

# フロックの形成条件がその性質におよぼす影響

## EFFECTS ON FLOC PROPERTIES BY CONDITION OF FLOC FORMATION

楠 田 哲 也\*  
By Tetsuya Kusuda

### 1. ま え が き

フロック形成過程は、水処理システム中の重要なプロセスであり、攪拌槽内でフロックを相互に衝突させて成長させる過程である。この過程では、化学的要因に比べて、物理的要因が重視される。

原水に凝集剤および凝集補助剤を注入して攪拌し、フロック形成を行なうと、まずフロックは急速に成長する。ある程度の粒径に達すると成長速度は減少し始め、しばらくすると、フロックの成長と破壊が平衡し、粒度分布に変化がなくなる。その後、粒径は減少し始める。このようなフロック形成過程を明らかにするには、攪拌槽内の水流状態と、この水流に対するフロックの成長と破壊の挙動、の両者を考慮しなければならない。

従来のフロック形成の研究には、Camp の  $G$  値<sup>1)</sup>、 $GT$  値<sup>2)</sup>説をはじめとして、丹保の  $C \cdot G \cdot T$  値<sup>3),4)</sup>説にいたる多数のものがある。しかし、これらの研究は、フロック形成の初期の成長が破壊に比べて卓越している期間に着目しているものがほとんどであり、また、攪拌槽内の水流状態を空間平均として捕えず、さらに、この水流状態に対するフロックの挙動をも考慮していないなど、かなり検討しなければならない余地を残している。

本報は、フロック形成過程の解明の第一段階として、攪拌槽内の水流状態を測定し、これに対応するフロックの挙動を実験的に調べたものである。

### 2. 実験装置と方法

フロック形成に用いたジャーテスターは内径 10 cm<sup>φ</sup>、長さ 38 cm、容量約 3 l の円筒製である。このジャーテスターの固定翼を内壁に、回転翼を回転軸にそれぞれ 90° 間隔になるように取付けた。固定翼と回転翼は同じ

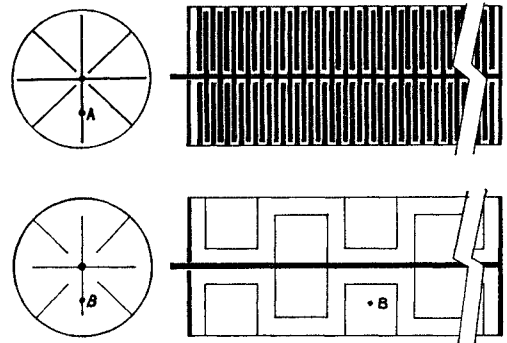


図-1 ジャーテスターの翼型と配列

形である。ジャーテスター内の乱流特性を変えるために、大翼と小翼の 2 種のジャーテスターを作った。大翼は、幅 3.0 cm、長さ 3.0 cm、厚さ 1 mm で、回転翼と固定翼の中心間隔が 4.0 cm、つまり翼間のクリアランスが 1 cm になるように槽内壁と回転軸に取り付けた（以下大翼と称する）。小翼は長さ 4.0 cm、直径 3 mm<sup>φ</sup> で、回転翼と固定翼の中心間隔は 6 mm、翼間のクリアランスは 3 mm になるように取り付けた（以下小翼と称する）。これを 図-1 に示す。このように、翼を均等に多数取り付けたのは槽内の乱れができるだけ均等になるようにするためである。

平均攪拌強度 ( $G$  値) はジャーテスター円筒外周に鍾を下げる方法で求めたトルク ( $T_r$ ) を用いて次式により求めた。

$$G = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\epsilon_0 = \frac{\omega T_r}{V} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\omega$ : 回転軸の角速度、 $V$ : 容積、 $\epsilon_0$ : 単位体積、単位時間当たりのエネルギー散逸量、 $\mu$ : 水の粘性係数、である。

フロック粒度分布を求めるためのフロックの採取は、図-2 のサンプリング装置に、ビニールチューブを取り

\* 正会員 工修 九州大学講師 工学部水工土木学教室

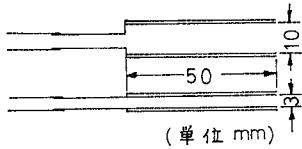


図-2 サンプル装置

付けたものを、ジャーテスター側壁の孔から回転中のジャーテスターの中に入れ、ただちにビニールチューブを折り曲げてフロクが逆流しないようにして行なった。採取後、サンプリング装置を水平にして静置後、顕微鏡写真に撮った。採水後はビニールチューブが折り曲げられているため、他端は開放のままでも、水の表面張力によりフロクと水は流出しない。顕微鏡写真からフロク径を読む際には、直径を1 mm 飛び(直径5 mm 以下は0.5 mm 飛び)で多数の孔をあけたセルロイド板を定規として、フロクに当て、最も近い値を写真倍率で除してフロク径とした。フロク形状が球(円)からはずれているときには、フロクをいくつか分割して、おのおのについての直径( $d_i$ )を求め次式により、フロク体積を求めた。

$$V_f = \frac{\pi}{6} \sum d_i^3 \dots\dots\dots (3)$$

フロクの単粒子沈降速度はジャーテスター円筒の側壁下側に取り付けた小孔の下に5 cm×5 cm×1 mの亚克力樹脂製の角筒を直接取り付け、随時小孔の蓋を開くことにより、フロクを角筒内に沈降させて沈降速度を測り、また、近接撮影によりフロク径を求めた。

学内水道水に、指宿産カオリンを加えたものを原水とし、これに硫酸ばん土と、中性のセパランを加えて、フロクを作った。実験は、すべて20°Cで行なった。

乱流測定には、DISA製の定温度直流加熱方式の熱線流速計(最高応答周波数30 kHz-3 db)とホットフィルムプローブ(最高応答周波数3 kHz-3 db)を使用した。

3. ジャーテスター内の乱流特性

G 値1000での小翼ジャーテスターの固定翼の後部(図-1中のA点)と、大翼ジャーテスターの固定翼の後部(図-1中のB点)におけるエネルギースペクトル(E)の例を、それぞれ図-3,4に示す。小翼ジャーテスター内のエネルギースペクトルには、energy containing eddyの存在が顕著でないが、スペクトルのほぼ中

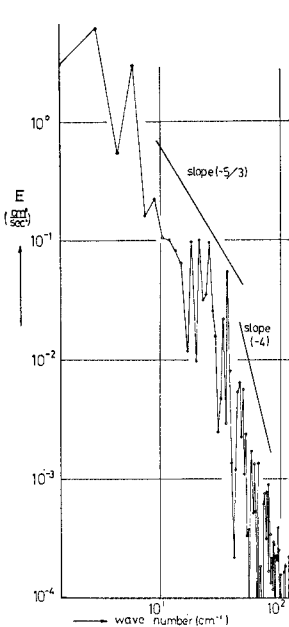


図-3 パワースペクトル (小翼 G 値 1000)

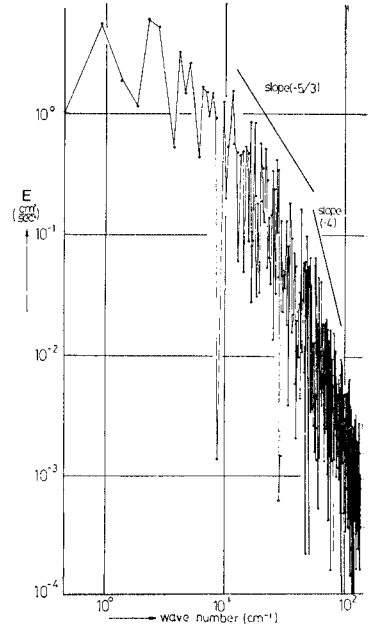


図-4 パワースペクトル (大翼 G 値 1000)

間の極大値が、この eddy と見なされる。この eddy のスケールは約3 mmである。これは小翼の直径と小翼間のクリアランスがともに3 mmであることに対応する。このスケールより大きい渦は円筒スケールの渦が壊れて生じたものと考えられる。小翼攪拌の場合、マイクロスケールと energy containing eddy のスケールが、かなり接近していることが特徴である。大翼ジャーテスター内のエネルギースペクトルには、翼の大きさが3 cm×3 cm、翼間のクリアランスが1 cmであることに対応して、顕著ではないが、energy containing eddy のスケールが1~3 cmの間に分布していることがわかる。さらに、energy containing eddy のスケールから、マイクロスケールまでの区間が長いことが小翼攪拌時のものと異なっている。ほかのG値でのエネルギースペクトルも同様な傾向を示している。G値とマイクロスケール( $\lambda_s$ )の関係を図-5に示す。計算値は次式により求めた。

$$\lambda_s = \left( \frac{\nu^3}{\epsilon_0} \right)^{1/4} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $\nu$ : 水の動粘性係数、である。

実測値としての大翼攪拌時のマイクロスケールのほうが小翼攪拌時のものより小さくなっている。このことは、大翼攪拌の場合、式(4)から明らかなように、測定点において $\epsilon_0$ が大きいことを示している。攪拌槽内の水流によるせん断応力は、翼の近傍で非常に大きな値になることと、この場合の測定点が固定翼の後であり、翼の

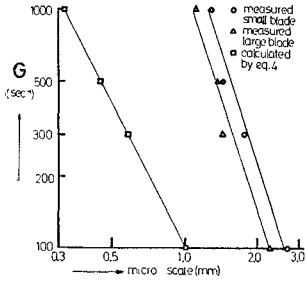


図-5 G 値とマイクロスケール

縁でないことを合わせ考えると、大翼の場合より小翼の場合のほうが、翼近傍でのエネルギー散逸量が大きいことを示している。したがって、このことは等しい G 値で搅拌しても、 $\epsilon_0$  の空間分布に

は、かなりの差が存在することを示している。いい換えれば、大翼で搅拌するほうが小翼で搅拌するより乱れは空間的に均等であると考えられる。

フロク直径は通常 1 mm より小さいので、マイクロスケールのほうが、フロク直径より数倍大きいと考えられる。

等方性乱流の場合、せん断速度のスペクトル  $S(k)$  はエネルギースペクトル  $E(k)$  に  $k^2$  を乗ずることにより得られる。慣性域で

$$E(k) \sim \epsilon_0^{2/3} k^{-5/3} \dots\dots\dots (5)$$

$$S(k) \sim \epsilon_0^{2/3} k^{1/3} \dots\dots\dots (6)$$

粘性域で

$$E(k) \sim \epsilon_0^2 k^{-4} \dots\dots\dots (7)$$

$$S(k) \sim \epsilon_0^2 k^{-2} \dots\dots\dots (8)$$

となり、せん断速度のスペクトルのピークはマイクロスケールを示す式 (4) と一致する。

#### 4. 実験結果と考察

##### (1) 搅拌翼型の違いによるフロク粒度分布の差

G 値 100 の一定搅拌強度で連続搅拌した場合の、流体単位体積中の累加フロク体積 ( $V_{fac}$ ) とフロク体積 ( $V_f$ ) の関係を 図-6 (大翼の場合)、図-7 (小翼の場合) に示す。濃度はともに 1000 ppm である。

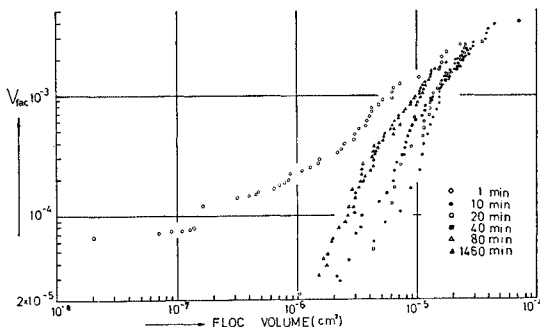


図-6 累加フロク体積曲線の時間変化 (大翼 G 値 100 連続)

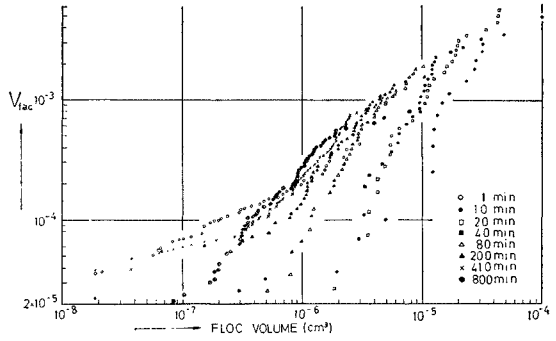


図-7 累加フロク体積曲線の時間変化 (小翼 G 値 100 連続)

薬品注入完了後 1 分では、両者とも小フロクがかなり多く、フロク粒度も広汎に分布している。搅拌時間が長くなるにつれて、小翼搅拌の場合には、累加フロク体積曲線の勾配が、徐々に緩やかになるとともに、曲線の上端は横軸と 45° の角をなす線上を左下に下っていく。これらの図の表示法によれば、フロクの成長、破壊に際して密度の変化がないならば、累加フロク体積は一定なので、この曲線の上端は横軸に対して平行移動するだけであり、また、フロク粒度分布に相似性があれば、この曲線形に変化は生じない。したがって、この曲線形および曲線の上端の位置に変化が生じるときは、フロクの成長、破壊のため、フロク径、フロク密度に変化が生じるなどの理由により、粒度分布の相似性がなくなり、累加体積が変化するときである。このことから、小翼搅拌時には、フロクには、かなりの破壊と密度変化があるとみなされる。大翼搅拌の場合には、搅拌時間が長くなっても、累加フロク体積曲線の曲線形にあまり変化がなく、粒度分布に相似性がほぼ成立しているとみなされる。同じ搅拌継続時間ならば、大翼搅拌のほうが、小翼搅拌よりも、累加フロク体積曲線の勾配が急、つまり、大フロクの割合が多いことを示している。

平均的なフロク体積の搅拌継続時間による変化を見るために、流体単位体積中の累加フロク体積が全累加体積の 1/2 になるときのフロク体積 ( $V_{f50}$ ) と搅拌継続時間 ( $T$ ) の関係を、G 値 100 あるいは 1000 で、大翼あるいは小翼搅拌のそれぞれについて、図-8 に示す。G 値 100 の場合、搅拌初期の大翼搅拌と小翼搅拌による差は、ほとんどない。搅拌時間が長くなるにつれ、大翼搅拌時の  $V_{f50}$  のほうが、小翼搅拌時のそれより大きくなる。大翼搅拌時に  $V_{f50}$  が搅拌時間経過とともに、あまり小さくならないのは、前節で述べた搅拌槽内の G 値の空間分布が均等に近いため、フロクの破壊があまり生じないことによると考えられる。小翼搅拌時には、G 値の空間分布の偏りがかなり大きいため、フ

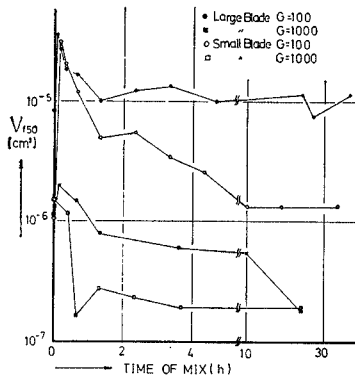


図-8 連続攪拌時の  $V_{f50}$  の変化

ロックは平均  $G$  値より高い  $G$  値でかなり破壊されると考えられる。フロックが新鮮な間は、sticking ratio が 1 に近いため、フロックが破壊されても、槽内の相対的に  $G$  値の小さな空間で、フロックが容易に成長

するので、フロック粒度分布曲線の変化は少ないが、攪拌時間の経過につれて、sticking ratio が減少し、一度破壊されたフロックは、元の粒径まで回復し難くとなると考えられる。このため、累加フロック体積曲線の勾配が図-7 のように緩やかになり、また、 $V_{f50}$  も小さくなると考えられる。以上のことから、フロック形成の算定に従来用いられていた  $G$  値を空間平均として採用することは誤りであることがわかる。したがって、フロックの成長・破壊を論ずるには、 $G$  値の空間分布とこの空間へのフロックの流入割合の両者を考慮しなければならないことを示唆していると考えられる。また、フロック形成を実用上よくするには、できるだけ均等な乱れの場合で行なうほうがよいことがわかる。

(2)  $GT$  値の違いによる粒度分布の差

小翼で攪拌し、攪拌初期に急速攪拌として  $G$  値 1000 で 20 分攪拌した後  $G$  値 100 に下げて攪拌を継続したときの累加フロック体積曲線の変化を 図-9 に示す。濃度は 1000 ppm である。時間原点は  $G$  値 100 の攪拌開始点である。この場合、累加フロック体積曲線にかなりの相似性が成立している。急速攪拌のみを  $G$  値

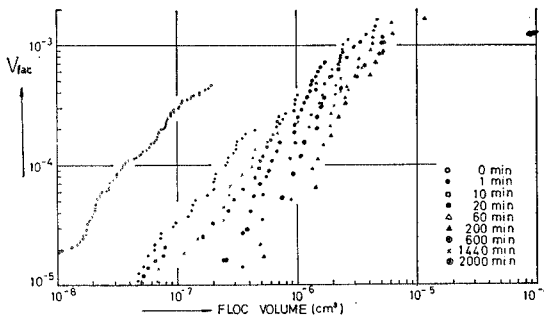


図-9 累加フロック体積曲線の時間変化 (小翼  $G$  値 1000 (20分)→100)

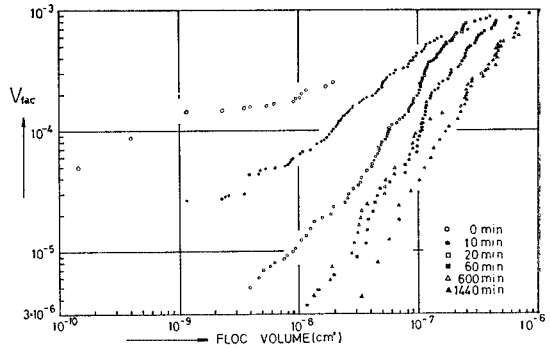


図-10 累加フロック体積曲線の時間変化 (小翼  $G$  値 10000 (2分)→100)

10000 で 2 分攪拌とし、ほかは上述と同じ条件で累加フロック体積曲線の変化を求めたものを 図-10 に示す。急速攪拌終了後のフロック粒度は広汎に分布しており、攪拌時間の経過につれ累加フロック体積曲線の勾配が急になっている。 $G$  値 100 に変更後 20 分位から相似性が成立し始めているが、この相似性が成立し始めるまでの時間、つまり、最大限まで成長する時間が前者に比べて非常に長い。

小翼で急速攪拌として  $G$  値 1000 で 2 分、20 分、200 分それぞれ攪拌した後、 $G$  値 100 で攪拌したものと、 $G$  値 10000 で 2 分攪拌後  $G$  値 100 で攪拌したものの  $V_{f50}$  の時間変化を 図-11 に示す。

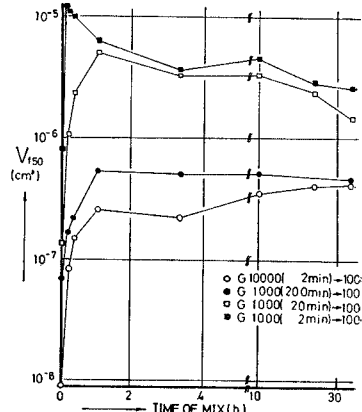
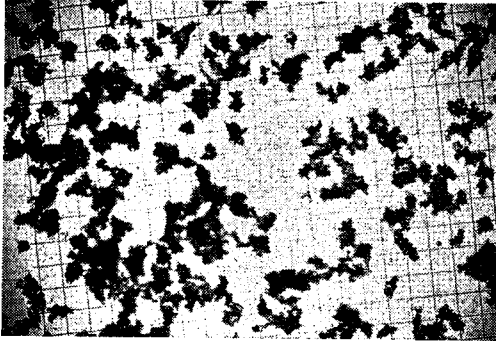
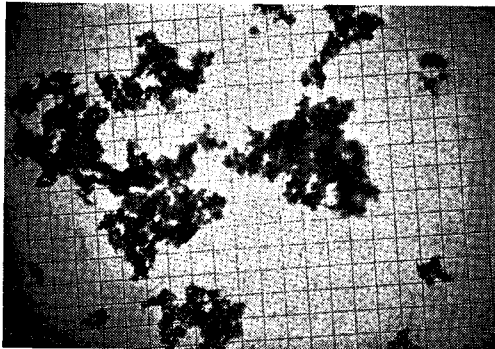


図-11 急速攪拌条件の違いによる  $V_{f50}$  の変化

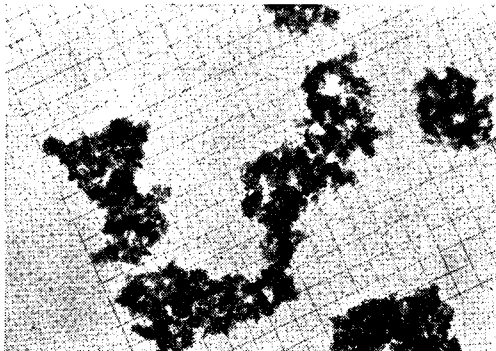
この場合、 $GT$  値は、それぞれ、 $2 \times 10^3$ 、 $2 \times 10^4$ 、 $2 \times 10^5$ 、 $2 \times 10^6$  となり、 $G$  値 1000 で 20 分攪拌と  $G$  値 10000 で 2 分攪拌とは、急速攪拌としての  $GT$  値は等しくなる。この図から、急速攪拌としての  $G$  値が等しいならば、 $V_{f50}$  は攪拌時間が長いほど小さくなり、同じ攪拌時間ならば  $G$  値が大きいのほど小さくなる。また、急速攪拌の  $GT$  値が等しいなら、 $G$  値が大きいのほど  $V_{f50}$  は小さくなる。この現象は、ブランケット内のフロックをその時点までに受けた  $G$  値より大きい  $G$  値で攪拌し破壊すると、フロックを長時間浮遊平衡させても、もとの粒径にまで回復しないという事実と一致することを示している。



写真—1 G 値 1 000, 20 分後のフロク



写真—2 G 値 1 000 (20 分)→100, 1 分後のフロク



写真—3 G 値 1 000 (20 分)→100, 1 時間後のフロク

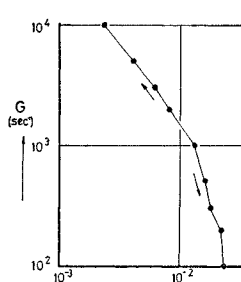
G 値 1 000 で 20 分間急速攪拌した場合のフロクの状態を写真—1 に示す。この後、G 値を 100 として 1 分攪拌後の状態を写真—2 に、1 時間後の状態を写真—3 に示す。これらから、急速攪拌終了時の粒径が緩速攪拌に入っても、Sub-structure として保たれていることがわかる。さらに、急速攪拌として G 値 1 000 で 20 分攪拌し、その後 G 値を減じながら、500, 300, 200 で 20 分ずつ攪拌を繰り返した場合と、G 値 1 000 で 20 分攪拌後 G 値を 2 000, 3 000, 5 000 と増加させながらおのの 20 分ずつ攪拌したときの G 値と  $V_{f50}$  なる体積をもつフロク径の関係を 図—12 に示す。G 値を増加させた場合のほうが、減少させた場合より  $V_{f50}$

は急激に減少する。これらの事実から、攪拌強度に対して示すフロクの履歴性は、フロクを構成する基本粒子の存在に起因すると考えられる。この基本粒子径は、フロクをビンガム体として、その時点以前に受けた緩和時間より長い作用時間を持った G 値の最大値により決定され、攪拌の継続により均質化が促進されると思われる。したがって、実際のフロク形成は、あまり高い G 値で行なわないほうがよいと考えられる。

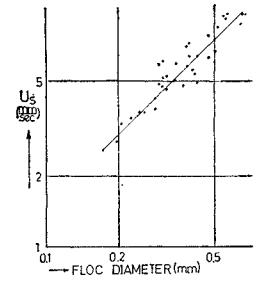
(3) フロクの単粒子沈降速度に及ぼす攪拌の影響

図—13, 14, 15, 16 に単粒子沈降速度 ( $U_s$ ) とフロク径 ( $d$ ) の関係の測定例を、図—17 に

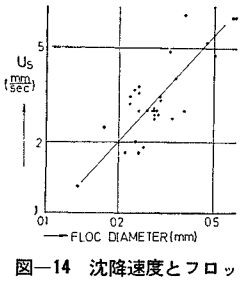
$$U_s = U_{s0} \left( \frac{d}{d_0} \right)^k \dots\dots\dots (9)$$



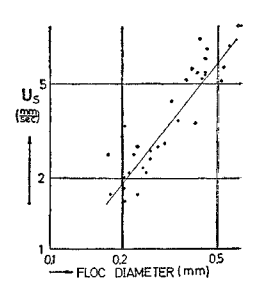
図—12 攪拌強度の違いによるフロク径の変化



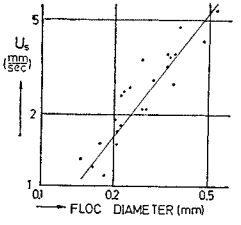
図—13 沈降速度とフロク径 (大翼 G 値 100 連続 12 時間目)



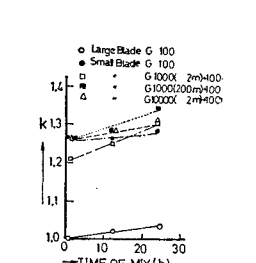
図—14 沈降速度とフロク径 (小翼 G 値 100 連続 12 時間目)



図—15 沈降速度とフロク径 (大翼 G 値 1 000 (2 分)→100 12 時間目)



図—16 沈降速度とフロク径 (小翼 G 値 10 000 (2 分)→100, 12 時間目)



図—17 攪拌条件による K の差

としたときの、 $k$ と攪拌時間 ( $T$ ) の関係を示す。ここで、 $U_{s0}$ ：任意の直径  $d_0$  のフロックの単粒子沈降速度である。このとき、硫酸ばん土注入量は 40 ppm、セパン注入量は 6 ppm で、濃度は 1000 ppm である。この表現では、粒子が非透水性で沈降時のレイノルズ数が 1 より十分小さいならば、 $k=2$  となる。つまり、 $k$  が 0 に近いほど粒径の増加に伴う密度の減少が大きいことを示している。攪拌時間が長くなるにつれて、 $k$  は漸増しているが、平均的に見れば、大翼攪拌の場合、 $k \approx 1.0$ 、小翼攪拌の場合  $k=1.3$  となっている。通常のフロック直径の範囲 ( $\leq 1\text{mm}$ ) において、同じフロック径のものについて比較すると、急速攪拌時の  $G$  値が小さいほど沈降速度は大きく、また、攪拌翼が大きいほど沈降速度は大きくなっている。この現象は、いかなる  $G$  値、いかなり攪拌翼で攪拌しても、フロックの内部構造は同じで、ただフロック径のみが変化すると仮定すると起こり得ない。したがって、基本粒子径およびフロックの内部構造がフロック形成条件により異なり、このためフロックの沈降に際してフロック内部を通過する流速が異なる、つまり透水性<sup>3)</sup>に差が生じ、この差により生じるフロックの沈降速度差がフロックの密度差により生じる沈降速度差以上にフロックの沈降に影響をおよぼすとも考えられる。

(4) フロックの破壊

$G$  値 100 で攪拌しながら、凝集剤と凝集補助剤を注入し、フロック形成を 20 分間行なう。その後、 $G$  値を 200, 300, 500, 1000 のいずれかに変えて、フロックを破壊する。 $G$  値増加後の  $V_{f50}$  の変化を数秒間隔で求め、 $V_{f50}$  の変化の勾配を  $V_{f50}$  で除したものと  $G$  値の関係を、小翼攪拌、濃度 1000 ppm の場合について示すと 図-18 のよう

になる。

フロックはビンガム体であること、それまでに受けた最大  $G$  値で定まる基本粒子が存在することと、図-18 の結果から、フロックが表面から微少片となつて破壊していくのではなく完全に崩壊するときには、CGT の考え方に対応する破壊を示す式は

$$(\mu G - \tau_y) T \dots\dots\dots(10)$$

となる。 $\tau_y$  は、ビンガム降伏値で、フロックが基本粒子として存在しているときは基本粒子のビンガム降伏値を基本粒子の集合体として存在しているときには、この集合体のビンガム降伏値となるが、この値は、おのおのの

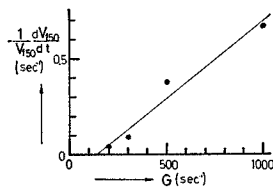


図-18 攪拌強度が  $V_{f50}$  の時間変化率におよぼす影響

フロックの形成条件、直径などによりフロックごとに異なる。

フロックの形成と破壊を厳密に表現しようとすれば、フロック 1 個ずつの履歴つまり  $\tau_y$  にまで着目しなければならない。近似的に同じ体積を持つフロックの履歴を平均して考え、粒径による密度変化を無視するならば、一様せん断流場におけるフロックの形成と破壊の近似式は、次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial n(v)}{\partial t} = & \int_0^v \alpha_s \alpha_c G n(\tilde{v}) n(v-\tilde{v}) [\tilde{v}^{1/3} \\ & + (v-\tilde{v})^{1/3}]^3 d\tilde{v} \\ & - n(v) \int_0^\infty \alpha_s \alpha_c G n(\tilde{v}) [\tilde{v}^{1/3} + v^{1/3}]^3 d\tilde{v} \\ & - f(\mu G - \tau_y) n(v) \\ & + \int_v^\infty f(\mu G - \tau_y) g(v, \tilde{v}) n(\tilde{v}) d\tilde{v} \\ & \dots\dots\dots(11) \end{aligned}$$

ここで、 $n(v)$ ： $v$  なる体積を持つ単位体積当たりのフロック個数、 $\tilde{v}$ ：フロック体積、 $\alpha_s$ ：Sticking ratio で、 $v, G$ 、フロックの履歴、薬品の種類、注入量、粘土の種類などの関数、 $\alpha_c$ ：衝突確率関数で、 $v$  と  $\tilde{v}$  の関数、 $\tau_y$ ：フロックのせん断強度、 $\mu$ ：流体の粘性係数、 $f(\mu G - \tau_y)$ ：破壊を示す関数で、 $\mu G < \tau_y$  のときは表面破壊を示し、 $\mu G \geq \tau_y$  のときは完全崩壊を示す、 $g(v, \tilde{v})$ ： $\tilde{v}(\tilde{v} > v)$  なる体積のフロックが破壊して、 $v$  なる体積のフロックが生じる確率、である。

攪拌槽内でのフロック形成と破壊を考える際には、 $G$  値が空間的に一様でないため  $G$  値の空間分布の影響を受ける。

5. ま と め

以上の結果をまとめる。

(1) フロックが攪拌により受けたせん断応力のうちで、この応力の作用時間が緩和時間より長いものの中で最大のものにより、フロックの基本粒子径が定められる。

(2) フロックは、1 個または複数個の基本粒子より構成されている。

(3) 攪拌槽、攪拌翼の形状が異なると、槽内のせん断応力分布が異なるので、等しい平均  $G$  値で攪拌しても、フロックの粒度分布曲線は異なる。つまり、槽内の平均  $G$  値でフロック形成を論じられない。 $G$  値の空間分布とフロックの空間内での存在確率により、フロック形成を論じなければならない。

(4) 攪拌翼、攪拌槽の形状が同じならば、凝集段階と攪拌強度が、かなり変化するときを除いて、ほぼ、フロック粒度分布に相似性が成立する。ただし、定常状態

でも、長時間攪拌を行なうと細かいフロクが増加するので、長い攪拌時間を考えると相似性が存在しないこともある。

(5) 攪拌槽内の攪拌強度が同一ならば、攪拌強度分布が均一なほど、平均フロク径は大きくなり、同じ径に対する単粒子沈降速度も通常フロク径の範囲ならば、大きくなる。

(6) フロクの基本粒子径を変えない攪拌条件下での攪拌条件の違いによる平均径の変化はあまり大きくない。一方、フロクの基本粒子径を小さくする攪拌条件下での攪拌によりフロクの平均径は大幅に変化する。

(7) Sticking ratio はフロクの離合集散の回数が増加するにつれて減少する。

(8) フロクには攪拌に対して履歴性が存在する。したがって、攪拌強度が異なる場合に  $GT$  値でフロク形成を比較することはできない。

(9) フロク成長の式  $CGT$  に対応するフロク破壊の式は  $(\mu G - \tau_y)T$  となる。フロク個々につい

ての破壊の式も類似の表現  $(\mu G - \tau_y)dt$  になると考えられる。

おわりに、本研究を行なうにあたり、終始ご指導下さいました九州大学 粟谷陽一教授と実験に協力して下さいました大学院生 江副章之介、古賀憲一の両君に感謝いたします。

#### 参 考 文 献

- 1) Camp, T.R., Stein, P.C.: Velocity Gradients and Internal Work in Fluid Motion, J. Boston S.C.E., Vol. 30, p. 219-237, 1943.10.
- 2) Camp, T.R.: Flocculation and Flocculation Basin, Proc. A.S.C.E., Vol. 79, No. 283, p. 283-1~18, 1933. 9
- 3) 丹保憲仁: フロク形成過程の基礎的研究 (I), 水道協会雑誌, 372号, p. 10~19, 昭和40年9月.
- 4) 丹保憲仁: フロク形成過程の基礎的研究 (II), 水道協会雑誌, 381号, p. 14~22, 昭和41年6月.
- 5) 楠田哲也: フロクの透水性と衝突効率に及ぼす影響, 水道協会雑誌, 462号, p. 2~9, 昭和48年3月.

(1973.3.13・受付)