

(3) 残留濃度及び成長度からみたフロック形成の管理指標について

九州大学工学部

○古賀 憲一

"

栗谷 陽一

"

楠田 哲也

1. はじめに

水処理におけるフロック形成は重要な固液分離操作の一つである。従来からフロック形成に関する研究は数多くなされておられ、フロック形成の指標化を試みた例としてCamp¹⁾をはじめ、丹保ら²⁾の研究がある。これらの研究は、フロックの成長段階が極めて初期のものについてか、あるいは定常状態に達した時点のものであり、成長に伴うフロックの性質の変化についてさらに検討すべき余地が残されているものと思われる。さらに、⁴⁾フロック形成の最適運転法を目指した研究として、Argaman等³⁾をはじめ多くの研究が成されているものの、フロックの基礎的性質を明らかにせず、残留濃度のみに注目し、最適運転法について論じているため、的確な運転管理法とは言い難い。

一方、著者らも、フロック形成の指標化、最適運転法の確立を目的として、フロックの基礎的性質について検討を加え、主な結果として以下に示す事を確認した^{5) 6)}。

1). フロックは攪拌に対する履歴性が存在する事

2). 攪拌の継続時間の増加と共にフロックの compact 化が進行する事、及びフロック表面の不活性化が生じる事

これらの事は例えば、粒径、沈降速度共に大きいフロックを形成するためには低い攪拌強度で長時間攪拌を行えばよいことを示すが、一方では、沈澱池、浮遊池内での微小粒子の捕捉効率を低下させる一因とも成り得る事を示している。このようにフロックの物理的特性は、攪拌条件によってもかなり影響を受け、水処理システムにおける各単位操作の固液分離特性に与える影響も無視できない。以上の観点に基づき、本研究においては、フロック形成条件の差異がフロックの性質に与える影響について実験的検討を加え、フロックの成長機構、フロック形成管理のための指標化について考察を加えたものである。

2. 実験装置及び方法

フロック形成を行うための装置を図-1、2に示す。図-1に示すジャーテスターは、容量(3ℓ)、構造共に従来から用いているものと同じである。図-2に示すジャーテスター(容量5ℓ)は、フロック形成槽と残留濁度を得るための沈降筒を兼ね備えたものである。

実験方法としては、まず図-1に示すジャーテスターに蒸留水もしくは学内水道水を満たし、濁質として筑豊カオリン、薬注後のpHが所定の値になる様にNaHCO₃を注入し、十分攪拌する。その後、硫酸バンドを所定量注入し、所定の急速攪拌強度で攪拌を一定時間継続した後、所定の緩速攪拌強度でフロック形成を行ない、粒度分布を得るための顕微鏡撮影もしくは接写撮影を行う。フロックの沈降速度を得るための方法としては、まずジャーテスター内のフロックをガラス管(8mm ϕ)を用い採取し、フロックを破壊しない様に静かに沈降筒に注入する。筒の下部において、粒子間の相互作用が無くなる程度まで十分分散させた後、近接多重撮影法により、粒径と沈降速度との関係を求める。同様の実験を、急速攪拌強度、その継続時間及び濁質濃度を変えて行った。ただし、濁質濃度を変える場合、薬注条件によってフロックの付着強度が変わるのを避け、かつ個数濃度のみを変える意味で、以下に示す様な希釈方式を採用した。薬注条件、

攪拌強度を上述べたもの

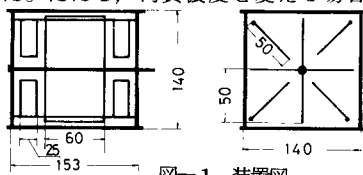


図-1. 装置図

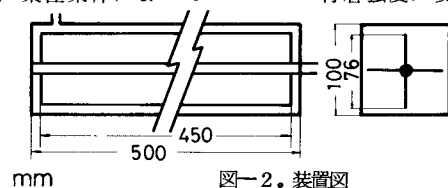


図-2. 装置図

と同一条件のもとで種フロック（今回は 10μ 程度）を形成し、それを所定の濃度になるように、上澄液（上述と同一の薬品注入量の下にフロック形成した後の上澄液）で希釈する。

水酸化アルミニウムの水和物の生成状態を調べるため、以下に示す様な実験を行った。ジャーテスターに蒸留水を満し、上述と同一の薬品注入量の NaHCO_3 及び硫酸バンドをこの順序で注入し、粘土は全く加えず所定の攪拌強度で攪拌を行う。この様にして生成された硫酸バンドの水和物の成長を調べる。この水和物の屈折率は水の屈折率とほぼ同じで、肉眼あるいは透過型照明の顕微鏡での観察が困難であるため、斜照法照明により、水和物の観察並びに顕微鏡撮影を行った。残留濃度を得るための装置として、図-2に示すジャーテスターを用いた。方法としては、まずフロック形成条件は上述のものと同様にし、ジャーテスターを水平にした状態で攪拌を行う。所定の時間攪拌を行った後、攪拌を止め、素早く沈降筒を鉛直に立てる。所定の時間だけ静置させた後、水面下 45 cm の所から採水を行う。

3. 実験結果及び考察

急速攪拌のみでフロック形成を行い、体積メディアン径（以下 d_{50} と称する）を求め、攪拌継続時間と共に図示したものが図-3である。この図において、 d_{50} の時間変化は大略三つの部分に分けられる。すなわち、 d_{50} が急速に成長する段階(A)、 d_{50} が最大値に達した後(以下 t_p と称する)急速に減少する段階(B)、そして、その減少速度が次第に小さくなる段階(C)である。B段階においては、主として、破壊によるものであり、C段階は、「もまれ」によってフロック密度が増加する段階である⁶⁾。図-3の白丸印の時刻から攪拌強度を $G = 70\text{ sec}^{-1}$ にし、緩速攪拌により成長するフロック平均径の時間変化を求め、その結果を図-4に示す。横軸は急速攪拌を開始してから時間である。この図において、図-3のAの段階で形成されたフロックは急速攪拌の継続時間(以下 t_f と称する)に依らずある一定値の最大平均径(以下 $d_{50,m}$ と称する)まで成長することが解る。急速攪拌強度(G_f)、急速攪拌継続時間(t_f)を各々変え、緩速攪拌強度を $G = 70\text{ sec}^{-1}$ に固定し、緩速攪拌下での $d_{50,m}$ を求め、 t_f との関係を図示したものが図-5である。縦軸 d_r は $d_{50,m}$ を緩速攪拌($G = 70\text{ sec}^{-1}$)のみで形成したフロックの最大成長平均径 $d_{50,s}$ で正規化したものである。この図から、急速攪拌強度

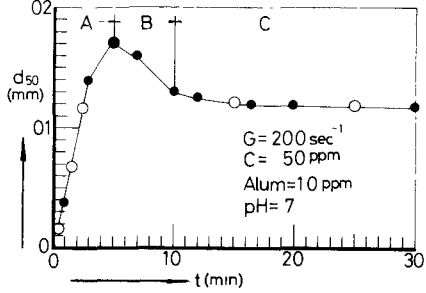


図-3. 急速攪拌下における平均径の時間変化

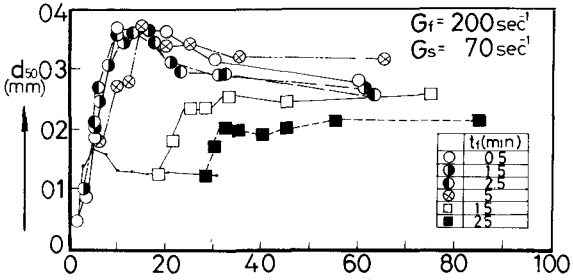


図-4. d_{50} の時間変化

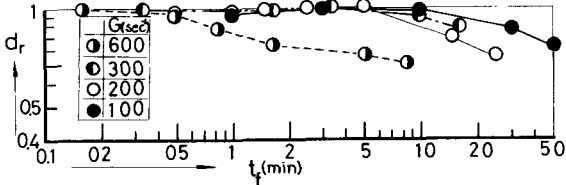


図-5. d_r と t_f との関係

を変えても図-4と同様に、Aの段階で形成されたフロックは t_f に依らずある一定値の $d_{50,m}$ まで成長し、その値は $d_{50,s}$ とほぼ一致する事が解る。さらに、ある一定の t_f から $d_{50,m}$ が次第に減少している事が認められる。この d_r 、すなわち $d_{50,m}$ が減少し始める時間を以下 t_c と称する。 t_c 及び t_p と急速攪拌強度(G_f)との関係を図-6に示す。この図から、 t_c と t_p がほぼ一致する事及び急速攪拌強度が大きい程 t_c は小さくなる事が解る。図-7は、急速攪拌強度を $G_f = 200\text{ sec}^{-1}$ 、緩速攪拌強度を $G_s = 60\text{ sec}^{-1}$ とし、濁質濃度、急速攪拌の継続時間を変えてフロック形成を行い、 d_{50} の時間変化から $d_{50,m}$ を求め、 t_f と共に図示したものである。図中のパラメーターは希釈後の濃度である。図-

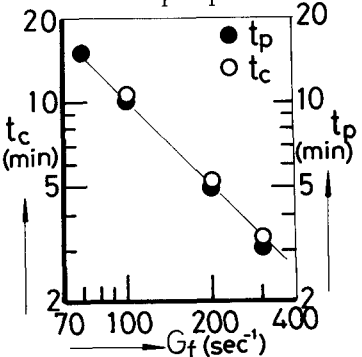


図-6. G_f と t_c 、 t_p との関係

8は、図-7から得られた t_c と濁質濃度との関係を示したものである。図-8における t_p は濁質濃度を変え、上述の急速攪拌の強度($G = 200 \text{ sec}^{-1}$)のみでフロック形成を行った時の d_{50} が最大値 $d_{50,s}$ に達する時間である。次に、緩速攪拌の強度($G = 60 \text{ sec}^{-1}$)のみでフロックを成長させ、 d_{50} の時間変化を求め、図示したものが図-9である。図-7, 8, 9から、濁質濃度を低下させ、 t_p が50分程度まで長くなっても図-6に示した様な t_c が存在し、かつ t_c と t_p についてもそれらはほぼ一致する様であり、 $d_{50,m}$ についても図-5に示したものと同様である。すなわち、 $t_f \ll t_c$ ($\equiv t_p$)の場合、 t_f の長短にかかわらず $d_{50,m}$ はほぼ一定値を示し、緩速攪拌のみで成長させたフロックの $d_{50,s}$ とはほぼ一致する。

ここで、緩速攪拌初期におけるフロックの性質について検討を加える。すなわち、成長段階が極めて初期であることから、破壊が無視できるものとして、ある代表粒径を d_0 ($\ll 1$)、個数濃度を n とすると、簡単なオーダーエスティメーションとして、次式が成立するものとする。

$$\frac{dn}{dt} \sim -\alpha \cdot G \cdot n^2 \cdot d_0^3$$

さらに、 $C \sim n \cdot d_0^3 \cdot \rho_f$ 、また、 $\rho_f \sim d_0^{-1}$ が成立するとして、 $C \sim n d_0^2$ となり、次式を得る。

$$\frac{d(d_0)}{dt} \sim \alpha \cdot G \cdot C \cdot d_0^2$$

ただし、 α :付着率、 C :濁質濃度、 ρ_f :フロック密度
従って、 G が一定で、 d_0 が十分小さく、一定の α が得られる範囲で $d(d_0)/dt$ が得られれば第0次近似としての α が得られる。このようにして得られる付着率を急速攪拌継続時間 t_f と共に図示したものが図-10である。図-10におけるフロック形成条件は図-4, 5のものと同一であり、図中のパラメーターは急速攪拌強度である。この図において、 $t_f \gg t_c$ ($G_f \cdot t_f \gg 60 \times 10^3$)であれば、 $d(d_0)/(G \cdot d_0 \cdot dt)$ は緩かに減少していることから急速攪拌において、 t_f ($\gg t_c$)の増大と共に付着率が減少するのは、 t_p に比べるとかなり時定数の長い現象と言える。 $t_f \ll t_c$ ($G_f \cdot t_f \ll 60 \times 10^3$)における $d(d_0)/(G \cdot d_0 \cdot dt)$ はほぼ一定値を保つ事及び緩速攪拌下での $d_{50,m}$ もまたほぼ一定値の大きさまで成長する事から(図-4, 図-5参照)、 $t_f \ll t_c$ におけるフロックの表面はかなりfreshな状態にある

ものと考えられる。 $t_f \approx t_p$ ($\equiv t_c$)付近、すなわち、急速攪拌下でのフロックが最大成長に達する付近においては破壊が生じ始めること、さらには、「もまれ」が $G \cdot t$ の増加に伴い進行することから、 $t_f \approx t_p$ 付近においては比較的短時間の間に破壊、及び「もまれ」によりフロック表面の不活性化が生じているものと思われる。また、この図において $G_f = 100 \text{ sec}^{-1}$ として形成したフロックの付着率が他のものに比べ、若干異なった傾向を示している。すなわち、 $t_f \gg t_c$ において、 $G_f = 100 \text{ sec}^{-1}$ のものが他のものより小さい値を示している。これは急速攪拌と緩速攪拌との強度比が小さいため、破壊が無視できなくなったためと思われる。

濁質濃度を100 mg/l 、pH調整のための NaHCO_3 、硫酸バンド20 mg/l をこの順序で注入し、攪拌条件としては一定攪拌強度の下でフロック形成(以下このフロックをカオリンフロックと称する)を行ない、 d_{50} の時

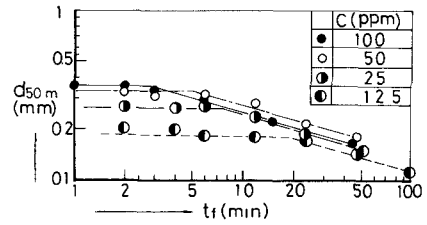


図-7. $d_{50,m}$ と t_f との関係

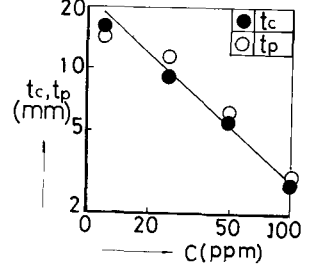


図-8. 濁質濃度と t_c , t_p との関係

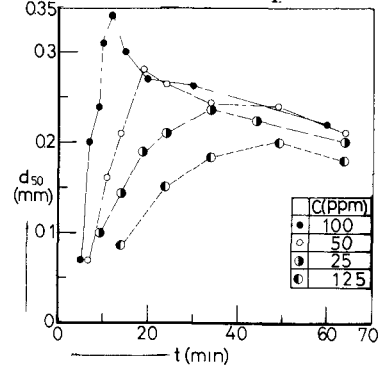


図-9. d_{50} の時間変化

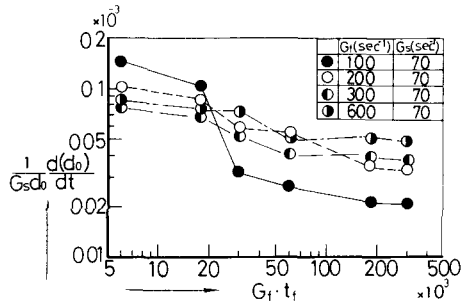


図-10. 付着効率と t_f との関係

間変化を求め図示したものが図-11である。図-12は、図-11で注入したものと同量の硫酸バンド及び NaHCO_3 により成長させた水和物（以下A1-フロックと称する）の成長を d_{50} で示したものである。図-11, 12から、A1-フロックの成長はカオリンフロックのものと同様の傾向を示すことが解る。すなわち、両者の d_{50} には最大成長平均径 $d_{50, s}$ が存在し、 $d_{50, s}$ に到達する時間にも差程の違いが見受けられないことである。次に、薬注率を一定（硫酸バンド10 ppm）にし、濁質濃度を変え、 t_c 、 t_p を求め図示したものが図-13である。この図において、薬注率を一定とし、濁質濃度を変えても、 t_c 、 t_p は差程変化していない事が認められる。このことと、図-11, 12において、カオリンフロックの成長がA1-フロックのものと類似している事から、今回行なつた実験の範囲内では、 t_p 、 t_c は水酸化アルミニウムの生成と密接な関係にあるものと考えられる。図-14は図-2に示したジャーテスターを用い、 $G = 100 \text{ sec}^{-1}$ 、 $G = 50 \text{ sec}^{-1}$ としてフロック形成を行ない、図-5, 7と同様に、 t_f と $d_{50, m}$ との関係を示したものである。この図から $G = 100 \text{ sec}^{-1}$ の場合、 $t_c = 8$ 分~10分となつてゐる事が認められる。図-15, 16は一定の攪拌強度（ $G = 100 \text{ sec}^{-1}$ 、 50 sec^{-1} ）のみでフロック形成を行なつた時の d_{50} の時間変化を示したものである。図-15, 16から $G = 100 \text{ sec}^{-1}$ 、 50 sec^{-1} とした時の t_p は各々ほぼ8分、20分程度となつており、 $G = 100 \text{ sec}^{-1}$ の場合この実験においても $t_c \approx t_p$ が成立している様である。一方、 $G = 200 \text{ sec}^{-1}$ とした時の t_p はほぼ4~5分となつてゐた事から図-6の結果を用いると、 $G = 200 \text{ sec}^{-1}$ の場合の t_c はほぼ4~5分程度になるものと思われる。図-17, 18, 19, 20は残留濁度（以後、 C_r と称する）と急速攪拌継続時間 t_f との関係を示したものであり、横軸は t_f を G_f で無次元化したものであり、図中のパラメーターは緩速攪拌継続時間 t_s 及びそれを G_s で無次元化したものである。図-17, 18は $G_f = 100 \text{ sec}^{-1}$ 、 $G_s = 50 \text{ sec}^{-1}$ でフロック形成を行なつた場合のものであり、図-17は静置時間（以後 T_s と称する）を15分間とし、図-18は T_s を30分間とした場合のものである。図-19, 20は $G_f = 200 \text{ sec}^{-1}$ として他の条件を図-17, 18のものと同一にし、 C_r と t_f との関係を示したものであり、静置時間を各々 $T_s = 15$ 分間、30分間とした場合のものである。図-17~20において、 t_f 、 t_s 共に短い場合（図中の黒丸印）、 C_r が他のものに比べ、大きくなつてゐるのは攪拌によるフロック

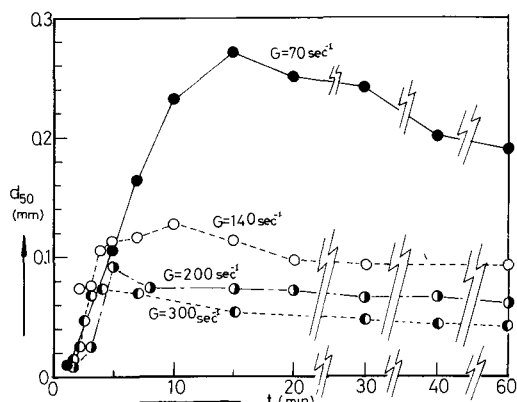


図-11. カオリンフロックの成長

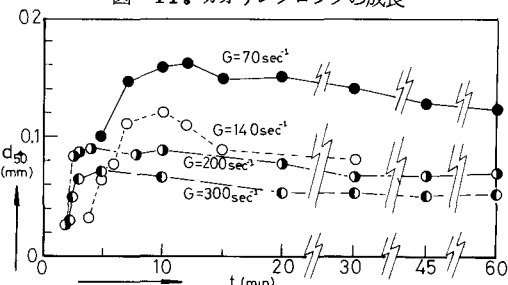


図-12. A1-フロックの成長

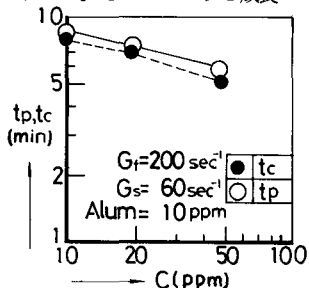


図-13. 濁質濃度と t_p 、 t_c との関係

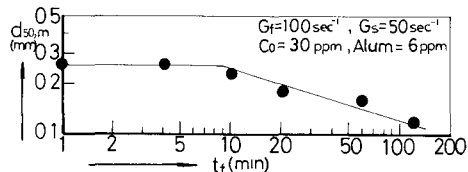


図-14. $d_{50, m}$ と t_f との関係

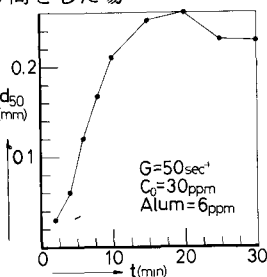


図-15. d_{50} の時間変化

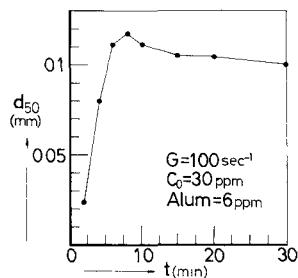
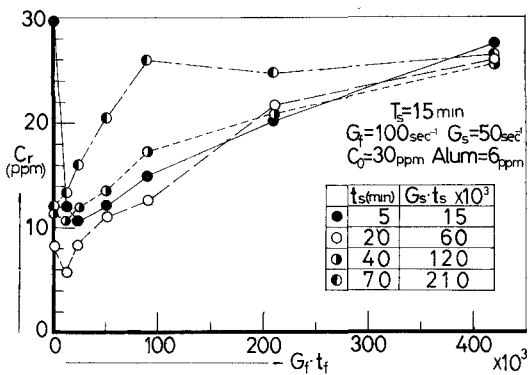
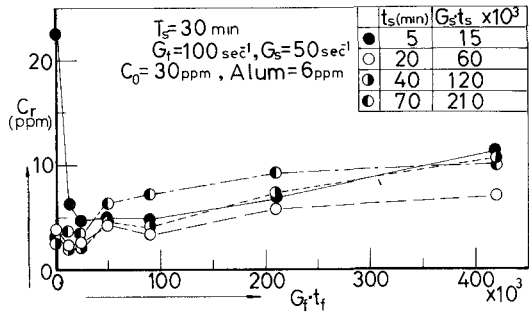


図-16. d_{50} の時間変化

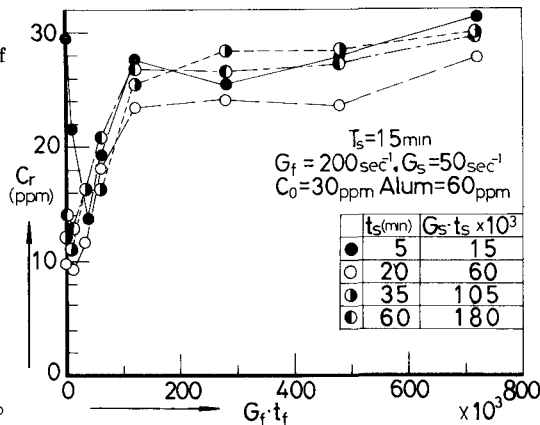
形成が十分行なわれていないためである。さらに、 Cr と Gf , t_f , との関係は大略以下に示す様な傾向にある。すなわち、ある $Gf \cdot t_f$ (以下 $Gf \cdot t_{fc}$ と称する) まで Cr はほぼ一定値を有するか、または減少し、その後、 $Gf \cdot t_f$ の増加に伴い、 Cr は次第に増加することである。今回行なつた実験の範囲内では、 Cr が増加し始める所の $Gf \cdot t_{fc}$ はこれらの図から、緩速攪拌継続時間の値に依らず $Gf \cdot t_{fc} = 30 \times 10^3 \sim 50 \times 10^3$ 程度のほぼ一定値になる事が解る。一方、前述した様に、 $G = 100 \text{ sec}^{-1}$ のみでフロック形成した場合の t_p は図一15から8分程度となり、従つて、その時の $Gf \cdot t_p$ ($\equiv Gf \cdot t_c$) は 48×10^3 程度となる。この事から Cr が増加し始める時の t_{fc} は急速攪拌下での平均径が最大成長に到達する時間 t_p よりも若干短くなる事が解る。さらに、図一15から、 $G = 100 \text{ sec}^{-1}$ で形成した場合の d_{50} の成長速度はほぼ6~7分付近において、かなり急速に低下する事が解る。この d_{50} が低下する主な原因として、前述した様に(図一10参照)破壊が考えられる。従つて、急速攪拌下での破壊は平均径が最大成長に達する以前からも十分始まっているものと考えられる。さらに、図一15において、この d_{50} の成長速度が急速に低下し始める時の $G \cdot T$ 値は $Gf \cdot t_f \approx 40 \times 10^3$ 程度となり、図一17, 18で残留濁度 Cr が増加し始める $Gf \cdot t_{fc}$ の値とほぼ一致する様である。このように、急速攪拌下での $t_f \approx t_p$ 付近における破壊、それに加えて、表面性状の劣化のため、図一17~20において示した様な Cr の増加が生じているものとも思われる。いずれにしても、沈澱池での残留濁度を低くするかあるいはフロックの付着能力を低下させないためには、 t_c あるいは t_p よりも長い時間の急速攪拌は行なわれない方がよいものと思われる。次に、急速攪拌強度と Cr との関係について検討を加えてみる。図一17, 19を比較した場合、 $Gf \cdot t_f$ の値が極端に大きい場合を除いて、若干の差が認められる。すなわち、同一の $Gf \cdot t_f$ でも $Gf = 100 \text{ sec}^{-1}$ で形成した場合の残留濁度の方が $Gf = 200 \text{ sec}^{-1}$ のものより小さくなっている。さらに、静置時間を増せば、図一18, 20からも解るように、 $Gf = 100 \text{ sec}^{-1}$ の場合 Cr が明らかに $Gf = 200 \text{ sec}^{-1}$ のものより小さくなっている。この事は急速攪拌強度の高い方が低いものより破壊による微粒子化が進んでいるためと考えられる。従つて、残留濁度を極力、低下させるためには、攪拌強



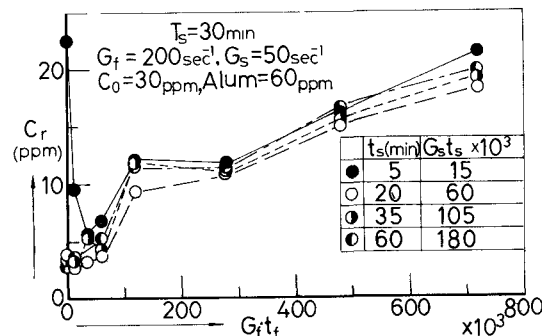
図一17. 残留濁度と t_f との関係



図一18. 残留濁度と t_f との関係



図一19. 残留濁度と t_f との関係



図一20. 残留濁度と t_f との関係

度はでき得る限り小さくする方が好ましいであろう。図-21, 22は緩速攪拌継続時間 t_s と残留濁度 Cr との関係を示したものであり、図中のパラメーターは急速攪拌継続時間 t_f である。これらの図において、双方共、 t_s と Cr との示す傾向はほぼ同様であり、 $t_s = 20$ 分付近において、差程明瞭ではないが、 Cr は最小値を示す様である。一方、緩速攪拌下での d_{50} が最大成長に達する時間は、急速攪拌の条件に依らずほぼ一定値となり（図-4 参照）、緩速攪拌のみで形成した場合の t_p と一致している。従つて、図-21, 22における、緩速攪拌下での平均径は、図-16 から解るようにほぼ 20分程度で最大成長に達しているものと思われる。以上の事から、図-21, 22において、 $t_s = 20$ 分まで Cr が減少するのは緩速攪拌下において未だ成長段階にあるためであり、その後、 t_s が長くなるに従い、 Cr が増加するのは破壊によるものと考えられる。さらに、緩速攪拌の場合 Cr が最小になる時間と t_p がほぼ一致しているのは（急速攪拌の場合 t_p より若干短くなる。）緩速攪拌強度の値自身が小さいため、破壊の影響を急速攪拌時のもの程受けていないためとも考えられる。一方、 $t_s > t_p$ の下では t_s の増加に伴ない濁質の除去効率が次第に低下するので、緩速攪拌下においても、急速攪拌の場合と同様、 t_p より長い攪拌は行なわない方がよいであろう。

4 まとめ

以上の結果をまとめる。

- 1) . 急速攪拌を経て緩速攪拌によりフロック形成を行なつた場合、急速攪拌の継続時間 t_f がある一定の時間 t_c より短いならば、緩速攪拌下での最大成長平均径 $d_{50, m}$ はほぼ一定値となり、 $t_f \gg t_c$ であれば、 t_f の増大と共に $d_{50, m}$ は次第に減少する。
- 2) . 1) で述べた t_c は急速攪拌下での平均径が最大成長に達する時間 t_p とほぼ一致する
- 3) . 1) , 2) で示した t_c あるいは緩速攪拌下での t_p は残留濁度からみたフロック形成のための指標になり得る事を示した。

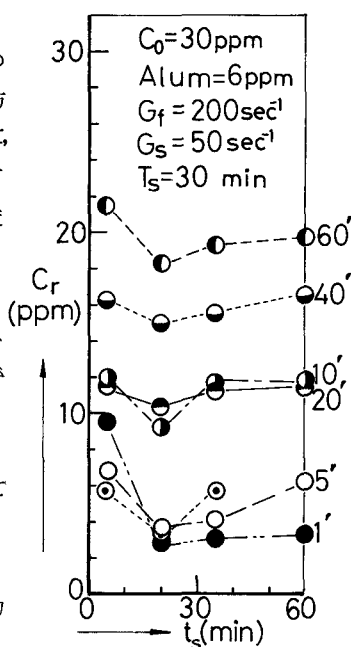


図-21. 残留濁度と t_s との関係

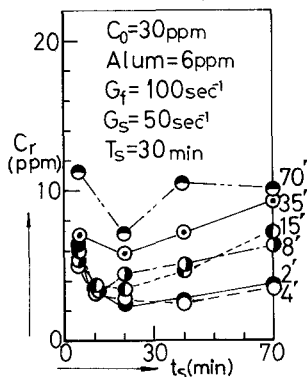


図-22. 残留濁度と t_s との関係

最後に、本研究を行なうにあたり、協力して下さった大学院生 萬久光君に心から感謝致します。なお本研究の一部は文部省科学研究費補助（総合研究（A））を受けて行なつたものである。

5 参考文献

- 1) T.R.Camp, P.C.Stein: Velocity Gradient Internal Work in Fluid Motion, Jour. Boston Society of Civil Eng. Vol. 130, 1943
- 2) 丹保, 渡辺: フロッキュレーターの合理的設計 (II), 水道協会雑誌, No. 441, 1971
- 3) Y.Argaman, W.J.Kaufman: Turbulence and Flocculation, ASCE, 1970, April
- 4) R.A.Villegas, R.D.Letterman: Optimizing Flocculation Power Input, Jour. Eng. Div. 1976, April
- 5) 楠田: フロックの形成条件がその性質に及ぼす影響, 土木学会論文集, No. 217, 1973
- 6) 栗谷, 楠田, 古賀: 攪拌時間及びフロック濃度がフロックの性質に及ぼす影響, 第12回衛生工学討論会 1976. 1