーテスト内で)のブロック群は粒度分布を有しており、それらのブロック及びそれらの集合体相互に入り混じった状態で沈降成長ブロックが形成される事になり、図-14は以上のプロセスに従った沈降成長ブロックの u, d の集合群を記述しているにすぎないからである。こ

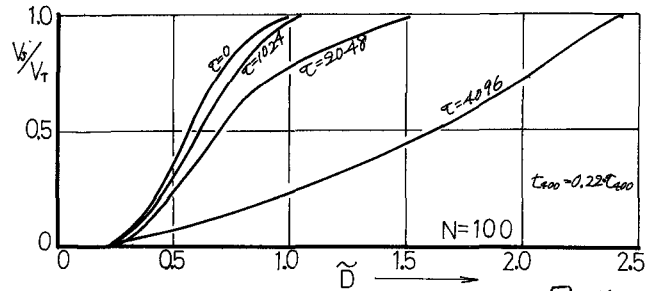


図-14

れらの現象を説明するのは現在の所、困難な課題である。従って著者らは前述の $u-d$ 曲線より、ブロック密度を推定し、密度と粒径の関係より、近似的に質量を求めた。2個の粒子が衝突合へにより成長する場合はまず2個の粒子の質量を求め、それらの質量保存が成立するように粒径と密度曲線から求めた。図15は図4,5,6,7より求めた密度曲線である。本報では粒子が球であるとして、ストークス式より求め、ジャーテスト内の密度曲線も図15のそれと同一であるとした。以上により近似的にはあるが沈降成長に伴う密度変化を考慮して数値計算を行なった結果が図13,14である。初期条件は図11,12と同一である。図13,14の分布形状は図8-10の分布形状に

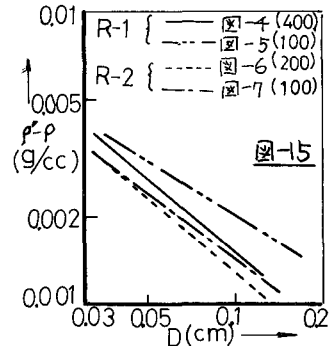


図-15

近づくのが認められる。一方最大粒径は密度変化を考慮しない場合より、同じ7の時を比べると小さくなっている。この事は実験との最大

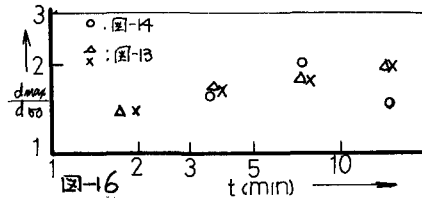


図-16

粒径とを比べると密度変化を考慮した場合、その差がなお小さくなっている事を示している。シュミレーションにおいては密度の減少に伴う粒径

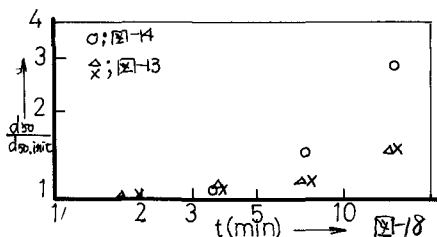


図-17

の増加よりも、沈降速度の減少の方が大きいためと考えられる。沈降開始後の時間 t を横軸にとり、図8-10の粒度分布の最大径 d_{max} と d_50 との比

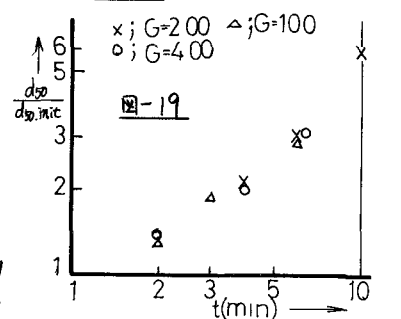


図-18

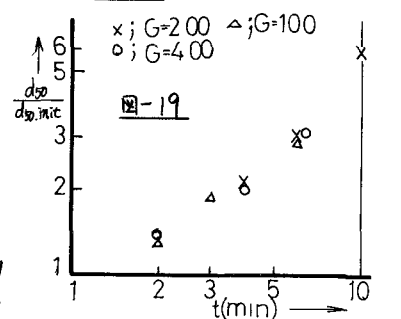


図-19

となる平均径 d_{50} との比 d_{max}/d_{50} と縦軸にとったものが図-17である。図-19は初期の平均径 $d_{50,init}$ と時間 t における d_{50} との比 $d_{50}/d_{50,init}$ と縦軸にとったものである。今回の凝集沈降の実験において、図-17から粒度分布形はほぼ相似形になり、図-19からは初期粒度分布、代表径の絶対値が異なっても、初期粒度分布における平均径と沈降成長した場合の平均径との間には一定の関係を示している様であるが、今回の実験結果の示す傾向が普遍的なものであるかどうか今後検討したい。図-13, 14の計算結果から、図-17, 19と同様にして、 d_{max}/d_{50} , $d_{50}/d_{50,init}$ を図示した結果が図-16, 18である。横軸の時間は前述の α を $\alpha=1$ として求めた実時間である。図-16において、時間 t の増加に対して、 d_{max}/d_{50} が増加している事から、凝集沈降のシミュレーションとして妥当な傾向を示している様である。図-18の $d_{50}/d_{50,init}$ も同様に時間 t に対して増加しているが、図中で右10分の所の $d_{50}/d_{50,init}$ (平均径の増加率) はほぼ14～15であるのに対し、実験結果は図-19よりほぼ2分付近に相当している。この事はシミュレーションにおいて、 $\alpha=1$ としている(すなわち、衝突した粒子が必ず合一するという事になっている)にもかかわらず、実験結果はそれ以上に粒子が衝突合一して大きくなっている事を示し、大きな矛盾である(この事は前述の如く、密度を考慮しない場合も同様の結果を示している)。この事が実験によるものか、シミュレーションによるものかは、前述の実験結果(粒度分布の相似性、平均径の増加率)と更に今後の重要な検討課題である。

最後に、実験結果の撮影等の処理に協力して下さい。技官今地靖君に感謝します。

参考文献

- 1) 内保憲仁：凝集沈降に関する研究，水通協会雑誌，335号 542,3
- 2) 栗名楠田右賀：凝集沈降に関する一考察，土木学会西部支部講演集，846
- 3) 栗名楠田：攪拌条件がフロック密度と沈降速度に及ぼす影響，第25回水通研究発表会講演集 849
- 4) 同上：高分子凝集補助剤を用いたフロッキュレーションに関する研究，第9回衛生工学討論会講演集