

## 1. まえがき

フロック形成は水処理システムにおいて重要なプロセスである。この基礎的性質について近年かなり明確にされつつあるが完全に解明されるに至っていない。フロックの基礎的性質として、フロック密度関数が沈降法により丹保<sup>1),2)</sup>により、また蔗糖液中に浮かせることにより Lagvanker と Gemmell<sup>3)</sup>により求められている。フロックの構造は立体的で空隙がかなり多いため沈降や濁質除去について考慮する際にはフロックの透水性も無視できない。この透水性については著者により明らかにされている。フロックの内部構造に関して実際に観察したものは見受けられないが、計算機を用いて simulation<sup>4)</sup>により Gemmell<sup>3)</sup>、丹保<sup>1)</sup>により求められている。フロック形成の理論的解明はフロック形成に際しての影響因子としての Camp の  $G$  値、 $G_T$  値<sup>5)</sup>を Levich の energy dissipation  $\bar{E}$ <sup>6)</sup>にええ Smoluchowski の Brownian motion<sup>7)</sup>時の粒子成長理論を組合せて丹保<sup>1),2)</sup>により解明されている。さらに同氏<sup>3)</sup>により、フロックの最大成長限度径やフロッキュレーターの設計法<sup>10),11),12)</sup>についても考察が進められている。このように以前に較べかなりフロッキュレーターの合理的設計が可能になってきているがフロックの物性の内でフロック形成時の乱流の性質およびこの性質がフロック形成に及ぼす影響等かなり重要な因子が看過されている。

本研究ではこの看過されていたフロックの基礎的性質の内、フロッキュレーターの乱流特性によるフロッキュレーションの差およびフロック粒度の攪拌による影響等を中心に若干の知見を得たので報告する。

## 2. 実験装置

フロッキュレーターのモデルとして用いたジャーテスターは水平攪拌式の内径  $10\text{ cm}$ 、長さ  $38.2\text{ cm}$  容量  $3\text{ l}$  の円筒で攪拌装置は乱流特性を大幅に変化させるために図-1 (以下小翼という)、図-2

(以下大翼という)のように翼を大小の2種に変えられるようにした。 $G$  値はジャーテスター外周に錘を下げる法でトルク  $T$  を求め次の式により求めた。

$$W = \frac{2\pi m T}{V} \quad (1)$$

$$G = (W/\mu)^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 $m$ : 翼の回転数、 $V$ : 容器体積  
駆動はSCR制御の直流モーターを使用し回転数は瞬間的に変える。

フロックの沈降速度はジャーテスター円筒の下側側壁に取付けた蓋付の小孔

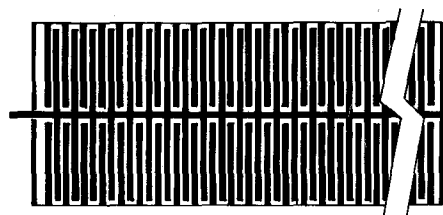
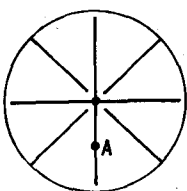


図-1 小翼ジャーテスタ

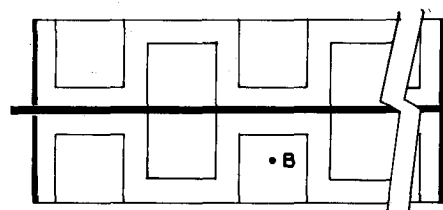
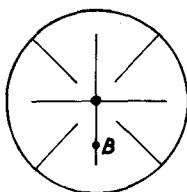


図-2 大翼ジャーテスタ

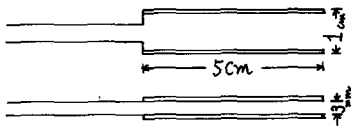


図-3 サンプリング装置

に  $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 1\text{m}$  のアクリル製の角筒を取付け、随時蓋を開くことによりフロックを筒内に沈降させ沈降速度を測りこのフロックを近接撮影してフロック径を求めた。

フロックの粒度分布測定のためのサンプリング装置(図-3)を回転中のジャーテスト内に入れてサンプリングを行なった。これはガラスとアクリル板からできている。サンプリング後3分静置の後顕微鏡写真に撮りこれを幾取りフロック体積と累加体積を求めた。

ジャーテスト内の乱流特性はDISA社製 Hot film 式流速計を用いて求めた。

フロックは学内水道水にカオリン  $1\frac{1}{2}$  とばん土とセパランを添加して作った。

実験は恒温室で行ない  $20^\circ\text{C}$  であった。

### 3. ジャーテスト内の乱流特性

小翼の固定翼の後部で図-1のA点におけるG値1000での乱流特性を図-4に示す。barの直径は3mmであり翼間隔も3mmであることから energy-containing eddy のスケールと一致する。これより少ない波数での energy は円筒のスケールの渦が壊れて生じたと考えられる。小翼の場合 micro-scale 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。

大翼の固定翼の後部で図-1のB点におけるG値1000での乱流特性を図-5に示す。固定翼、回転翼共  $3\text{cm} \times 3\text{cm}$  で翼間は1cmである。これに対応して、

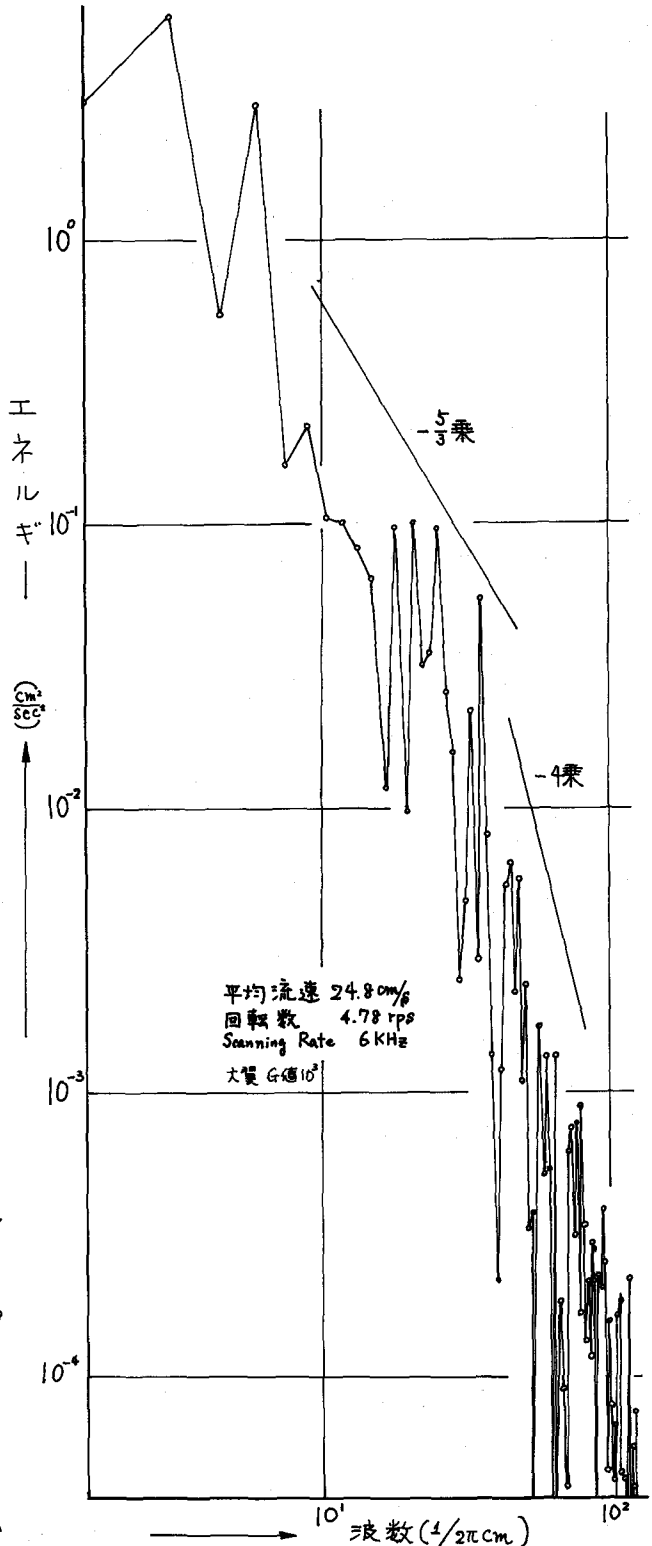


図-4 小翼・G値1000のパワー・スペクトル

energy containing eddy のスケールは 3 cm から 1 cm まで分布しているのが顕著なピークは見られないが, energy containing eddy のスケールから micro-scale までの区間つまり  $-\frac{5}{3}$  乗則に合致する区間が長いということが小翼の場合とは異なる点である。また空間的な G 値の分布についてみれば G 値が最大となる場所は小翼の方が大翼に較べて非常に多いと考えられる。

micro-scale は両者共ほとんど一致する。

またパワースペクトル E(k) において、慣性域では

$$E(k) \sim \varepsilon^{\frac{1}{3}} k^{-\frac{5}{3}} \quad (3)$$

が成立するとき Shear のスペクトル S(k) は

$$S(k) \sim \varepsilon^{\frac{1}{3}} k^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

となり粘性域では

$$E(k) \sim \varepsilon^2 k^{-4} \quad (5)$$

$$S(k) \sim \varepsilon^2 k^{-2} \quad (6)$$

が成立する。この Shear のスペクトルのピークは、micro-scale

$$\lambda_0 \sim \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

となる。

このような乱流特性は攪拌槽内の場合の関数となる。

(7) による micro-scale

と実験から求めた  $\lambda_0$  とは図-9 のように同じ勾配を与える。

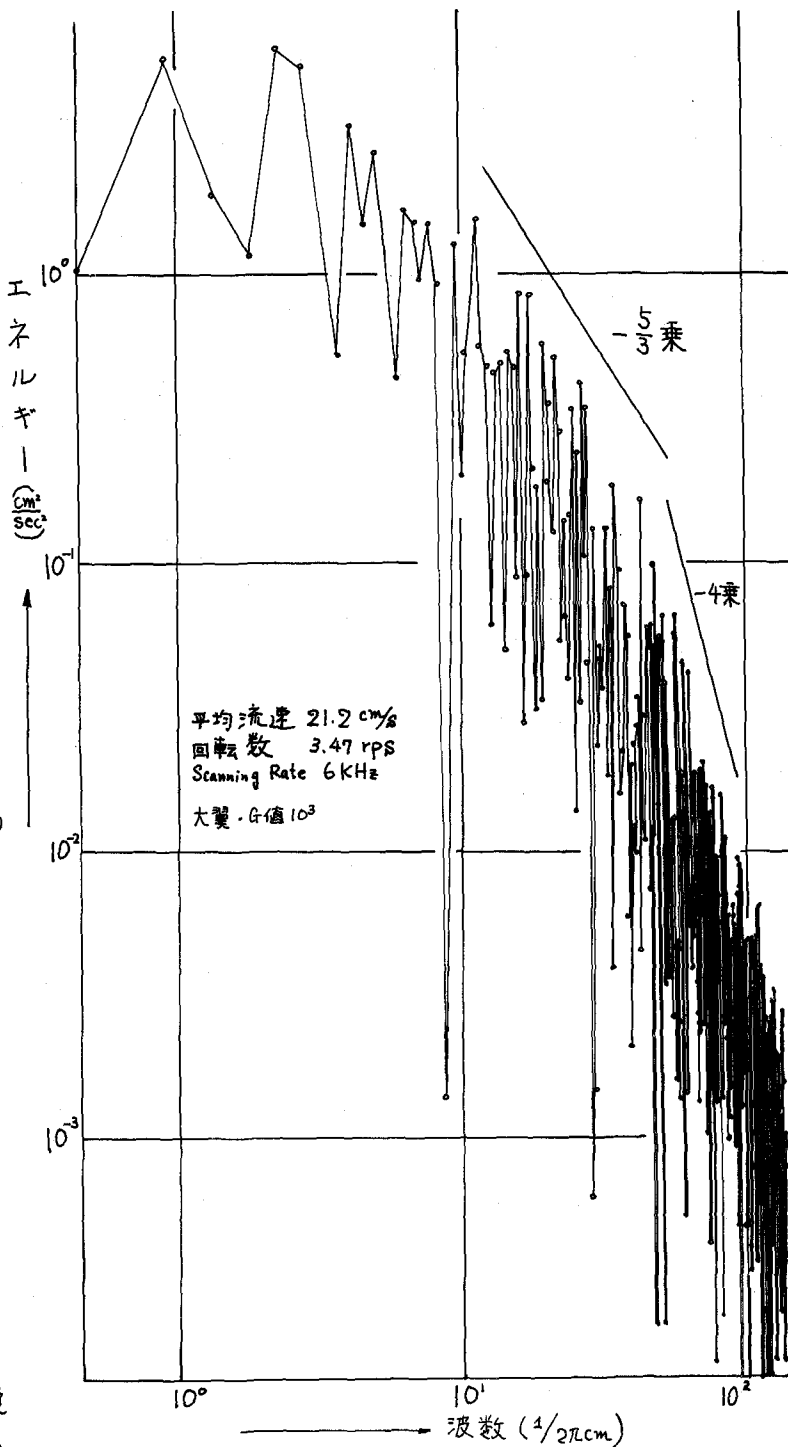


図-5 大翼 G 値 1000 の パワースペクトル

#### 4. フロック粒度の時間変化および攪拌強度特性

##### 4-1. フロック粒度分布

図-6に  
G値100で  
連続攪拌し  
た場合の例  
を示す。前  
報同様その  
分布形が、  
Self-preserv-  
ingを示す  
のでフロク  
クの粒度の  
変化はフロ  
ックの累加

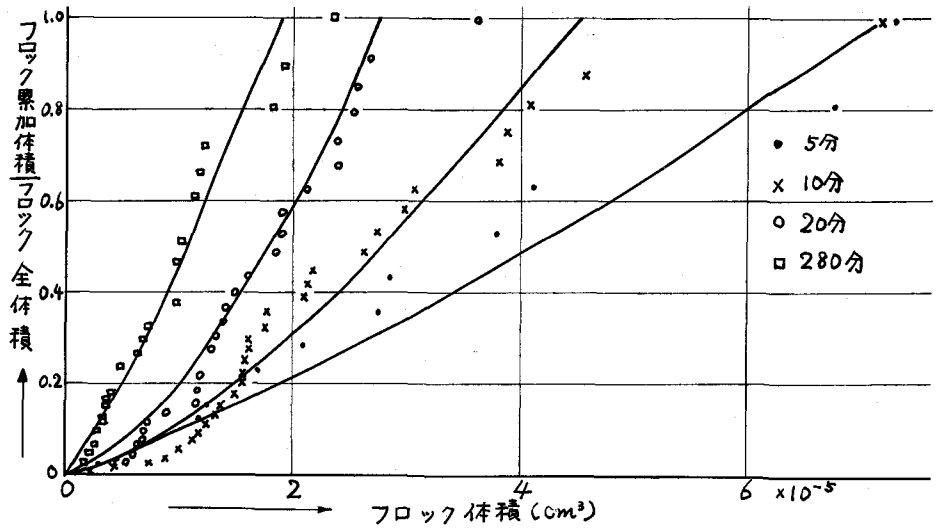


図-6 G値100で連続攪拌時のフロック粒度

体積が50%になる点のフ  
ロック体積( $V_{50}$ と称す  
る)により示しうると考  
えられる。

##### 4-2. 翼の大小による 差

G値100あるいはG値  
1000で連続攪拌した場  
合の $V_{50}$ の変化を図-7  
に示す。翼の大きい方が  
 $V_{50}$ が大きいことが解る。  
このことはフロックの成  
長は従来C-G<sup>(10)</sup>により示  
されているがこのGとし  
てたとえ $\sqrt{g/\mu}$ <sup>(10)</sup>を採用し  
たとしても、空間的時間  
的平均としての値を使用  
しては現象を本質的に表  
現することはできないこ  
とを示している。つまり  
乱れの変動速度を空間的

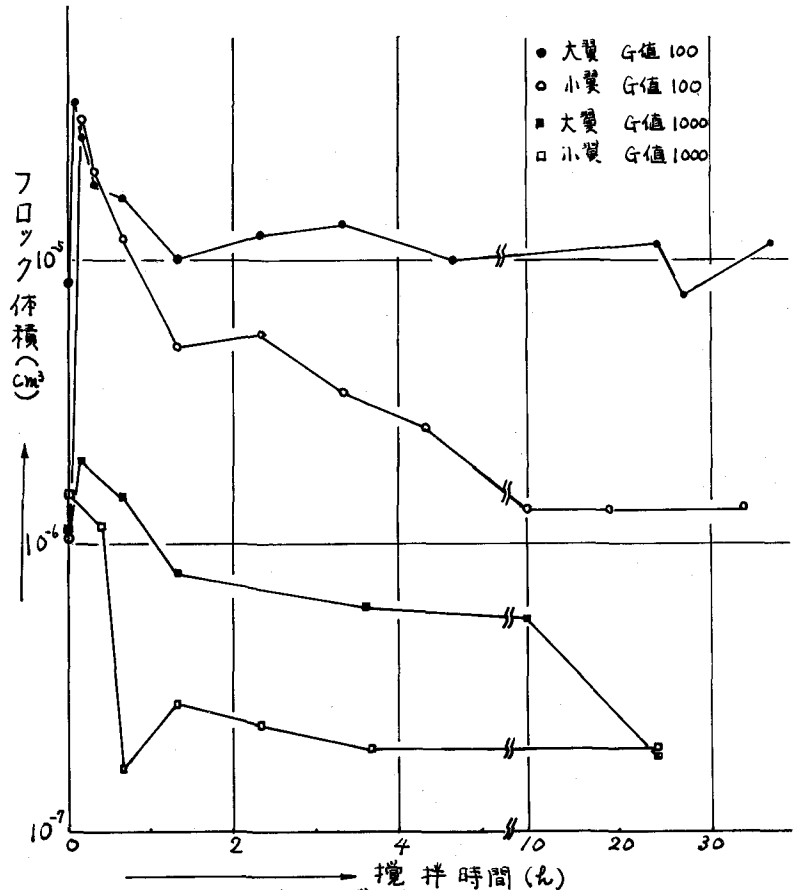


図-7 連続攪拌時の $V_{50}$ の変化

に展開して表示した場合  
平均流速に相当する項の  
次項は $G$ 値として示され  
たものに等しくなる。層  
流としての $G$ 値でなく乳  
流をミクロに見た場合の  
 $G$ 値として $G$ 値を再定義  
すれば $G$ 値を空間的時間  
的関数として考えなければ  
ならない。またこの定  
義による $G$ 値を用いれば  
ミクロにみた成長を示す  
式は

$$C \cdot G \cdot T \quad (8)$$

となり(8)を導く際の  
考え方でフロックの破壊  
を示す式を表現すると、  
フロックをBingham body  
として降伏値を $\tau_0$ とすれ  
ば

$$(\mu G - \tau_0) T \quad (9)$$

となり(8)と(9)のバ  
ランスで粒径が決定される。

同じ $G$ 値でも $G$ 値の最  
大値の空間分布の少ない  
大翼の方がフロックは大  
きくなりうる。

#### 4-3. フロック粒度の 時間変化

フロックの $\bar{v}_{50}$ の急激  
な変化は約1時間程短く  
ことが図-7から解る。  
時間が経過するほど $\bar{v}_{50}$   
の変化は少なくなるが、  
これはフロックの各々が  
攪拌開始初期ほどには離

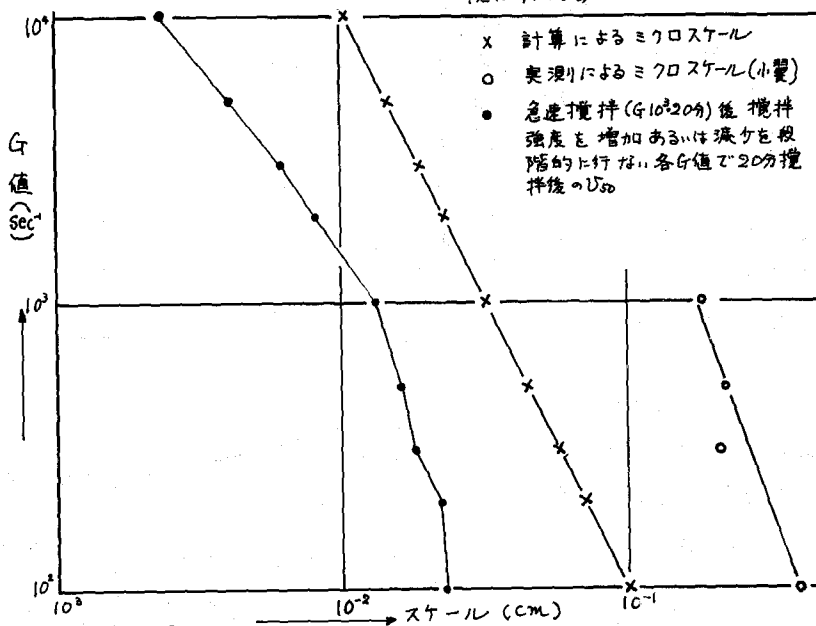
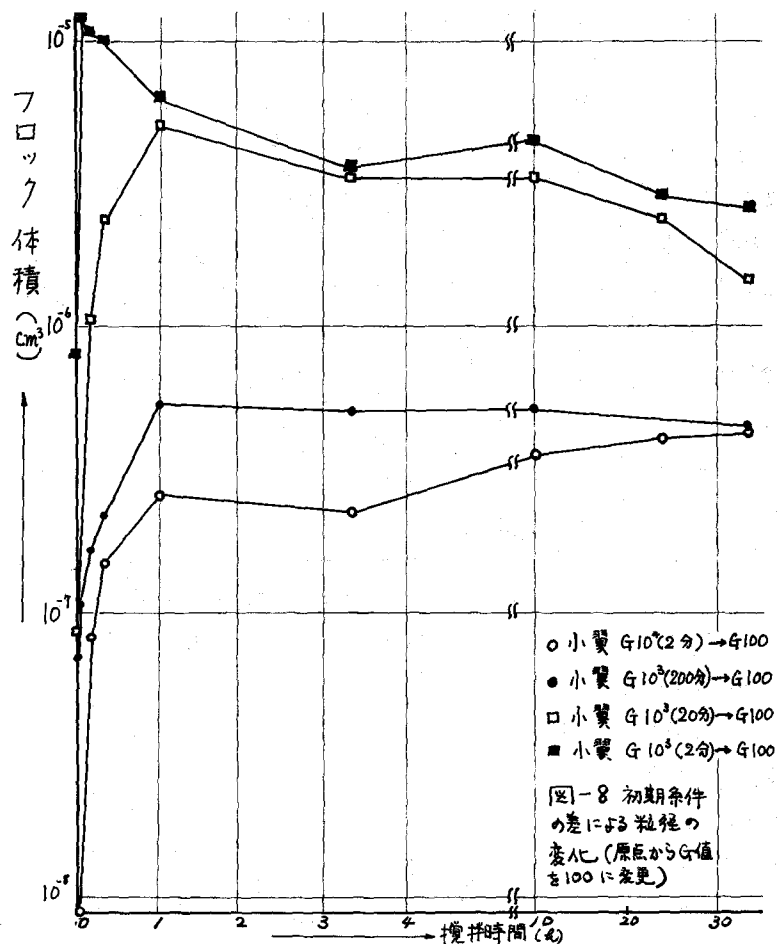


図-9

合衆散をしないなる、つまりフロックの表面活性度の低下により各フロックが落着いてきたことを示している。

#### 4-4. フロックの攪拌特性

急速攪拌強度 ( $G$  値  $10^3$ ) が同じでこの攪拌時間が異なるものと強度の違うもの ( $G$  値  $10^4$ ) を図-8 に示す。短時間といえども一度高い  $G$  値で攪拌されるとその後如何に緩速攪拌 ( $G$  値  $100$ ) を行っても  $\eta_{sp}$  は小さいままであること、また同じ急速攪拌の  $G$  値ならば攪拌時間が長い方が  $\eta_{sp}$  がもっとも小さい。この現象はブランケット内のフロックとその時点までに受けた  $G$  値より高い  $G$  値で攪拌して破壊すると長時間放置してももとの粒径に回復しないという事実と一致する。これはフロックに履歴性が存在することを意味し本質的にはフロックを構成する基本粒子 (Coagulation 終) 時の primary floc とは異なる) なるものが存在し基本粒子径はその時点以前にうけた持続時間がフロック破壊の時定数より長い  $G$  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もので一度基本粒子が構成されると如何にフロッキュレーションが進んでも基本粒子に変化はないと考えられる。

初期に  $G$  値  $1000$  で  $20$  分攪拌しその後  $G$  値を減じながら、各  $G$  値で  $20$  分づつ攪拌を繰返した場合と、 $G$  値  $1000$  で  $20$  分攪拌後  $G$  値を増加させ各々  $20$  分づつ攪拌した場合の例を図-9 に示す。 $G$  値を増加させた場合の方が段階的に減少させた場合よりも  $\eta_{sp}$  は急に減少する。これは基本粒子の破壊に基づくと考えられる。また  $\eta_{sp}$  の線は各  $G$  値に対する乱れのミクロスケールの勾配にほぼ等しくなる。

#### 4-5. フロックの単粒子沈降速度

図-7, 8 に示したサンプリングの実験と同時にフロックの沈降速度を測定した。各攪拌条件で急速攪拌 (しないものもある) 後  $1$  時間目,  $12$  時間目,  $24$  時間目,  $48$  時間目に測定を行なった。  $12$  時間目以降はほとんど同じであった。これらを図-10 以降に示す。フロック直径  $0.05\text{cm}$  での沈降速度から

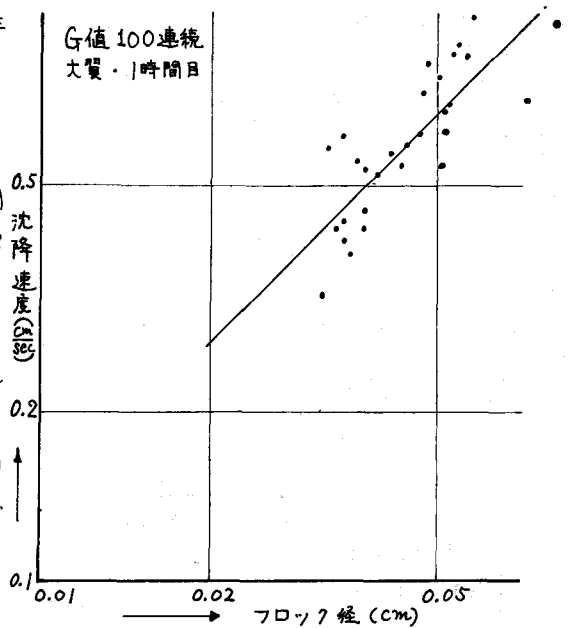


図-10 沈降速度とフロック径

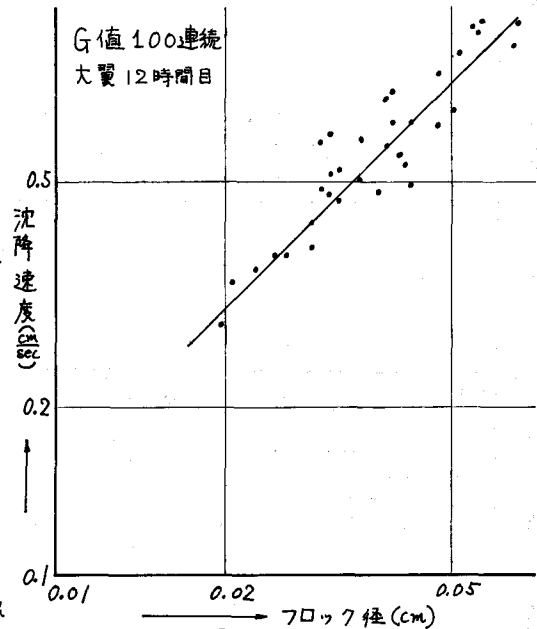
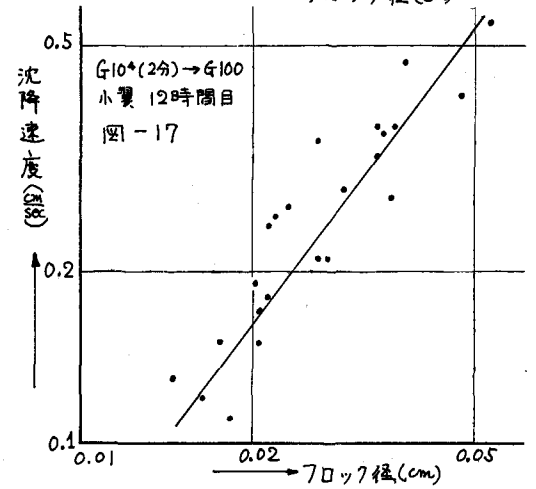
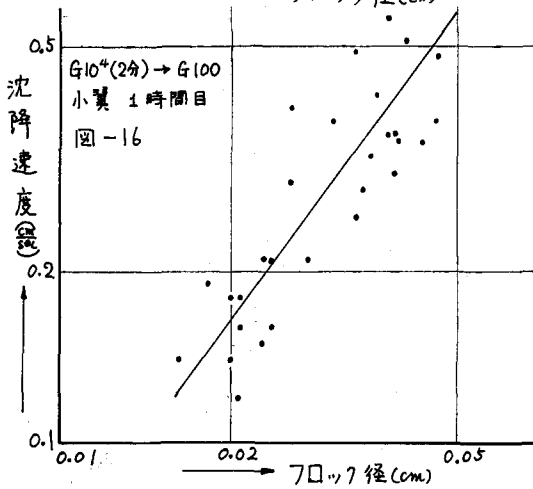
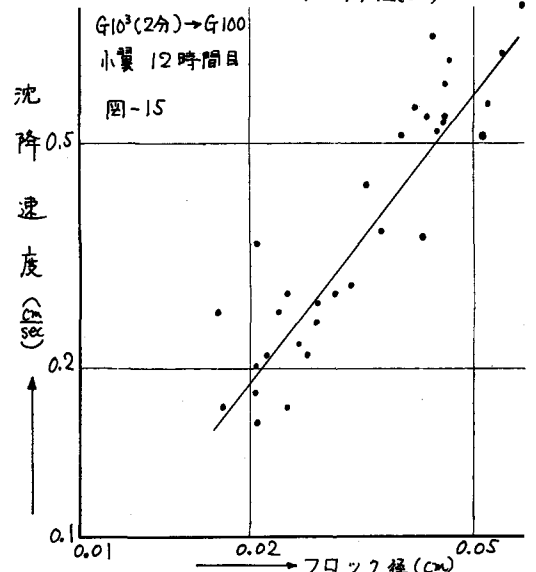
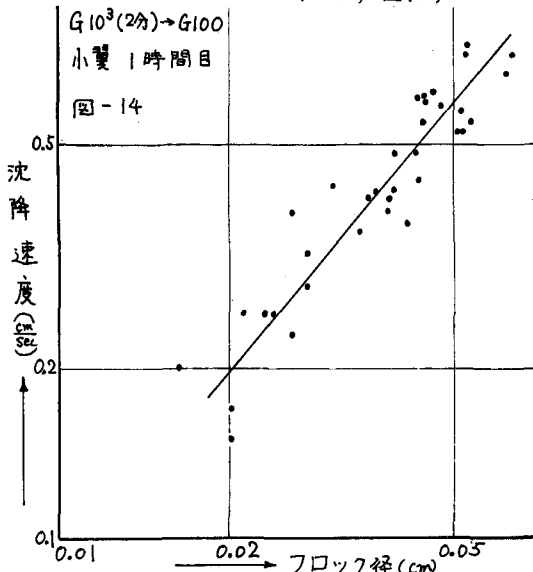
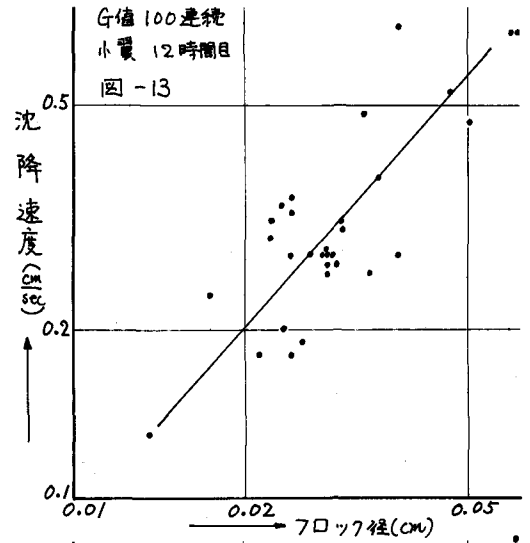
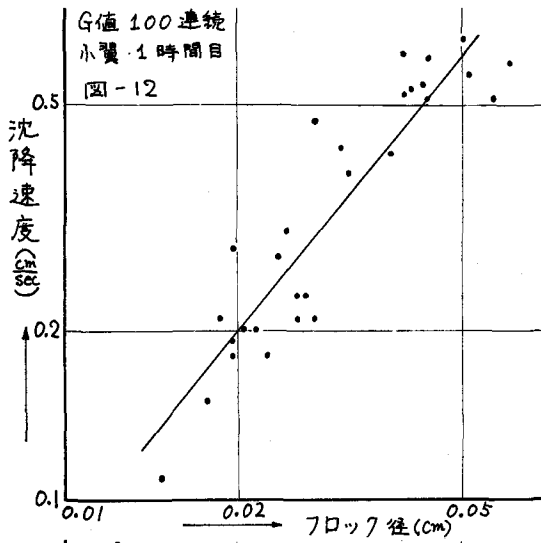


図-11 沈降速度とフロック径



明らかかなようにG値の最大値が大きい程沈降速度は小さい。図は省略しているが同じG値に対する急速攪拌時間は長い方が沈降速度は遅くなる。G値の最大値が小さいほど沈降速度とフロック径の勾配は小さくなる。この場合フロックの沈降速度を代表速度、フロック直径を代表長さとするレイノルズ数は1を越えることがありうるのでStokesの沈降式は厳密には使用できないが近似的に使用するならば勾配が2に近い程見かけ密度( $\rho_f - \rho_w$ )はconstに近づき径のweak functionになっていく。G値100連続で大翼の場合勾配が1に近い。このことはフロック径の増加とともに密度が減少していくこと、つまりフロックの空隙率が増加していくことを示している。それにひきかえ他の場合はこの場合に較べると見かけ密度の減少は少ないことを示している。またG値の最大値が小さいほど沈降速度が大きいいということはいかなるG値の最大値に対してもフロックの構造をsimilarと考えるとありえないことになる。つまり前述の基本粒子が異なるのではないかと考えられる。即ちG値の最大値が小さいほど基本粒子は大きく急速攪拌としてG値10000やG値1000を受けたフロックはG値100の緩速攪拌の際には基本粒子が数個フロッキュレートしてその時点でのフロックになっていると考えられる。このように考えるとフロックの内部構造がその時点以前にうけたG値の最大値によりかなり異なることになる、この構造の差が密度差以上の透水性を産みだし沈降速度が変化すると考えられる。

## 5. 結論

この実験は高分子凝集補助剤を用いた場合であり粘土スラリーのみだと履歴性はほとんど見られないので高分子物質による特異な現象とも考えられる。この結果からフロッキュレーションに際しては薬品注入方式を小さなG値で完全に混和できるようにし、緩速攪拌は大きな翼でフロックが沈降しないような極力小さなG値で攪拌しフロックは長時間滞留させない方がよい。つまり処理システム中でフロックが受けるG値の最大値も極力小さくする方がよい。フロックの成長を一般的に論ずるには、フロッキュレーターの乱流特性を明らかにし、フロック物性としては、G値の最大値と攪拌継続時間および透水性を考慮しなければならない。

今後はミクロな意味でのG値の空間的時間的分布とフロック形成について考察を進めたい。

以上の研究に際し御指導下さいました栗谷陽一教授と実験に協力して下さいた院生江副章之介、古賀憲一の両君に深甚なる謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 丹保憲仁, 渡辺義公: アルミニウムフロックの密度に関する研究, 水道協会雑誌, 397号, 72-10, 昭和42年10月
- 2) 丹保憲仁, 渡辺義公, 清水恵: アルミニウムフロックの密度に関する研究(Ⅱ), 同上, 410号, 714-17, 昭和43年11月
- 3) A. L. Lagvander, R. S. Gemmel: A size-density Relationship for flocs, J.A.W.W.A., Vol. 60, No. 9, 71040-1046, 1966. 9
- 4) 楠田哲也: フロックの透水性と衝突効率に及ぼす影響, 水道協会雑誌(投稿中)
- 5) 渡辺義公, 丹保憲仁: アルミニウムフロックの密度に関する研究(Ⅲ), 同上, 445号, 72-7, 昭和46年10月
- 6) T. R. Camp, P. C. Stein: Velocity Gradients and Internal Work in Fluid Motion, J. Boston, S. C. E., Vol. 30, P. 249-257, 1943. 10
- 7) T. R. Camp: Flocculation and Flocculation basin, Proc. A. S. C. E., Vol. 79, No. 283, 7283-1-18, 1933. 9
- 8) V. G. Levich: Physico chemical hydrodynamics, Prentice-Hall, 1962
- 9) M. V. Smoluchowski: Versuch einer mathematischen Theorie der Koagulationskinetik kolloider Lösungen. Zeitschrift für Physikalische Chemie. Vol. 7, 117-167, 1918
- 10) 丹保憲仁: フロック形成過程の基礎的研究(Ⅰ), 水道協会雑誌, 372号, 710-17, 昭和40年7月
- 11) " : 同上 (Ⅱ), 同上, 381号, 714-22, 昭和41年6月
- 12) " : 同上 (Ⅲ), 同上, 382号, 719-21, 昭和41年7月
- 13) 丹保憲仁, 山田浩一, 穂積準: フロック密度に関する研究, 同上, 423号, 714-15, 昭和45年4月
- 14) 丹保憲仁, 穂積準, 渡辺義公: フロッキュレーターの合理的設計(Ⅰ), 同上, 431号, 720-27, 昭和45年8月
- 15) 丹保憲仁, 渡辺義公: 同上(Ⅱ), 同上, 441号, 72-14, 昭和46年6月
- 16) " : 同上(Ⅲ), 同上, 447号, 72-21, 昭和47年2月
- 17) " : 同上(Ⅳ), 同上, 454号, 72-37, 昭和47年7月
- 18) 栗谷陽一, 楠田哲也, 江副章之介: 平衡状態におけるフロック粒子分布について, 第24回日本水学会年度総会講演要録 7.347-350, 昭和47年
- 19) A. S. Michaels, J. C. Bolger: The Plastic Flow Behavior of Flocculated Kaolin Suspensions, Industrial & Engng. Chem. Vol. 61, No. 2, 1917, 1962. 8