

攪拌時間およびフロック濃度がフロックの性質におよぼす影響

九州大学 正 員 東谷陽一

〃 〃 〃 楠田哲也

〃 〃 〃 学生員 古賀憲一

I. まえがき

上水道における水処理をシステムとして考える際、環境保全の面から発生源の処理処分までを考慮しなければならなくなっている。主として物理的な立場から水処理を考える場合、フロック形成機構の究明と同時に、従来主に考えられていた上澄水濁度に加えて、形成されたフロックの種々の性質も明らかにされなければ、発生した汚泥の処理を合理的に行なうことはできない。さらに形成されたフロックの一般的性質および形成条件によるフロックの性質の変動状態等が明らかにされれば、フロック形成に続く凝集沈降、濾過さらに圧縮沈降等の研究に際しても、フロックの性質の差異に基づくデータの分散等を防ぎうることに資する。それ故、種々の形成条件がフロックの性質におよぼす影響を明らかにすることは、きわめて必要と考えられる。

フロックの形成機構についてこの研究は既に数多くなされている。これらのほとんどは攪拌初期のフロックが急激に成長している時期のみを取扱ったものである。一方、丹保らはフロックキュレーターの設計に適用する目的でフロックが成長しきった時点について考察を加え、フロックの最大粒径には限界があり、この限界にまで成長した場合のフロックの粒度分布は相似性を有するという考え方を導いている。しかしながら、攪拌槽内の乱れを等方性とした場合、攪拌強度(G 値)の空間分布は自由度3の χ^2 分布と見做すのが平均 G 値がいかなる値であっても G 値が0に近い部分が空間的に必ず存在することになり、それ故フロックの最大粒径は定められないこと、さらに平均の G 値よりかなり大なる G 値も存在しうるため、フロックは受けた最大の G 値に関してヒステリシスを示すという事実により、フロックの粒度分布には厳密には定常状態が存在しないのではないかと考えられる。

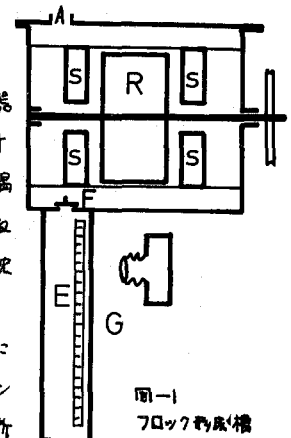
フロック単体としての性質には、フロック密度および沈降性、透水性、剪断強度、内部構造等について付されたものがあるが、フロック形成過程中的の時間変化あるいはフロック濃度を変化させたものについて、検討を加えたものはほとんどない。

本研究は、フロック形成機構および種々の形成条件がフロックの性質に及ぼす効果の解明を通じて、水処理、汚泥処理の効率改善を目的とし、ばん土注入量とカオリン濃度との比を一定に保ち、粒度分布、沈降速度、衝突付着効率の時間変化等に実験的理論的検討を加えたものである。

II. 実験装置および方法

フロック形成装置を図-1に示す。この装置は前回使用のものと同じである。容器は14cm×14cm×15.3cm(容量3ℓ)の大きさで回転翼(R)は5cm×6cmの横長の板を十字に四枚取付けたものから成っている。固定翼(S)は2.5cm×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の沈降速度を測るための物指(E)とその付いた沈降筒(G)を取付けている。他に角形の5cm×5cm×1mの沈降筒を数本用意した。

先ず蒸留水をフロック形成槽に入れ、ばん土注入後のpHが所定の値になるように事前に求めた NaHCO_3 の所定量を加える。そして72時間以上浸漬した定量カオリンと所定量加えたものを原水として使用した。攪拌強度は G 値で50secに固定し、所定量のばん土(ばん土中のアルミニウムイオン重量とカオリン重量の比(以下AL比と称す)は常に0.0177に固定—カオリン濃度50ppm当り $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ 10ppmに相当)を加えてフロック形成を行なう。フロックの粒度分布の時間変化およびフロック径と沈降速度の関係を求めた。この方法は攪拌槽のAの孔から8mm ϕ のガラス管を用いて採取したフロックを別に用意した沈降筒の上部に入れ、筒の下部においてフロックが相互作用のほり程



度にまで分散した時点で一定時間間隔で閃光するストロボを用いて写真撮影、これによりフロックの径とこのフロックの沈降速度を求めるといったやり方である。

濁質除去は形成フロックを大粒子、濁質として注入するものを微粒子と見なすように、濁質としてカオリンを用いた。所定時間攪拌後カオリンを注入し、さらに攪拌を続け、ある時間経過毎に形成槽から100ccのメスシリンダーに100cc採水し5分静置後の上澄水濁度を測定し、濁質の除去量を求めた。

Ⅲ. 実験結果と考察

薬品注入後のPHを6.0とし、カオリン濃度200ppmとした場合の粒度分布と攪拌時間の関係を図-2に示す。攪拌するにつれてフロックは成長し本例では約

6分で最大になりその後小さくなっていく。粒度分布形は攪拌初期を除けば、かなり相似になっている。この図の縦軸の0.5に相当する径 D_{50} (体積メディアン径)と攪拌時間の関係を図-3, 4に示す。図-3は薬品注入後のPHが7.0、図-4は6.0の場合である。

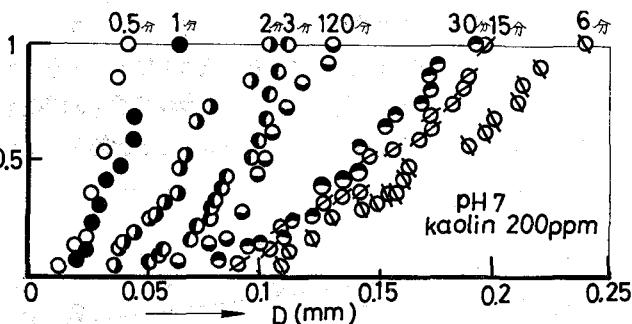


図-2 フロック粒度分布の時間変化

攪拌時間の影響

まずフロックの粒度分布形について見る。フロックの最大粒径はフロックの剪断強度と流体の剪断応力との平衡により決定されると考えられる。攪拌槽内の乱れを等方性と考えると流体の剪断応力分布は近似的に自由度の分布となるので、最小剪断応力は0であり最大剪断応力は定まらない。したがって、フロックの最大粒径は決定し得ないことになる。実用上定めるとすれば、フロックの存在確率を示す累積分布関数でたとえば95%のときの粒径というようにしなければならぬ。再保の最大粒径の定め方は実質上そのようになっているのではないかとと思われる。ここでは、フロックの粒度分布の性質を示すものとして平均値 μ に次ぐ1 order高いも

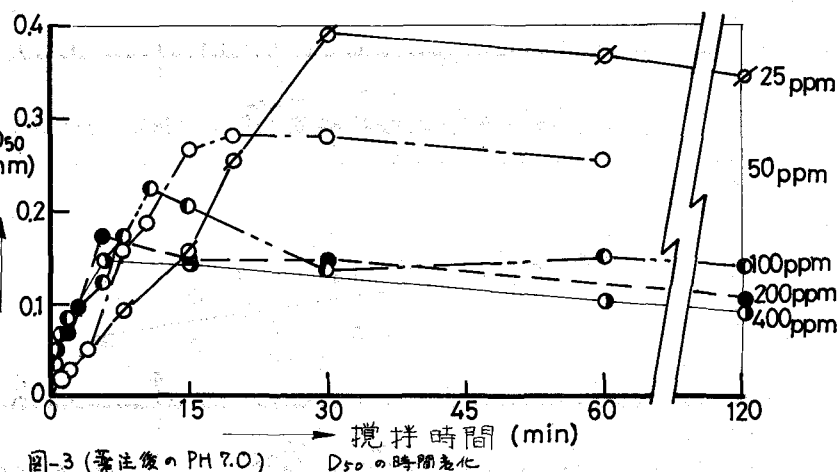


図-3 (薬注後のPH 7.0) D_{50} の時間変化

図-4 (薬注後のPH 6.0) D_{50} の時間変化

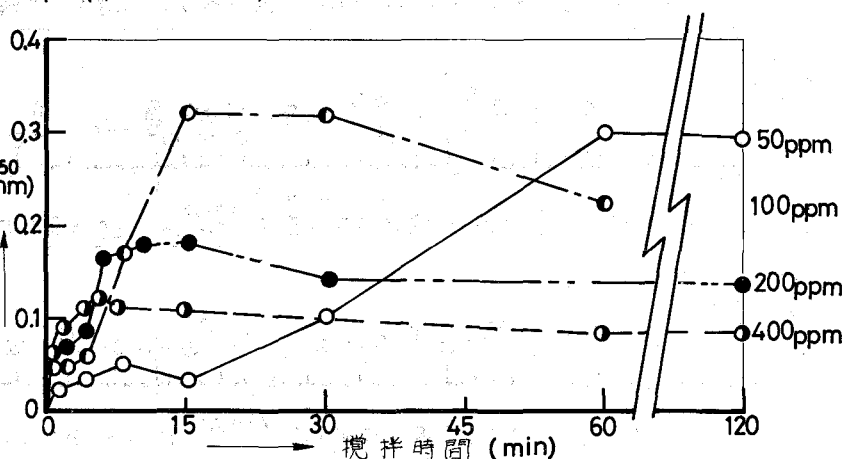


図-4 (薬注後のPH 6.0) D_{50} の時間変化

のとして μ_2/μ_1^2 を求めた結果を図-5 (PH7), 図-6 (PH6) に示す。横軸は各濃度において D_{50} が最大になるに要する攪拌時間 t_{max} により、無次元化したものである。かなりのばらつきがあるが、 $t/t_{max}=1$ で μ_2/μ_1^2 は 0.55~0.6 程度であり攪拌時間の経過につれて正規化した分散が減少する一つまみフロックの粒度分布を平均径で無次元化したときの分布の幅が狭くなることから解る。実用上のためフロックの最大径 D_{max} を D_{50} で無次元化したものを図-7 (PH7), -8 (PH6) に示す。これらによっても攪拌の経過につれて D_{max}/D_{50} が 1 に近づくことが解る。したがって厳密な意味でフロックの粒度分布には相似性が存在しないことになる。

次に攪拌時間の経過につれてのフロックの沈降速度の変化を薬注後 PH 7.0, カオリン濃度 50 ppm の場合について図-9~14 に示す。攪拌時間が長くなるにともない、フロック径の大きいところでの沈降速度の増加が見られ、0.4 mm^φ 付近で 20 分~80 分で約 2 割の増加となっている。さらに $u = u_0 (d/d_0)^n$, $P-P_0 = \alpha (d/d_0)^{-K_p}$ とし $d_0 = 1 \text{ cm}$ とした場合の u_0, n, α, K_p と攪拌時間との関係を図-15, 16 に示す。これから攪拌時間の増加にともない、フロックが Compact になっていくことが解る。したがって、少しでも沈降性のよい Compact なフロ

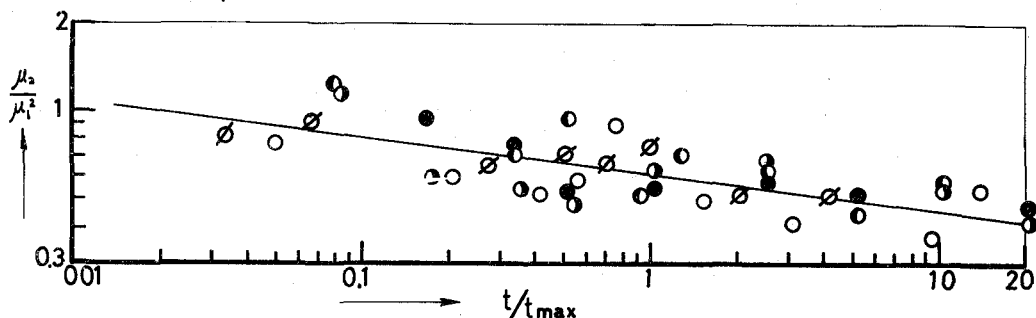


図-5 無次元化分散と無次元化攪拌時間の関係 (PH 7.0, 記号は最下欄参照)

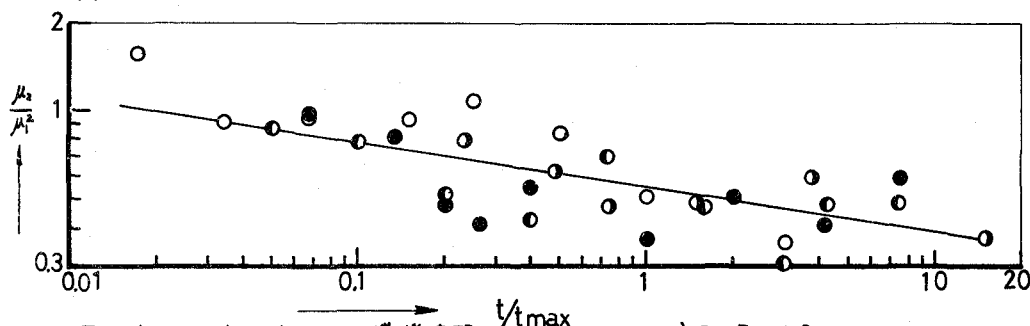


図-6 無次元化分散と無次元化攪拌時間の関係 (PH 6.0, 記号は最下欄参照)

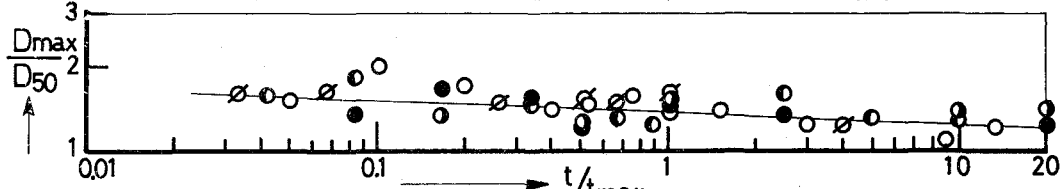


図-7 D_{max}/D_{50} と無次元化攪拌時間の関係 (PH 7.0, 記号は最下欄参照)

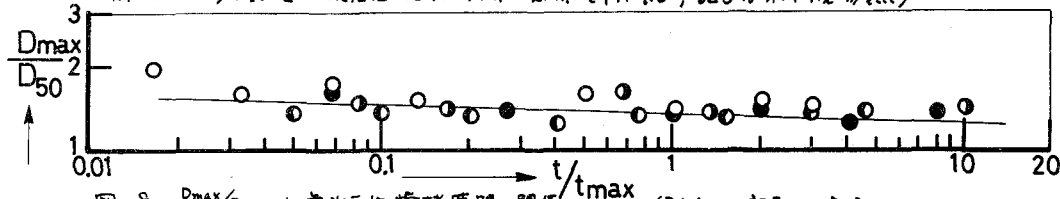


図-8 D_{max}/D_{50} と無次元化攪拌時間の関係 (PH 6.0, 記号は下記)

記号 ϕ 25 ppm $\circ$ 50 ppm $\bullet$ 100 ppm $\bullet$ 200 ppm $\circ$ 400 ppm

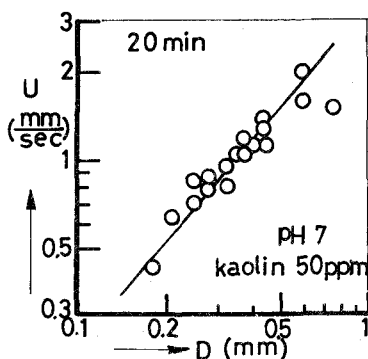


図-9 フロックの沈降速度 PH7 50ppm

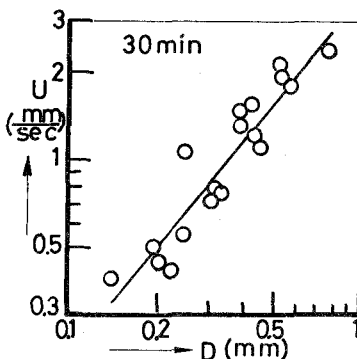


図-10 フロックの沈降速度 PH7 50ppm

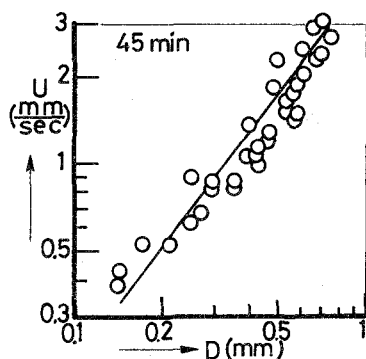


図-11 フロックの沈降速度 PH7 50ppm

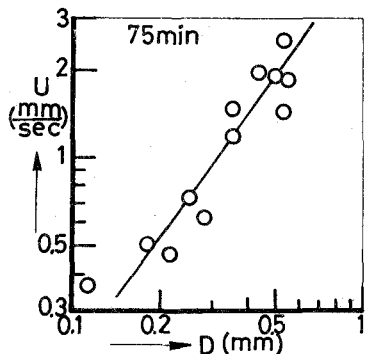


図-12 フロックの沈降速度 PH7 50ppm

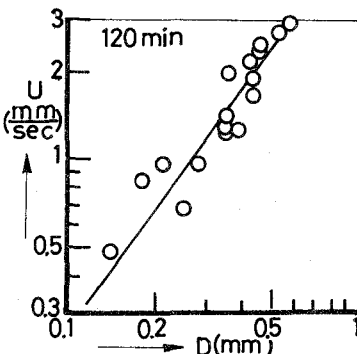


図-13 フロックの沈降速度 PH7 50ppm

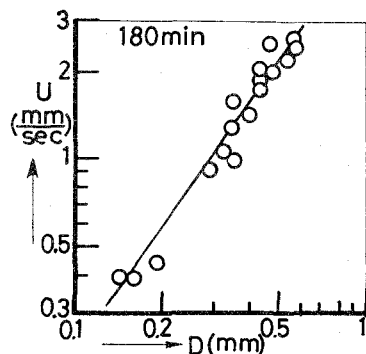


図-14 フロックの沈降速度 PH7 50ppm

ックを得るためには、攪拌時間を増やす方が好ましいが、フロックの平均粒径は逆に減少するので最適のところを選ぶなければならぬ。さらにこの現象はフロックが形成され平均粒径が最大に達するに要する時間に較べるとかなり、long termな現象となっている。

上述のような現象がフロック表面の付着性に如ける効果を及ぼすかについて検討を加えるため、フロック形成中のジャーテスト中に濁質としてカオリンを注入しその除去速度を求めた。この結果を図-17に、これから次式で定義される衝突付着効率 α と攪拌時間との関係をもとめたものを図-18に示す。表-1はその時の諸量である。

$$\alpha = -\frac{\pi}{2.3} \frac{\log \%}{Gt V_f}, \quad \log \% \approx \log T_u / T_{u_0} \quad (1)$$

ここで、 V_f : 単位流体体積中のフロック体積、 T_u : 濁度である。この場合、形成されているフロックと注入されたカオリンの粒径比は100倍程度あり、若干の透水性がフロックにあるならば、衝突効率 α は粒径比によらず一定となる⁽¹⁶⁾。したがって、 α の差は付着率(Sticking Ratio)の差と考えられる。それ故付着率は攪拌が長くなるほど減少し、 $Gt=7 \times 10^4$ 程度になると $Gt=10^5$ での $1/2$ 程度に減少する。この

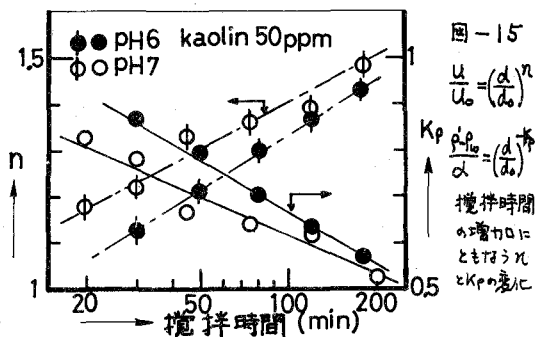


図-15
 $\frac{U}{U_0} = \left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)^n$
 $K_p \frac{\rho_p}{\alpha} = \left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)^{1/n}$
攪拌時間の増えに伴う α と K_p の変化

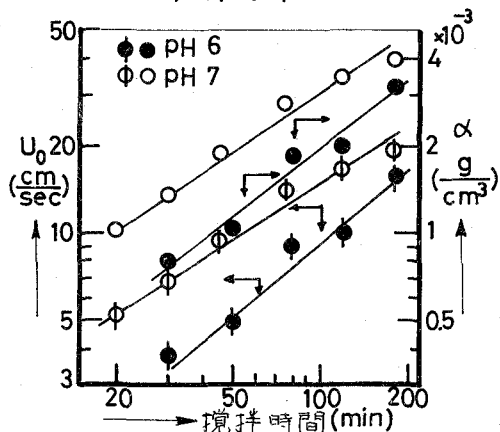


図-16 攪拌時間の増加に伴う U_0 と α の変化

ことから攪拌はフロック表面の付着性状を不活性の方に変化させることが解る。

カオリン濃度の影響 図-4において PH6 のカオリン濃度 50 ppm の場合には、攪拌初期の成長がかなり遅く、さらに同計の 25 ppm の場合には本実験の時間内では成長し得なかった。これらの場合の S-電位は両者とも +9~11 mV であり凝集域に入っていると考えられる。したがって攪拌時間の不足であったと考えられる。

先ず攪拌初期について検討する。 D_{50} の成長速度とカオリン濃度の関係を図-19 に示す。いまオーダーエスチマションとして、 $C \sim nD^3$ (n : 粒子個数, D : 代表フロック径, C : フロック濃度) であり、 $\frac{dn}{dt} \sim n^2 G D^3$ から $\frac{d(\log D)}{G dt} \sim C$ を得る。図-19

では $\frac{d(\log D)}{G dt} \sim C^{3/4} \sim 5\%$ であり C に比例していない。このことは攪拌槽にばん土を注入後、拡散し終るまでの時間とフロックの成長初期の時間が同程度であること等によると考えられる。次に D_{50} の最大成長径 ($D_{50} \max$) についてみると図-20 に示すように ($D_{50} \max \sim C^{1/3}$) となっている。 ($D_{50} \max$) なる時点での PH7.0 のフロックの沈降速度とフロック径の関係を図-21~24 (50 ppm については既出。図-9 参照) に示す。PH6.0 の場合も加えて、 U , n , α , K_p と濃度の関係を図-25, 26 に示す。同一粒径のフロックに対する密度はカオリン濃度の低い方が一般的に高い。しかしながら、これらのフロックの粒度分布域は比較的狭いため、ALT 比が等しい場合をまとめて一本の密度関数で表現しても、データの分散を考えると実用上支障が生じるほどの error は生じない。

生じるほどの error は生じない。

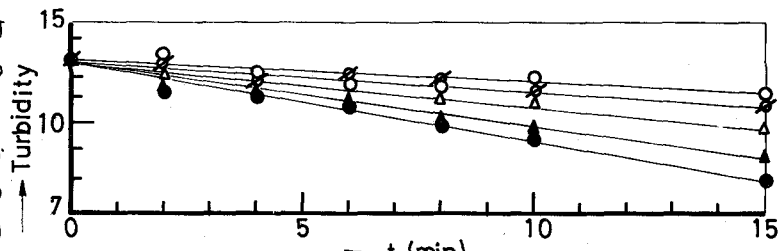


図-17 濁質除去速度 PH7.0, Kaolin 50ppm, 注入Kaolin 25ppm, 初期濁度以下 (記号 表-1 参照)

表-1 図-17における諸量

攪拌時間(分)	フロック体積濃度 V_f	付着率 α	記号
30	1.8×10^{-3}	0.0034	○
60	1.8	0.0030	◇
120	1.7	0.0023	△
180	1.6	0.0018	▲
240	1.2	0.0016	●

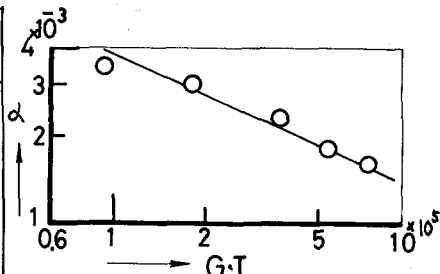


図-18 α と $G.T$ の関係

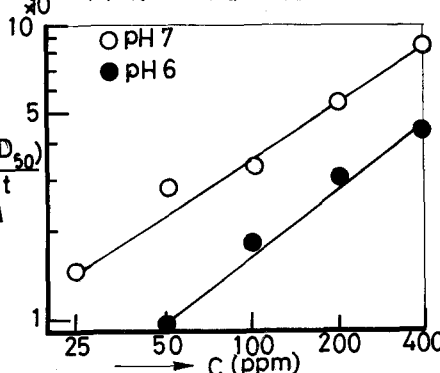


図-19 D_{50} の成長速度

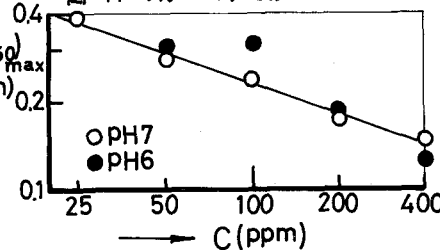


図-20 D_{50} の最大値と濃度

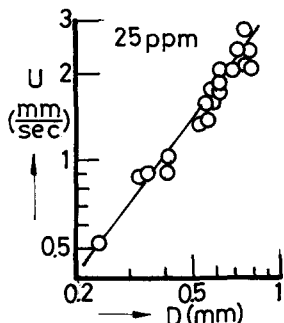


図-21 沈降速度とフロック径 (PH7)

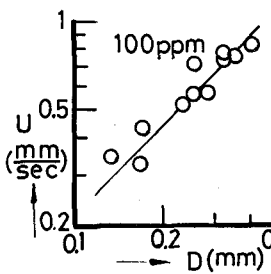


図-22 沈降速度とフロック径 (PH7)

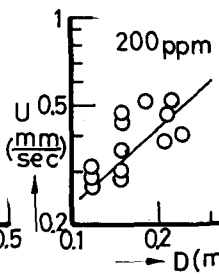


図-23 沈降速度とフロック径 (PH7)

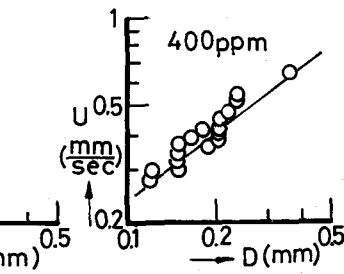


図-24 沈降速度とフロック径 (PH7)

ここで、 $(D_{50})_{max}$ の見かけ密度を求めると図-27に示すように粒径の小さいほど密度が大きくなっている。この傾向は円保らの研究⁽⁴⁾にも見られる。したがってフロクの剪断強度はフロク密度だけでは定められず他の要素

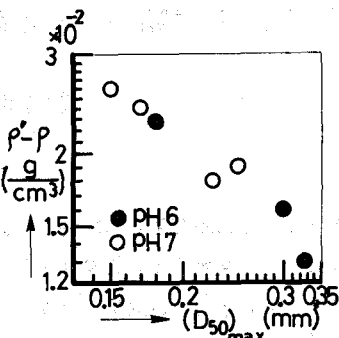


図-27 $(D_{50})_{max}$ の見かけ密度

も必要と思われる。 D_{50} が最大になった後の D_{50} の小さくなる割合を図-28に示す。これによると粒径の小さい程、縮小割合は大きい。フロク体積濃度は攪拌時間が増すにつれて減少するが、減少率はこの濃度の高いほど小さいこととフロク密度の高い方が縮小割合が大きいことはあり得ないこと等から、この D_{50} の減少理由は主に破壊と考えられる。したがって、フロクの強度、耐久性を定めるには、フロク密度以外に、フロクの成長速度あるいは初期原水PHとばん土との関係等、他の要因についても考えなければならぬ。

IV. 結論

本文では、フロク形成時の攪拌時間とフロク濃度の影響について検討を加えた。

- ①フロクの粒度分布形には厳密な意味で相似性は存在しない。
- ②攪拌を続ける程、フロク密度は増大するが、 μ_0/μ_1^2 、 D_{max}/D_{50} 、付着率は減少する。
- ③ALT比が同一でもフロク濃度の高い方が密度は小さくなる傾向にある。
- ④フロクの強度、耐久性はフロク密度だけでは定められない。

終りに、本実験を手伝って下さった宮原茂君（現建設省）にお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 円保・純彦・渡辺：フロク化の物理的メカニズムと水質浄化技術 No.43/P.20-27 546.8
- (2) 円保・渡辺：同上(Ⅱ)，同上，No.44/P.2-14，546.6
- (3) 同氏：同上(Ⅲ)：同氏 No.44/P.2-17，547.2
- (4) 同氏：同上(Ⅳ)：同氏 No.45/P.27-37，547.7
- (5) 同氏：同上(Ⅴ)：同氏 No.45/P.14-27，547.10
- (6) 豊谷・楠田・石川：フロク形成時の粒径の空間分布が、形成に及ぼす影響，第26回全国水質研究発表会講演集 R.222-224，1975.5
- (7) 楠田：フロクの形成条件が、その性質に及ぼす影響：水質浄化技術集 No.217，R.23-29，1973.7
- (8) 円保・渡辺：アルミニウムフロクの濃度に及ぼす影響：水質浄化技術 No.397/P.2-10 542.10
- (9) 円保・渡辺・清水：同上(Ⅱ)：同氏 No.41/P.7-14-17，542.11
- (10) 豊谷・楠田：フロクの沈降速度、密度、 μ_0/μ_1^2 構造に関する研究：第11回水性工学討論会講演集 R.13-18，1975.1

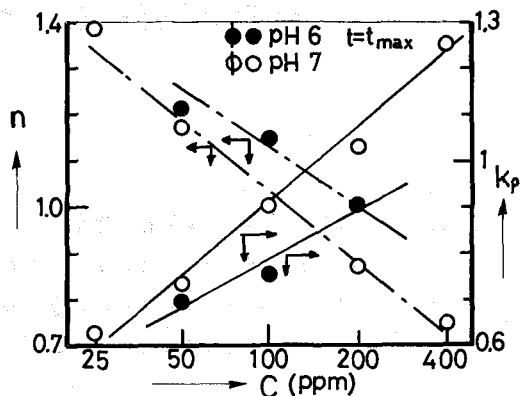


図-25 $t=t_{max}$ における n と K_p

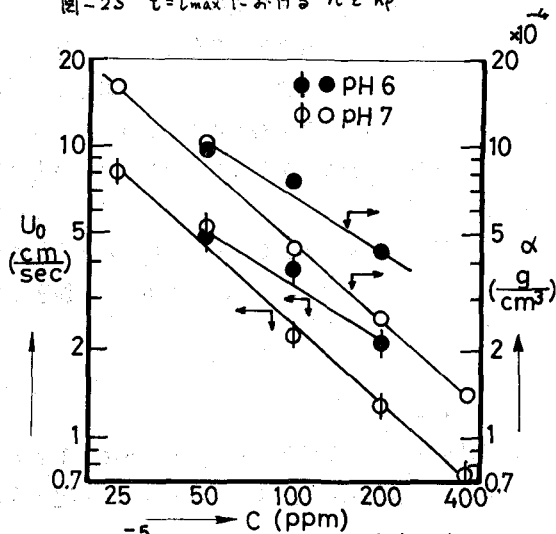


図-26 $t=t_{max}$ における U_0 と α

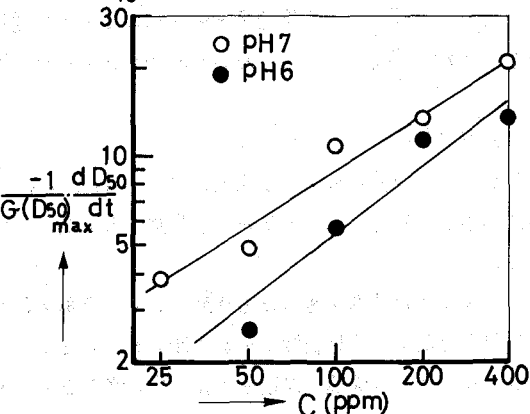


図-28 t_{max} 以後のフロクの縮小速度

- (11) 楠田：フロクの透水性と衝突効率に及ぼす影響：水質浄化技術 No.462 R.2-10，548.3
- (12) 円保・山田・純彦：フロクの強度に関する研究：同氏 No.427，R.4-5，548.4
- (13) 豊谷・楠田・石川：単一フロクと多量微粒子フロクの剪断強度 - 第25回全国水質研究発表会講演集 R.180-181，1974.5
- (14) 松尾：水処理工場の排水における水質浄化に関する研究：水質浄化技術 No.227，R.2-27，1973
- (15) 楠田・石川・豊谷：種々の攪拌条件下で形成されたフロクの衝突効率率：九大工学集報 投稿中
- (16) 豊谷・楠田：フロクの衝突効率率について(Ⅱ)：九大工学集報 Vol.43 No.1 P.1-10，1974.2