

フロックの沈降速度、密度および構造に関する研究

九州大学 正 員 栗谷陽一

九州大学 正 員 楠田哲也

I. まえがき

水処理においてフロック形成を行く際の薬注条件、攪拌条件がフロックの沈降速度、密度およびその内部構造に及ぼす影響は、攪拌池、沈殿池、沙過池の設計に必要な要因となる。既に Lagvanker⁽¹⁾ は、蔗糖液中にフロックを浮べる方法を用いてフロック密度と粒径との関係を求め、等価直径が $1.5mm$ 程度まではフロック径の増加につれて密度が減少し、 $1.5mm$ を越えたとほぼ一定になることを明らかにしている。さらに、丹保ら⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ はばん土中の Al と濁質の重量比 (ALT 比と称している) がフロック径と沈降速度の関係を定めるパラメータであることおよび、ストークスの沈降式を用いフロックを正八面体と仮定して沈降速度とフロック径から密度を求めた結果、フロックの水中での見かけ密度 $\rho - \rho_w$ は、 $\rho - \rho_w \sim d^{K_p}$ (d : フロック径, $K_p \sim 1.2 \sim 1.45$ 程度) となることを明らかにした。しかしながら、フロック重量を直接測定した例や、攪拌条件が沈降速度や密度に及ぼす影響について検討を加えた例は著者の知る範囲では未だ見受けられない。

本研究は、フロック形成時の攪拌条件と薬注条件が沈降速度、密度および内部構造に及ぼす影響について実験的に検討を加え、フロック形成機構やフロックの履歴性についての現象を明らかにし、さらにフロック密度の算定法を提案したものである。

II. 実験装置

フロック形成装置 図-1 参照。槽内でのフロック形成に影響する程度のスケールの乱れが、空間的に極力均一になるように、固定翼を設けさらに回転翼、固定翼共に乱流のミクロスケールに較べ充分大きくとっている。容器は $14cm \times 14cm \times 15.3cm$ (容量 3L) の大きさで、回転翼 (R) は $5cm \times 6cm$ の横長の板を十文字に四枚取付けたものからなっている。固定翼 (S) は $2.5cm \times 5cm$ の板を容器の四隅に回転翼との間隔が $1cm$ 、回転軸との間隔が $1.5cm$ になるように一隅二枚計八枚取付けている。容器底部にはフロックを沈降筒 (G) に降下させるための蓋 (F) を設けている。また、この容器は密封型になっている。

フロック沈降筒 $5cm \times 5cm \times 20cm$ の筒 (G) で内部に物指 (E) を取付け、接写によりフロック径を求めるためと、沈降速度を測るための双方に用いようとした。

フロック径測定装置 接写撮影、および石能投影器 (20倍) を用いた。

フロック重量測定装置 Sartorius 社製ミクロ電子天秤 4/25 型 (最小指示数値 $0.1\mu g$) を用いた。

III. 実験方法

沈降筒の底 B に栓を施し、コック C から蒸留水を沈降筒に滴し、容器 I にも蒸留水を満す。管内水道水 (PH 6.70~6.75, アルカリ度 $42 \sim 45^\circ$) に 72 時間以上蒸留水に浸した炭素カオリン (比重 2.65) を所定量加えたものを原水として A から注入し、所定の攪拌強度で攪拌しながら所定量のばん土 (またはアルギン酸ソーダ 500cp) を注入し、G-T 値として 9000 なる時間経過後にアルギン酸ソーダ (またはばん土) を注入後 10 分目に攪拌強度を変更して 20 分間さらに攪拌を行なう。攪拌強度を変更しない場合には、そのまま 20 分間攪拌を継続する。フロック形成後、A を閉じ B を開く。そして F を開くとフロックが沈降筒内を降下する。フロックが一個筒内に入ったところで F を閉じ沈降中のフ

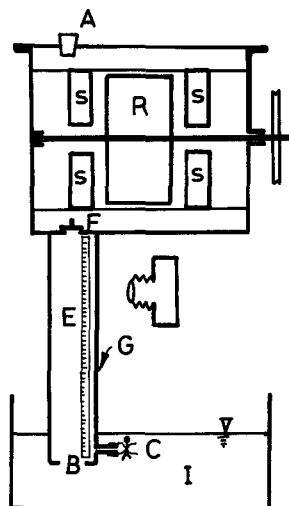
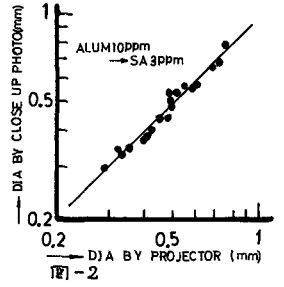


Fig-1 APPARATUS

ックの沈降速度を測定し、フロックを接写する。B を通過したこのフロックをシャーレに受け投影器でフロック径を測定する。その後ピペットでこのフロックを約 $3mm \times 5mm$ のアルミ箔の皿に移し一昼夜 $105^\circ C$ で乾燥後秤量する。

IV. 実験結果と考察

濁度 50mg/l, ばん土注入量 10ppm としてアルギン酸ソーダ (以下 S.A. と称す) を 1ppm ~ 10ppm まで変化させたが、沈降速度および密度とフロック径との関係に差はなかった。凝集後の上澄水附は 6.45 ~ 6.70 の間にあったのでここでは附の影響は無視した。フロック沈降時の接写から求めたフロック径と投影器を用いて求めたシャ-レ上のフロック径の関係は図-2 の如くなるので、フロック径として前者の方法により求めたものを採用した。さらに、同一のフロックの沈降速度と密度を測らなく



ても、多数のフロックの沈降速度と密度とそれぞれ割ればこれらと粒径との関係には差がないことを確かめた。なお、フロック径は長径と短径の単純平均とした。

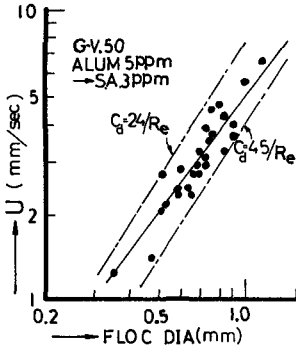


図-3

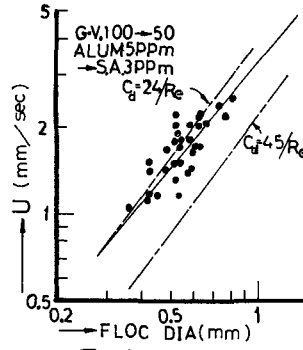


図-4

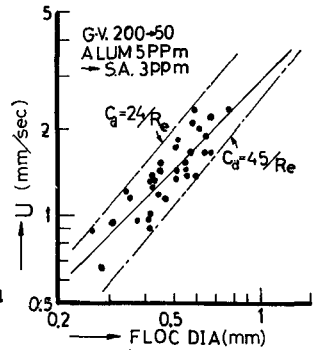


図-5

IV-1 攪拌条件が沈降速度と密度に及ぼす影響

濁度 50mg/l, ばん土 5ppm, S.A. 3ppm として攪拌条件を変化させた場合の沈降速度と粒径あるいはフロック重量と粒径の関係を図3~11に示す。

図3, 9, 10から解るように攪拌強度の大きさに差があっても攪拌強度を変化させないならば沈降速度と粒径の関係はほとんど一致する。一方、攪拌強度の大きさを時間的に変化させ急速攪拌と緩速攪拌を行なった場合、両者の攪拌強

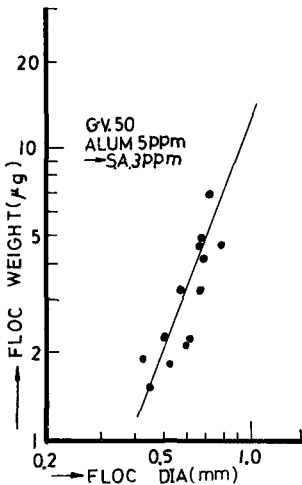


図-6

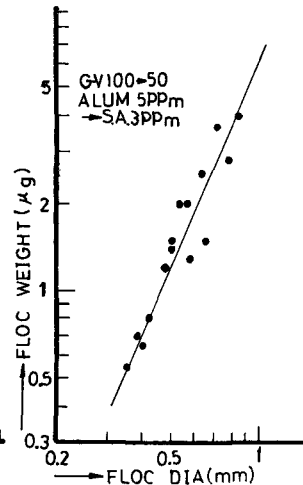


図-7

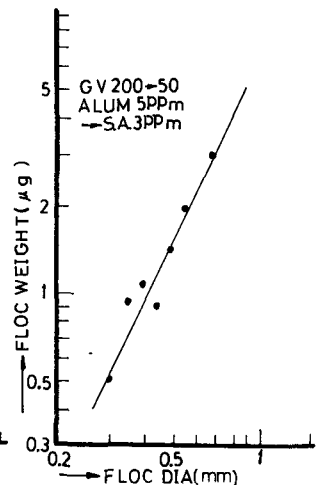


図-8

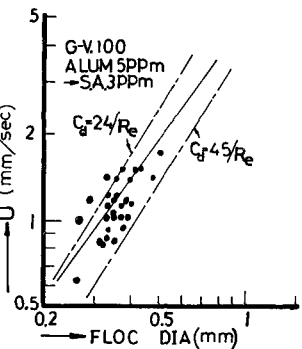


図-9

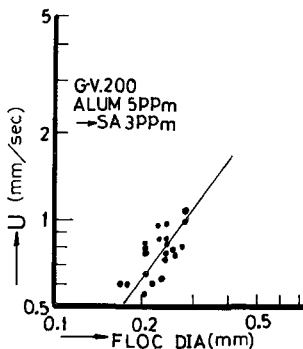


図-10

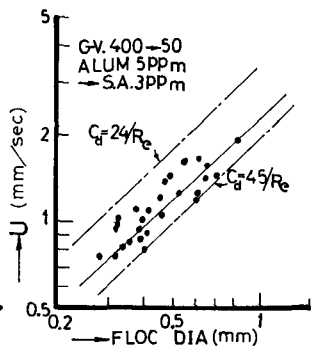


図-11

度の比（以下攪拌強度比と称す）が大きくなるほど、沈降速度と粒径およびフロック重量と粒径の関係を示す回帰直線の勾配は共に緩やかになっている。図3～8、11参照。このことは攪拌強度比が大になるほど、さらに粒径が大になるほどフロックの密度が低下し、そのため沈降速度も小になると考えられる。これは、攪拌強度一定（攪拌強度比1）で形成を行なった場合のフロックの構造（ G 値50, 20分目写真-1, G 値400, 10分目写真-2）と攪拌強度を変化させた場合のフロックの構造（ G 値400→50, 20分目写真-3）とでは、まったく異なっていることから解る。このフロックの内部構造（フロックのある断面の構造）を顕微鏡写真により求め図化した例を図-12, 13に示す。攪拌強度比の差により内部構造がまったく異なっていることが解る。これらの現象は、ばん土の注入量やS.A.の注入量や注入順序を変化させてもまったく同様であり、さらにばん土のみでフロック形成を行なっても同様の結果が得られる。これらの理由として攪拌に対するフロックの履歴性が考えられる。高い攪拌強度から低い攪拌強度に下げた場合（写真-3の G 値400→50）には、元の高い攪拌強度のときの粒子形状がそのまま保たれている。（写真-2, G 値400）すなわち G 値400→50としたときのフロックの基本構成粒子は G 値400のときの粒子である。このことは図-13からも解る。このため、同一粒径の粒子でも攪拌強度比の大きな条件下で形成されたフロックの方が、多数の基本粒子から構成されることになり、密度および沈降速度が小さくなる。さらに、同一攪拌強度比のもとで形成されたフロックでも、粒径の大なる方がより多くの基本構成粒子を含むことになり密度が低下する。

攪拌強度を変化させないで形成したフロックの密度や沈降速度は等しい。粒径ならば同じである。しかし粒径が大になるほど密度は若干減少する。フロック形成過程の粒度分布の時間変化は図-14に示す如く、フロックの成長は全体が徐々に大きくなっており、大粒子のみが先走って大きくなることはない。このことは、攪拌強度を変化させないで形成したフロックでさえ微粒子の体積を1とすれば、 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow \dots$ という型でのフロック形成が行なわれていることを示している。ところがこの様なフロック内に空隙が余り見られないのは、フロック形成の初期においてはフロックは非常にfreshなため乱流下でもまれる効果により団状となりつつ成長限度に到達しその後の攪拌継続にしたがって内部の構

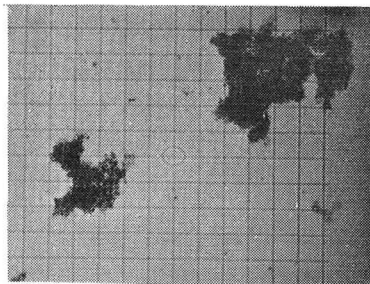
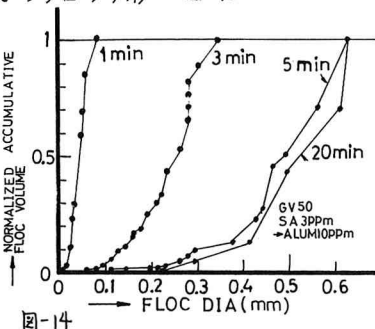
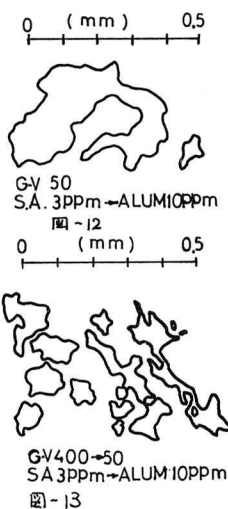


写真-1 Alum 10ppm → S.A. 3ppm $G=50$

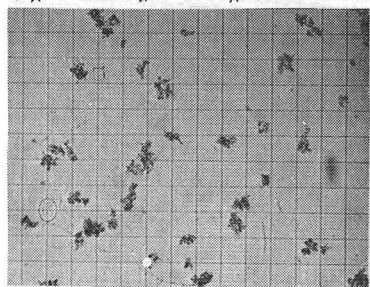


写真-2 Alum 10ppm → S.A. 3ppm $G=400$

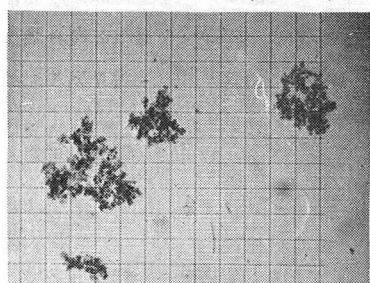
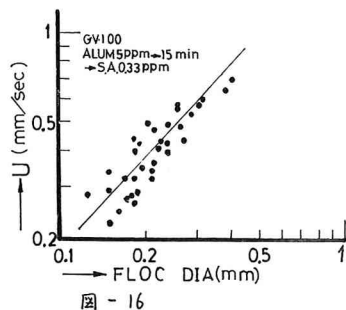
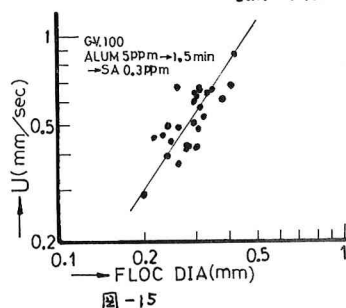


写真-3 Alum 10ppm → S.A. 3ppm $G400 \rightarrow 50$
1 div = 0.16mm

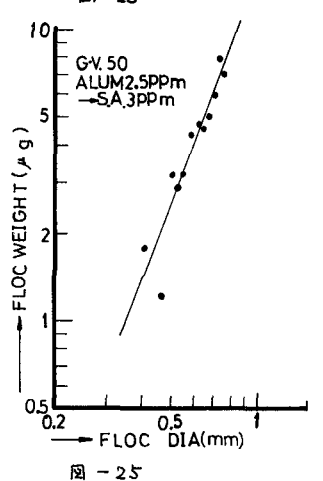
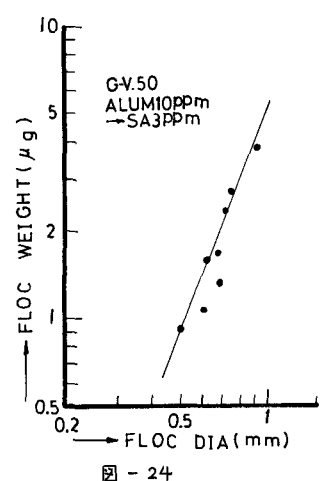
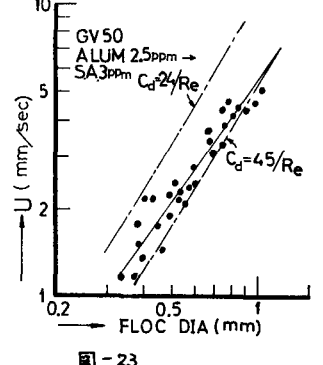
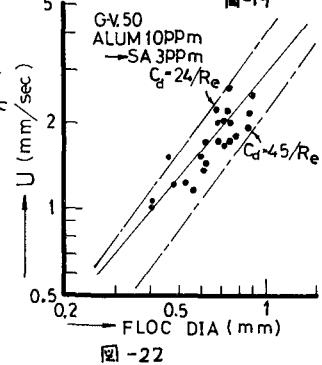
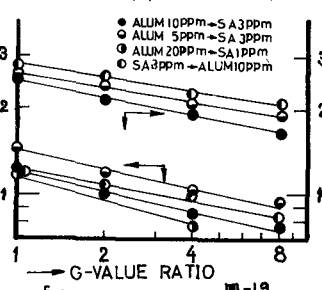
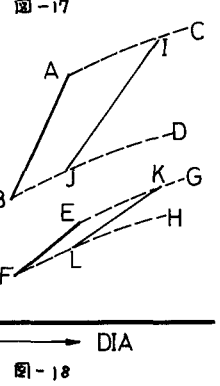
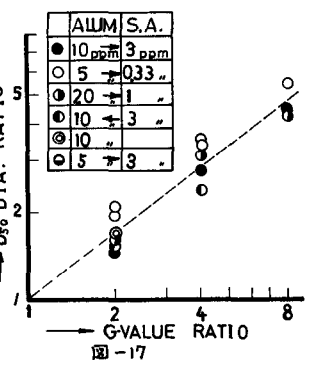


造は若干 Compact になりフロック表面の付着活性が低下していくと考えられる⁽⁵⁾。ただ、この際にもフロック内部には依然として空隙が残されるため粒径の増加に伴ない密度が低下すると思われる。

この様な粒子が攪拌強度を低下させたときの成長フロックの基本構成粒子となる。図-15, 16 に同一薬注量, 注入順序, 攪拌強度でのフロック形成ではあるがばん土と S.A. の注入時間間隔が 15 分と 15 分と差のある場合の例を示す。この場合、沈降速度を示す回帰直線の勾配は後者の方が小さくなっている。このことはばん土のみによるフロック形成によりある程度の粒径のフロックが生じたところに S.A. が注入されたため、ばん土のみで形成されたフロックを基本構成粒子としてフロックが成長したためと考えられる。各々の攪拌条件下でのフロックの累加体積が全体積の 1/2 になる粒径と D_{50} とを付与名攪拌強度比とそれに対応する D_{50} の粒径比を回-17 に示す。これによると実験範囲では攪拌強度比は基本構成粒子の D_{50} と成長フロックの D_{50} との比によっても同様の表現が可能になることが解る。

平均的には攪拌強度比の 2, 4, 8 はそれぞれ D_{50} 粒径比の 1/7, 2.9, 5.0 に相当している。図-19 にフロック重量と粒径の関係を示す回帰直線の勾配 K_w および沈降速度と粒径の関係を示す回帰直線の勾配 n と攪拌強度比の関係を示す。これによると攪拌強度比の増加に伴ない n および K_w の値は減少している。これは成長フロックが同一粒径の基本構成粒子からなり成長フロックの構造が基本構成粒子数が等しいならば相似であるとするとき図-18 に示す様に

A なる粒子を基本構成粒子とする成長フロックの重量が $\overline{AC}$ の様になるものとすれば、B, E, F なる粒子を基本構成粒子とする成長フロックの重量もそれぞれ $\overline{BD}$, $\overline{EG}$, $\overline{FH}$ のようになりこれらはすべて合同となる。こう考えると基本構成粒子数の等しい成長フロックの n や K_w はすべて同じになるはずである。しかし実際には A B



間に存在する粒子の組合せにより成長フロックが構成されるため成長フロックはCABDあるいはGEFHの帯域内に分布することになり実際にはIJやKLの如く定まりACやEG等と一致することはないため図-19の様になると考えられる。

Ⅳ-2 ALT比が沈降速度と密度に及ぼす影響

ALT比を変化させた場合の沈降速度の変化については丹保・渡辺⁽²⁾⁽⁹⁾⁽⁴⁾により既に詳しく検討されている。図-20～25に示すようにALT比の増加につれて同一粒径のフロックの沈降速度および密度が減少するのは水中での見かけ密度が0に近い水酸化アルミニウム水和物と水中の見かけ密度約1.65(g/cm^3)程度の粘土の量的な比率が変化するためと考えられる。このことはALT比を変化させて形成したフロックの顕微鏡写真(写真-4～6)においてALT比の小さなフロック(写真-4)は粘土粒子のために黒く写り、それとは逆にALT比の大きなフロック(写真-6)では粘土粒子が点在していることから解る。ALT比の増加に伴い n や K_p が小さくなるのは水酸化アルミニウム量が粘土量に対して増加すればその付着性のためにフロックが乱流下でもまわれる際にも形状が余り変化しないため空隙がそのまま保持されるためと考えられる。図-26～29に $U=d(d/d_0)^{1/2}$ (U :沈降速度(cm/s), d :フロック径(cm), d_0 :便宜的な長さの単位でここでは 1cm とす)としたときの α , a , n , K_p を示している。丹保・渡辺らは急速攪拌として 100ppm 緩速攪拌として 40ppm を採用しているので乱流条件下で攪拌が行なわれているとすれば、攪拌強度比は、 $(100/40)^{1/2} \approx 1.58$ となる。参考のために図中に示したデータはS.A.が使用されていることおよびPHの差によ

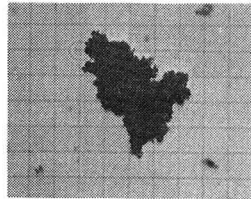


写真-4 Alum 2.5ppm → S.A. 1ppm

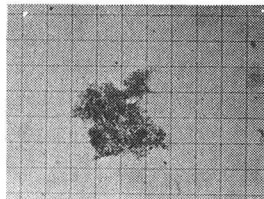


写真-5 Alum 10ppm → S.A. 4ppm

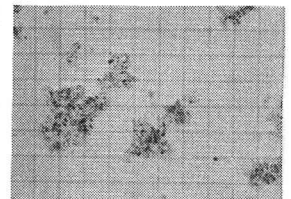


写真-6 Alum 40ppm → S.A. 1ppm $1\text{div.} = 0.16\text{mm}$

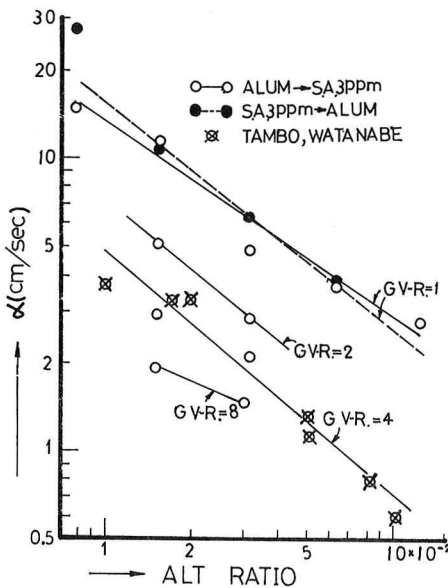


図-26

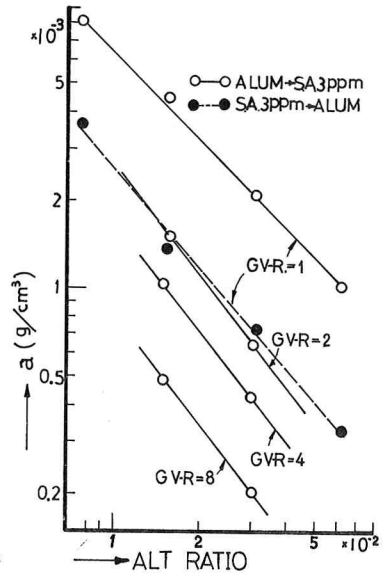


図-28

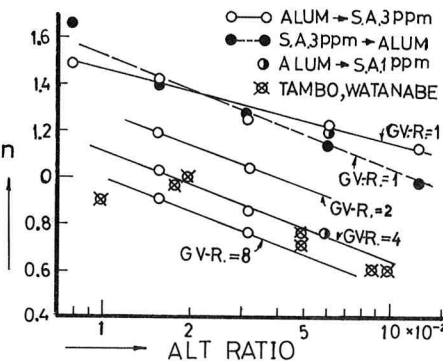


図-27

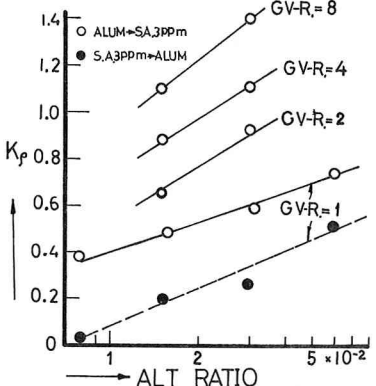


図-29

る若干の変動を考慮しても攪拌強度比4の場合にかなり一致している。

Ⅳ-3 フロック密度の算定法

図-3, 4, 5, 9, 11, 22, 23 の図中に実測フロック密度を用いて、抵抗係数(C_D)として $24/Re$ (Stokes式) と $45/Re$ を採用し計算した場合の沈降速度を記入している。これらはすべて同様の傾向を示し、レイノルズ数が小さくれば実測の沈降速度は $C_D = 24/Re$ の直線に近づきレイノルズ数が 20~30 になれば $C_D = 45/Re$ の直線に近づく。そこで一般の沈降速度式(1)を変形して

$$u = \left\{ \frac{g}{3} \frac{\rho}{C_D} \frac{\rho' - \rho_\infty}{\rho_\infty} d \right\}^{1/2} \quad (1)$$

$$\frac{C_D}{24} Re^2 = \frac{g}{18\nu^2} \frac{\rho' - \rho_\infty}{\rho_\infty} d^3 \quad (2)$$

となり、さらに

$$F(Re) = \left\{ \frac{C_D}{24} Re^2 \right\}^{1/3} \\ = \left(\frac{g}{18\nu^2} \right)^{1/3} \left(\frac{\rho' - \rho_\infty}{\rho_\infty} \right)^{1/3} d \quad (3)$$

として(3)の右辺(密度を含めた無次元化粒径)を横軸に、レイノルズ数を縦軸に採り抵抗係数の各々の場合の関係を図-30に示した。前述の沈降速度をこの図上に表示すると球の場合Ⅲにほとんど一致する。これはフロックの形状はかなり歪みであるが、レイノルズ数の小さい流れでは抗力の大半は凸部の先端付近で生じているので、流体力学的には球と考えてもさしつかえないことを示している。したがってフロックの密度は長径と短径の単純平均と等価粒径とする球と考えて求め得ることを示している。

Ⅴ. まとめ

以上のことをまとめると次のようになる。

- (1) フロックの密度、沈降速度はALTにおよび攪拌強度比(粒径比)の関数である。
- (2) フロック形成時に攪拌強度を低下させると、攪拌強度が大きるときに形成されたフロックが成長フロックの基本構成粒子となる。これが、攪拌強度比の増加により同一径のフロックの密度、沈降速度が減少する原因となっている。
- (3) 攪拌の継続によりフロックの粘弾性と表面の付着活性が低下する。
- (4) フロック密度は、フロックの長径と短径の単純平均値と等価粒径とする球体として沈降速度から逆算することで求められる。

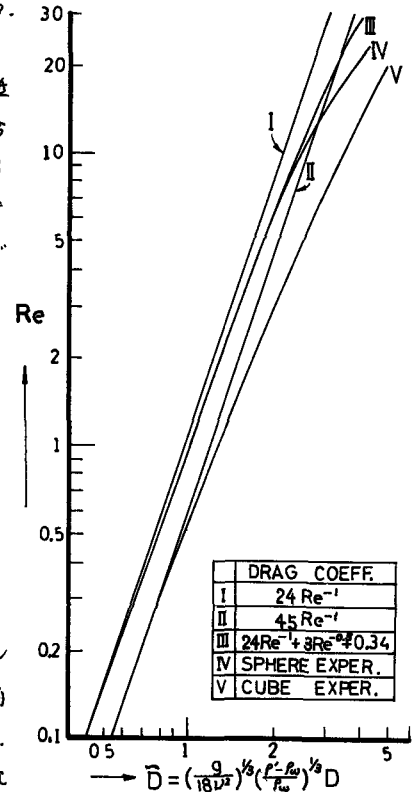


図-30

参考文献

- (1) A.L. Lagvanker & R.S. Gemmell: A Size-Density Relationship for flocs, AMWA, 1968.9 p1040~1046
- (2) 内俣寛仁, 渡辺義公: アルミニウムのフロック密度に関する研究, 水道協会雑誌 昭42.10, p2~10, 3973
- (3) 内俣寛仁, 渡辺義公, 清水寛: 同上(Ⅱ), 同上 昭43.11, p14~17, 410号
- (4) 渡辺義公, 内俣寛仁: 同上(Ⅲ), 同上 昭44.11, p2~9, 445号
- (5) 橋田昭也: フロックの形成条件とその性質におよぼす影響, 土木学会論文集 1973年9月, p33~39, 2173