



# HOKKAIDO UNIVERSITY

|                     |                                                                                   |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Title               | 水処理におけるフロック形成過程の理論化に関する研究                                                         |
| Author(s)           | 渡辺, 義公                                                                            |
| Degree Grantor      | 北海道大学                                                                             |
| Degree Name         | 博士(工学)                                                                            |
| Dissertation Number | 甲第812号                                                                            |
| Issue Date          | 1972-03-25                                                                        |
| Doc URL             | <a href="https://hdl.handle.net/2115/32619">https://hdl.handle.net/2115/32619</a> |
| Type                | doctoral thesis                                                                   |
| File Information    | 0812.pdf                                                                          |



水処理におけるフロック形成過程の  
理論化に関する研究

1971. 12

渡 辺 義 公

# 目 次

|       |                          |       |    |
|-------|--------------------------|-------|----|
| 第1章   | 序論                       | ----- | 1  |
| 1-1   | はじめに                     | ----- | 1  |
| 1-2   | 本論文の内容                   | ----- | 6  |
|       | 参考文献                     | ----- | 8  |
| 第2章   | フロック物性                   | ----- | 9  |
| 2-1   | はじめに                     | ----- | 9  |
| 2-2   | フロック密度に関する実験的研究          | ----- | 10 |
| 2-2-1 | フロック密度測定法の概要             | ----- | 10 |
| 2-2-2 | フロック密度測定装置               | ----- | 11 |
| 2-2-3 | フロック密度の測定手順              | ----- | 12 |
| 2-2-4 | 測定値よりのフロック密度の算定          | ----- | 13 |
| 2-2-5 | 実験結果                     | ----- | 16 |
| 2-2-6 | フロック密度関数                 | ----- | 17 |
| 2-2-7 | 実験結果の総括と考察               | ----- | 19 |
| 2-3   | シミュレーションによるフロック構造<br>の検討 | ----- | 23 |
| 2-3-1 | フロック構造の基礎式               | ----- | 23 |
| 2-3-2 | シミュレーションモデル              | ----- | 25 |
| 2-3-3 | 計算結果                     | ----- | 28 |
| 2-4   | 生物フロックの密度                | ----- | 29 |
| 2-5   | フロック強度                   | ----- | 30 |
| 2-5-1 | フロックの最大成長径を求める式          | ----- | 30 |
| 2-5-2 | 計算式の実験的検討                | ----- | 33 |
| 2-6   | まとめ                      | ----- | 34 |
|       | 参考文献                     | ----- | 83 |

|       |                                            |     |
|-------|--------------------------------------------|-----|
| 第3章   | フロック形成の基礎理論                                | 84  |
| 3-1   | はじめに                                       | 84  |
| 3-2   | 乱流下での衝突速度関数                                | 85  |
| 3-3   | フロックの密度変化を考慮しない場合の<br>フロック形成基本式            | 87  |
| 3-3-1 | 過大成長フロックの破壊を考えない場合                         | 88  |
| 3-3-2 | 過大成長フロックの破壊を考えた場合                          | 90  |
| 3-4   | フロックの密度変化を考慮した場合の<br>フロック形成基本式             | 91  |
| 3-4-1 | フロック形成基本式へのフロック密度<br>関数の導入                 | 91  |
| 3-4-2 | 基本式の適用範囲                                   | 94  |
| 3-5   | 基本式中の特性値 $m, K_p, S, S_m$                  | 94  |
| 3-5-1 | 無次元攪拌継続時間 $m$                              | 95  |
| 3-5-2 | フロック密度関数の指数 $K_p$                          | 96  |
| 3-5-3 | 最大成長フロックへの初期粒子集合数 $S$<br>とフロックの最大成長度 $S_m$ | 96  |
| 3-6   | 接触フロック形成                                   | 97  |
| 3-7   | まとめ                                        | 100 |
|       | 参考文献                                       | 107 |
| 第4章   | フロック形成理論の実験による展開                           | 108 |
| 4-1   | はじめに                                       | 108 |
| 4-2   | 実験用フロッキュレーターの特性                            | 108 |
| 4-2-1 | 実験用フロッキュレーターの構成                            | 108 |
| 4-2-2 | 有効エネルギー消費率 $\varepsilon$ の推定               | 109 |
| 4-3   | フロック粒度分布の測定と表示                             | 112 |
| 4-3-1 | 初期粒子の径 $d_0$ と個数 $N_0$ の測定                 | 112 |
| 4-3-2 | フロック粒度分布の測定                                | 113 |
| 4-3-3 | フロック粒度組成変化の追跡                              | 114 |

|       |                        |     |
|-------|------------------------|-----|
| 4-3-4 | 無次元化時間沈降累積量曲線( $m$ 曲線) | 116 |
| 4-3-5 | 標準化自平衡 $m$ 曲線          | 117 |
| 4-4   | 自平衡分布とフロック形成速度の関係      | 119 |
| 4-4-1 | フロック粒度組成の推移            | 119 |
| 4-4-2 | 自平衡分布に至るに要するフロック形成時間   | 120 |
| 4-5   | まとめ                    | 123 |
|       | 参考文献                   | 151 |

## 第5章

|       |                                   |     |
|-------|-----------------------------------|-----|
|       | フロック形成過程のシミュレーション<br>(数値実験)       | 152 |
| 5-1   | はじめに                              | 152 |
| 5-2   | フロック形成基本式の数値解法                    | 153 |
| 5-3   | 衝突合-確率関数を導入したフロック形成<br>基本式        | 153 |
| 5-3-1 | 衝突合-確率導入の必要性                      | 153 |
| 5-3-2 | 衝突合-確率の考へ方                        | 156 |
| 5-3-3 | 衝突合-確率の定式化                        | 157 |
| 5-4   | 衝突合-確率関数を導入したフロック形成<br>基本式による数値実験 | 160 |
| 5-4-1 | 衝突合-確率関数の指数 $n$ の決定方法             | 160 |
| 5-4-2 | 数値実験(シミュレーション)の結果                 | 161 |
| 5-5   | 成長平衡時における標準化された<br>フロック粒度分布       | 162 |
| 5-5-1 | 凝集条件の等しい成長平衡分布の標準化                | 162 |
| 5-5-2 | 凝集条件の異なる成長平衡分布の標準化                | 163 |
| 5-6   | フロック群の成長過程分布の標準化                  | 164 |
| 5-6-1 | 標準化の手順                            | 164 |
| 5-6-2 | 標準化粒度分布に達するに要するフロック形成時間           | 166 |

|           |                                     |     |
|-----------|-------------------------------------|-----|
| 5 - 7     | 汎用標準化無次元時間沈降累積量曲線<br>(汎用標準化M曲線)     | 167 |
| 5 - 7 - 1 | 作成手順                                | 167 |
| 5 - 7 - 2 | 衝突合 - 確率関数の係数 $\alpha$ の推定と<br>その特性 | 168 |
| 5 - 8     | まとめ                                 | 171 |
|           | 参考文献                                | 207 |

## 第6章 連続流フロッキュレーターでのフロック形成

|           |                                       |     |
|-----------|---------------------------------------|-----|
| 6 - 1     | はじめに                                  | 208 |
| 6 - 2     | 連続流フロッキュレーター内の流況の把握<br>(滞留時間分布と混合特性)  | 208 |
| 6 - 2 - 1 | 実験用連続流フロッキュレーター                       | 208 |
| 6 - 2 - 2 | 実験方法と混合特性の表示法                         | 208 |
| 6 - 2 - 3 | 実験結果の解析                               | 210 |
| 6 - 3     | 実フロッキュレーター内でのフロック形成                   | 212 |
| 6 - 4     | 連続流フロッキュレーターでの微小粒子群<br>の消滅速度          | 214 |
| 6 - 4 - 1 | 消滅速度の一般式                              | 214 |
| 6 - 4 - 2 | 微小粒子のフロック化過程でのフロック<br>体積率と衝突合 - 確率    | 216 |
| 6 - 4 - 3 | 接触フロック形成におけるフロック<br>体積率と衝突合 - 確率      | 218 |
| 6 - 5     | 連続流フロッキュレーター内でのフロック<br>粒度分布の遷移        | 220 |
| 6 - 5 - 1 | 実験方法                                  | 220 |
| 6 - 5 - 2 | 連続流フロッキュレーター内でのフロック<br>粒度分布           | 220 |
| 6 - 6     | 連続流フロッキュレーター内での微小粒子群<br>の消滅速度の実測による検証 | 221 |
| 6 - 7     | まとめ                                   | 224 |
|           | 参考文献                                  | 241 |

|       |                           |       |     |
|-------|---------------------------|-------|-----|
| 第7章   | 総括                        | ----- | 242 |
| 7-1   | 結果の要約                     | ----- | 242 |
| 7-2   | フローチャートの合理的設計手順と<br>その設計例 | ----- | 254 |
| 7-2-1 | 設計手順                      | ----- | 254 |
| 7-2-2 | 計算例                       | ----- | 257 |
|       | 参考文献                      | ----- | 275 |
|       | 後記                        | ----- | 276 |

1 - 1 はじめに

物理化学的水処理法の1つである急速ろ過システムは次の4つの単位操作に大別される。(1)凝集, (2)フロック形成, (3)沈殿, (4)砂ろ過。沈殿と砂ろ過についてはその操作上並に機構上の特性を容易に理解することができず。しかし、凝集とフロック形成は共にけん濁微小粒子を大形化し、後続の沈殿と砂ろ過による固液分離を行なうための前処理となる操作であり、共に攪拌による現象が造行して行くのでその機構を切り離して考えることがむずかしく、従来はこの両者が混同して用いられて来た。この様な理由によつて、*coagulation* と *flocculation* と云う言葉が凝集とフロック形成を総括した意味に用いられ、明確に定義されないまま使用されて来た。操作上の特長としては凝集は薬品の混和を第一に考えた短時間（通常は5分以下）に比較的強い攪拌を行なう急速攪拌（混和）の段階に相当し、フロック形成は長時間（通常20~40分）にわたって比較的弱い攪拌を行なう緩速攪拌の段階に相当する。しかし以下に述べるようにこの両者は明確に区別すべき現象である。

水中に浮遊している粘土等のけん濁微小粒子は、表面が負に帯電しているのので粒子同志が互いに反撥し合つてけん濁状態を維持するいわゆる安定状態にある。安定状態にある系に  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$  等の多価金属イオンが添加されると、それらは加水分解・重合した状態でけん濁粒子表面に吸着される。これらの高分子化した多価金属イオンは粒子表面の負の電荷を中和し、粒子を安定に存在せしめるとした粒子相互の反撥力を低下させ、ついに粒子の会合を可能にする作用をなす。この様に、安定状態にあるけん濁系が不安定化するのを粒子が集塊となるに至る過程が凝集 (*coagulation*) 反応であり、主としてエネルギー平衡の観点から問題を論ずる必要がある。凝集反応を進行させるために添加される薬品が凝集剤 (*coagulant*) である。この凝集反応は10秒前後と云った短時間に瞬間的に完了する。

着目しているけん濁粒子が粘土等の負に帯電している粒子であり、系の不安定化を促進するために添加された凝集剤が正の電荷を持つ多価金属電解質の場合には、相互凝集 (*mutual coagulation*) と呼ばれるクーロン力によつて凝集剤が吸着される。凝集は非可逆的の反応であり、クーロン力もしくは物理化学的吸着力によつて持たせられる凝集剤とけん濁粒子間の結合力は非常に強い。

一方、フロック形成 (floculation) は凝集反応によるもので、粒子群一表面の反力による主として、フロック形成は可逆的であり、凝集剤の添加により、水中の引き合いが弱くなり、フロックは壊れていく。フロックは、水中の引き合いが強いと、フロックは壊れていく。フロックは、水中の引き合いが強いと、フロックは壊れていく。

上述の議論によれば、凝集は界面化学的現象であり、フロック形成は流体力学的視点から見た現象である。凝集操作の長短は、凝集剤の量やフロック形成の進行が左右される。この意味で、凝集はフロック形成の制御操作とも云えよう。凝集に関する完全な説明は、その詳細にわたるが、その詳細は本論文の範囲を越えるので省略する。次に、本研究の目的であるフロック形成に関する過去の研究の筋を述べることとしたい。

1917年に von Smoluchowski<sup>2)</sup> はコロイド粒子群の衝突機構を、静止流体中でのブラウン運動による衝突と流体が層流状態で運動している場合の速度勾配による衝突の二つに分けて論じ、前者については式(1-1) 後者については式(1-2) でそれぞれの場合の単位時間での単位体積中の衝突回数を与えた。衝突したものがあつて合するとすれば、衝突速度式は直ちに合一速度式として用いることができる。

$$N_{ij} = 4\pi D_{ij} R_{ij} n_i n_j \quad \text{----- (1-1)}$$

$$N_{ij} = \frac{4}{3} \frac{du}{dz} (r_i + r_j)^3 n_i n_j$$

----- (1-2)

ここで、 $D_{ij}$  :  $i, j$  の粒子の相互拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )  
 $n_i \cdot n_j$  :  $i, j$  粒子の単位体積中の個数 ( $1/\text{cm}^3$ )、 $R_{ij}$  :  
 $i, j$  粒子の衝突半径 ( $\text{cm}$ )、それぞれ半径  $r_i, r_j$  の和に  
等しい、 $du/dz$  : 層流中の速度勾配 ( $1/\text{sec}$ )

その後、特にコロイド科学の方面で多くの研究者によって Smoluckowski の基礎式についての検討が行なわれてきた。

衝突がすべて合一に有効であると仮定するいわゆる rapid coagulation とは別に、Smoluckowski は衝突の内のある割合のみが合一できると云ったいわゆる slow coagulation についての合一速度についても論じている（第5章参照）。その後 Fuchs は粒子表面に残存する反撥エネルギーを安定因子 (stability factor)  $W$  なる項で表現し、 $W$  を添加された凝集剤濃度の関数として与えて Smoluckowski の rapid coagulation に対する補正を行なった。<sup>3)</sup> また、Swift・Friedlander<sup>4)</sup>、Stumm・Hahn<sup>5)</sup> とも Smoluckowski の rapid coagulation の理論値と実測したフロック形成速度とを比較して、衝突合一確率の導入の必要性について言及している。しかし、この点について信頼に足る結論は得られていない。

その他、一定時間沈殿させた後の上澄水中に残留している微小粒子を光学濁度として測定したり、あるいはコールターカウンタによって粒子の大きさをパルスに変換して粒度分布を測定したりして、凝集・フロック形成条件のフロック形成過程に与える影響について Burkner と Morgan<sup>6)</sup>、Argaman<sup>7)</sup>、Christman<sup>8)</sup> らが研究を行なっている。

1921 年に Langelier は凝集・フロック形成によって除濁を行なう試みを水処理に應用し、攪拌が凝集・フロック形成に影響を与えることも指摘して、攪拌が定量的には何らの取扱ひも行なっていない。

1943 年 Camp と Stein は流体中の層流の速度勾配  $G$  と攪拌によって流体に与えられるエネルギー量  $\varepsilon$  とを式 (1-3) の関係で与えた。<sup>9)</sup>

$$G = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \text{ ----- (1-3)}$$

ここで、 $\varepsilon$  : 単位時間に単位体積の流体中で矢示されるエネルギー量 ( $\text{erg/cm}^3 \cdot \text{sec}$ )、 $\mu$  : 流体の粘性係数 (poise)。

したがって、層流中の速度勾配を推進力として起る衝突回数  $N$  は、

$$N_{\text{grad.}} = \frac{4}{3} G R_{ij} n_i n_j \text{ ----- (1-4)}$$

式(1-3)で定義される  $G$  値が現在までフロック形成操作の指標として広く用いられてきた。フロック形成に適當な  $G$  の範囲として、米国各地における実験値から  $20 \sim 70 \text{ 1/sec}$  の値を Camp は提唱した<sup>10)</sup>。さらに、 $G$  にフロック形成時間  $T$  を乗じた無次元の  $GT$  値を提示し、 $GT$  として  $23000 \sim 210000$  の範囲が適當であろうと述べている。

また、Camp は水路式フロッキュレーターと機械攪拌式フロッキュレーターにおける仕事量  $W$  (流体中で失われるエネルギー量を等しい) を全損失水頭と攪拌翼の抗力から求めるための次式を提示した<sup>11)</sup>。

水路式フロッキュレーターに対して

$$W = \frac{\gamma h_f}{T} \text{ ----- (1-5)}$$

機械攪拌式フロッキュレーターに対して

$$W = \frac{C_D \rho_w A \{2\pi r (1-K) n^*\}^3}{V} \text{ ----- (1-6)}$$

ここで、 $\gamma$ : 水の比重量 ( $\text{g/cm}^3$ )、損失水頭 ( $\text{cm}$ )、 $T$ : 平均滞留時間 ( $\text{Sec}$ )、 $\rho_w$ : 水の密度 ( $\text{g/cm}^3$ )、 $A$ : 攪拌翼面積 ( $\text{cm}^2$ )、 $r$ : 攪拌翼半径 ( $\text{cm}$ )、 $K$ : 翼周速度と翼先端の流体の接線速度の比、 $n^*$ : 翼の回転数 ( $\text{r.p.m.}$ )、 $V$ : 攪拌槽中の水の体積 ( $\text{cm}^3$ )。

最近になって、丹保によって Camp の理論に対する検討がなされ次のような欠点が指摘された。すなわち、Camp の理論は水流条件がラミナーであるとして導き出されたものであるが、Camp 自身が式(1-4)を乱流下においても使用しようであろうと何等の検討も行なわずに示唆し、一般の水処理のテストでこれを無批判に受け入れたために  $G$  値説の理論的正確さは失われてきた。 $G$  値の定量的適用は相対的攪拌強度としてのみに限定されるべきである。<sup>12)</sup>

また、Camp の理論はスカラー量によって粒子間の衝突回数を一義的に示そうとした所に大きな矛盾を含んでいゝる。すなわち、乱流中には種々の大きさを持った渦が混在し、それらの渦によって粒子群の衝突が起こりしかも衝突する粒子の大きさによって衝突現象に關与する渦の大きさも異なることを考えるべきである。したがって、乱流下で操作されてゐる一般のフロッキュレーター内でのフロックの衝突

突現象を考える場合には、渦のスケール、その変動速度と云った微流体力学的 (microhydrodynamic) 特性を考慮しなければならない。

以上の様な欠点を持つにしても、実設計の目安となる  $G$  値、 $GT$  値を提唱し突装置での両指標の数値を明らかにした Camp の業績は高く評価されるべきであろう。

1954年に、U.S.S.RのV.G. Levichは微流体力学的検討を行なつて乱流下における衝突関数を誘導した。Levichはコロイド粒子間の衝突半径は乱れのマイクロスケールに比して小さく、粒子は乱れの渦の中に入り完全に含まれ、粒子の運動を流体そのものの運動によつて表わし得るものと仮定した。次に、着目してゐる現象をSmoluchowskiがブラウン運動による衝突速度式(1-1)を導いたと同様に拡散現象に置き換えて考えた。さらに、局所等方性乱流理論に基づく粘性領域内のマイクロな拡散が現象を支配するとして理論を展開し式(1-7)を誘導した。

$$N_{turb} = 12\pi\beta \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} d^3 n^2 \dots\dots\dots (1-7)$$

ここで、 $N_{turb}$ : 単位時間に単位体積の流体中で生ずる衝突数 ( $cm^{-3} \cdot sec^{-1}$ )、 $\epsilon_0$ : 単位時間に単位体積の流体中で失なわれる粒子の衝突現象に有効なエネルギー消費量、有効エネルギー消費率と称する ( $erg/cm^3 \cdot sec$ )、 $d$ : 粒子の直径 ( $cm$ )、 $\mu$ : 流体の粘性係数 ( $poise$ )、 $\beta$ : 定数。

Campによる式(1-4)とLevichの式(1-7)は定性的には全く同一の形であるが、衝突に関与する乱れの渦のスケール、渦による拡散等の微流体力学的特性を考慮した点において、後者の理論的健全さは前者に比べてはるかに優つてゐる。

その他、SuffmanとTurnerは大気中のエアロゾルの衝突速度式を式(1-8)のようにならべてゐる。<sup>(15)</sup>

$$N_{turb} = n_i n_j (r_i + r_j)^3 \left( \frac{8\pi^2 \epsilon}{15\mu} \right)^{\frac{1}{2}} \\ \div 1.30 \left( \frac{\epsilon}{\mu} \right)^{\frac{1}{2}} (r_i + r_j)^3 n_i n_j \dots\dots\dots (1-8)$$

また、Angamaniも独自に衝突速度式を誘導してゐる。<sup>(16)</sup>

以上の述べた式を単にうに、既往の性的行動の形成に關するもの  
研究に使用し、衝突速度を定量的に表現する研究の適用を除外する  
の物性、その粒子の組成、その性質、その形成の過程、その形成の  
出ることには困難である。

1-2 本論文の内容

[illegible]

7

## 参考文献 (第1章)

- 1) 丹保颯仁, フロツ形成過程の基礎的研究 (I), 水道協会雜誌, 372号, 昭.40.9, p.10~19
- 2) Smoluchowski, M.V., Versuch einer mathematischen Theorie der Koagulationskinetik kolloider Lösungen, Zeitschrift f. physik. chemie. XCII
- 3) Kuyt, H.R., Colloid Science I, Elsevier Publication Co. 1952
- 4) Swift, D. and Friedlander, S.K., The Coagulation of Hydro-sols by Brownian Motion and Laminar Shear Flow, J. Colloid Science, Vol.19, 1964, p.621
- 5) Hahn, H.H. and Stumm, W., Kinetics of Coagulation with Hydrolyzed Al(III), J. Colloid and Interface Science, Vol.28, 1968, p.134 - 144
- 6) Birkner, F.B. and Morgan, J.J., Polymer Flocculation Kinetics of Dilute Colloidal Suspension, J.A.W.W.A., Feb., 1968, p.175 - 191
- 7) Argaman, Y., Turbulence in Orthokinetic Flocculation, Univ. of Calif., Berkeley, ph.D. Thesis, 1968, Engrg., Sanitary and Municipal
- 8) Ham, P.K. and Christman, R.F., Agglomerate Size Changes in Coagulation, J. Sanitary Eng. Div. Proc. A.S.C.E., June, 1969, p.481 - 501
- 9) Camp, T.R. and Stein, P.C., Velocity Gradients and Internal Work in Fluid Motion, Jour. of Boston Society of Civil Engineering, Vol.30, Oct., 1943
- 10) Camp, T.R., Flocculation and Flocculation Basins, Proc. of A.S.C.E., Vol.79, No.283, Sep., 1953
- 11) 参考文献 10) と同じ
- 12) 参考文献 10) と同じ
- 13) 参考文献 1) と同じ
- 14) Levich, V.G., Physicochemical Hydrodynamics, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1962, p.213 - 219
- 15) Suffman, P.G. and Turner, J.S., On the Collision of Drops in Turbulent Clouds, J. Fluid Mechanics, Nov., 1955, p.16 - 30
- 16) 参考文献 7) と同じ

## 第2章 フロック物性

### 2-1 はじめに

フロック形成過程を明らかにする目的は、大規模な攪拌槽や反応槽などにおいて、フロックの生成・成長・凝集・分離の過程を理解し、その制御を行うことにある。フロックの物性は、その大きさ、形状、密度、凝集性、沈降性、流動性などによって大きく異なる。したがって、フロックの物性を理解することは、その制御を行う上で不可欠である。

フロックの形成過程は、一般的に以下の3つの段階に分けられる。1) 凝集、2) 成長、3) 分離。凝集は、コロイド粒子が互に接近し、凝集核を形成する過程である。成長は、凝集核がさらに粒子を捕獲し、大きくなる過程である。分離は、成長したフロックが重力や遠心力などの作用によって分離する過程である。

フロックの物性は、その形成過程と密接に関連している。例えば、凝集核の形成は、粒子の凝集性や凝集速度に大きく影響する。また、成長過程では、フロックの形状や密度が変化し、その結果として沈降速度や流動性が変化する。したがって、フロックの物性を理解することは、その形成過程を理解する上で不可欠である。

フロックの物性を評価するための指標として、凝集核の形成速度、成長速度、分離速度などが用いられる。これらの指標は、実験的に測定することが可能であり、その結果からフロックの形成過程を解析することができる。

また、フロックの物性を評価するための指標として、凝集核の形成速度、成長速度、分離速度などが用いられる。これらの指標は、実験的に測定することが可能であり、その結果からフロックの形成過程を解析することができる。

今、フロックの含水率を  $e$ 、フロックの構成物質の密度を  $\rho_s$  ( $\text{g/cm}^3$ )、水とフロックの混合密度を  $\rho_w$  ( $\text{g/cm}^3$ ) とすると、フロックの密度  $\rho_f$  と含水率  $e$  の間には次式が成立する。

$$\rho_s(1-e) + \rho_w e = \rho_f \quad \text{----- (2-1)}$$

フロックの含水率  $e$  と密度  $\rho_f$  のいづれかが分かれば式(

2-1) にまつて片方の未知の値を知ることができ。例  
えば、 $\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$  (水中にけん濁している微小粒子の  
代表として考えられる粘土粒子の場合)、 $\rho_w = 1.00$  とす  
ると種々の $e$ の値に対する $\rho_f$ の大概の値は表(2-1)のま  
うである。

今迄云われていた値として、 $\rho_f$ が1.03程度<sup>1)</sup>とか含水率  
 $e$ が96~98%とかの漠然とした範囲に止っており、しか  
も個々のフロックについて測定を行なったものではなかつた。  
めに汚泥脱水の目安程度の役割しか果たしてはいなかつた。  
しかしながら、固液分離を直接の目的とする沈殿・ろ過  
工程の理論的取扱いのためにも、あるいは除去の対象とな  
るフロックを生成させるフロック形成過程の理論化を行な  
うためにも、フロック密度の定量化は必須の条件である。  
そこで、本章においましてはフロック密度の測定方法を考案  
しフロック密度を実測してその定量化を行なってみたい。  
さらに、電子計算機を用いたシミュレーションによってモ  
デル的にフロックを形成させ、そのモデルフロックの構造  
を検討して実験値の妥当性の証明を行なってみるこ  
ととする。

次に、フロック形成においともう一つの主要因子である、  
与フロック形成条件下におけるフロックの成長径を支配す  
るフロック強度について若干言及してみたい。

## 2-2 フロック密度に関する実験的研究

### 2-2-1 測定法の概要

フロックは加水分解し重粒子と結合したアルミニウム等の多価金属の架状構造を有する。ろ過  
属イオンと水中の空隙に多量の水を包含した個々の物質に直接触れ、この形状等を変え  
らみ合い、その空隙に多量の水を包含した個々の物質に直接触れ、この形状等を変え  
い粒子で浮遊するようにしなけり。また、ろ過  
は水中に浮遊するようにしなけり。また、ろ過  
く行い、ろ過  
フロックは沈降中に衝突を繰り返して存在  
るいゆ凝集した存在  
の物性粒子として存在  
独立した粒子として存在  
ればならぬ。

これら条件を満足するために、測定法を  
で求め、適当な沈降速度を測定式を用  
る方法にまつて行なう。

単粒子沈降条件を得るために、図(2-1)のような装置を用いフロック形成を終えた粒子群の内若干個をフロック形槽の底部から測定管に沈降分別した。

## 2-2-2 測定装置

測定装置は(1)フロック形成部、(2)静水沈降管、および(3)フロック撮影装置の3つから成り立っている。

### (1) フロック形成部

装置の大略は図(2-1)に示す通りである。攪拌槽はステンレススチール製で、4側面中の2側面はアクリルライト板ででき、おもり内部の観察が容易なようになっている。内径は縦横共に15cmで深さ20cm、槽容量は約4.5ℓであるが、実験中は槽内水量を3ℓとした。

攪拌機は北大衛生工学型ツヤースターの一部を使用した。この攪拌機は2ヶ所のギア操作によって、毎分10, 20, 30, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 200回転を長時間にわたって正確に維持できるようにになっている。攪拌羽根はホジリ角の調整が可能である。

### (2) 静水沈降管

フロック形成槽の底部に直径3cmの穴をあけ、袋ナット状の金具で内径3cm、長さ50cmのカラス管を取付けた。槽とカラス管を分離するため5cm×5cmの正方形の鉄製のフタに穴を覆い、フロックを落とし止もうとする時のみ長さ20cm程度の金屈棒でフタをずらし数個のフロックがカラス管内に入るとフタを閉め、静水中で単粒子沈降状態を維持できるように工夫した。

カラス管内には温度計を付し測定中の温度と同時に記録した。なお、槽底に空いている直径3cmの穴に中をくり抜いた内径5mmのカラス管を挿入したゴム栓を入れ、静水沈降管内に流入するフロックの数を少なくして測定が容易になるようにした。

### (3) フロック撮影装置

密度を測定しようとするフロックの寸法と形状および沈降速度の測定は、写真(2-1)のようベローズを付して超接写撮影を可能にした35mm一眼レフ式カメラアサヒペンタックス(55mmレンズ)によって行なった。カメラを予めカラス管から所定の距離に立てたエレベーター三脚上に固定し、ファインダー中央に測定粒子を捕え

写真撮影を行なつて寸法を求め、資料を得ると共に、エシベーター部分を動かして沈降粒子をフアイニグー中央に捕えたり、一定距離だけ追跡する。その間に要した時間をストップウォッチで計測し沈降速度を求める。

### 2-2-3 測定手順

測定の手順は次の通りである。

手順(1) フロック形成槽と静水沈降管内に原水を適量入れ、槽底部のフタを閉じる。この原水は少し暖めたり放置したりして室温との差を $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 程度以内になるように調整しておいたものを用いる。これは、原水はほぼ一定の水溫（地下水では $10^{\circ}\text{C}$ 前後）を示したが、室温が $7^{\circ}\text{C} \sim 23^{\circ}\text{C}$ の範囲で变化するため、水溫と室温の溫度差による静水沈降管内の対流や、管内で水溫が上昇すると溶存空気がカラス管壁面に付着したりすることによって、測定が不正確になることを防ぐためである。

手順(2) 濁質としてカオリンけん濁液を所定量注入する。フロック形成槽内の全量を、原水・カオリンけん濁液・PH調整剤としての $0.1\text{N NaOH}$ 溶液・凝集剤・フロック形成補助剤を加えてそれとなるように調整する。

手順(3)  $0.1\text{N NaOH}$  溶液で凝集剤を添加して急速攪拌を終了した時のPHが所定の値となるようにPH調整を行なう。次に、凝集剤（硫酸アルミニウムまたはポリ塩化アルミニウム）を所定量だけ注入し、急速攪拌を行なつて凝集反応を生じさせる。フロック形成補助剤を用いる場合は最後に注入した。

手順(4) フロック形成のための攪拌は $100\text{ r.p.m}$ の急速攪拌を5分間、続いて所定の緩速攪拌を20分間継続した。急速攪拌を終了し緩速攪拌に移る時に槽内液を採取しPHを測定した。

手順(5) 緩速攪拌を20分間継続した後でフロック形成攪拌槽底部のフタを静に開きフロックを静水沈降管の中に入れておき、数個のフロックが入ると直ちにフタを閉じる。1回のフロック形成による測定継続時間は10分程度とし、その間は緩速攪拌を継続しておき、落とし込みを数回繰返し1回のフロック形成で10個程度の測定値を得る。

手順(6) フロックの沈降速度と粒径の測定は上述のよう  
 にして静水沈降管内に落下し込ませたフロックに対して次の  
 ようにして行なう。  
 先ず、接写用ベローズを付したカメラを静水沈降管から  
 約20 cm の位置に立て、エレベーターのフロアの中心に  
 一部分を5 cm 伸ばし、フロアの中心に補正を正確にフロックに  
 アインダーの中心の中心に補正を正確にフロックに  
 ックを正確に小円の中に補正を正確にフロックに  
 動させ、かつベローズも伸縮させ、正確にフロックに  
 を合わせ、同時にストッパをオッチを押し、  
 そしてフロックを正確に小円の中心に捕え、  
 ターを下げて追跡する。あらかじめ5 cm 伸ばし、  
 エレベーター部分が元の位置に戻った時に（それ以前に  
 下がらない）ストッパをオッチを止めて、  
 込む。この際、エレベーター部分が先行させ、  
 の中心をフロックよりわずかに先行させる。  
 正確に5 cm 沈降する時間を計測する。このとき、  
 5 cm 沈降する間の適当な時に、  
 シャッターを切り、ストロボを同調させ、測定中のフロック  
 を撮影し、寸法・形状の資料を得る。シャッターを切った  
 時のベローズの長さはそのまゝにし、おいて追跡終了後、  
 の長さを読み取り、図(2-2)のようき、  
 ある図を用いて撮影倍率を決定する。  
 このようにして測定された結果は表(2-2)と表(2-3)  
 のように記表される。

## 2-2-4 測定結果よりの密度の算定

### (1) 沈降速度式の選定

前述のようにしてフロックの寸法と沈降速度が求められ  
 ると、適当な単一粒子の沈降速度公式に得られた値を代入  
 してフロック密度を逆算することができ、  
 単一粒子の終末沈降速度を与える一般式は次のようであ  
 る。

$$w = \left[ \frac{4}{3} \frac{g}{C_D} \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) d \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-2)$$

ここで、 $w$ : 単粒子の終末沈降速度 (cm/sec),  $g$ : 重力  
 の加速度 ( $980 \text{ cm/sec}^2$ ),  $C_D$ : 抵抗係数 (無次元),  $\rho_s$   
 $\cdot \rho_w$ : それぞれ粒子と水の密度 ( $\text{g/cm}^3$ ),  $d$ : 粒子の直径  
 (cm)。

式(2-2)中の抵抗係数 $C_D$ は図(2-3)のように、粒子直径を長さの元に採ったレイノルズ数によって変化する値である。そこで、我々の考える粒子はどのような抵抗係数を採るかを知るためにまずレイノルズ数を求めるみる。表(2-1), (2-2)の例から分かるように、粒子径を長さの元に採ったレイノルズ数 $Re = wd/\nu$ はほとんどすべての場合の実験について1以下であった。

この領域は沈降の際の粒子周辺の流れ(境界層)がラミナーであり、 $C_D$ はレイノルズ数に逆比例し $C_D = K/Re$  ( $K$ は定数)で表わされる。定数 $K$ は粒子の形状によって異なるが、球の場合には $K = 24$ となりこの値を式(2-2)に代入して得られたものが式(2-3)に示すようなストークスの式である。

$$w = \frac{g}{18} \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\mu} \right) d^2 \text{-----} (2-3)$$

しかしながら、フロック粒子はこのようなストークス領域で沈降はしても形状は球ではないので、フロックの形状が球から片寄っていることを加味したストークス領域での沈降速度式を用いて計算を行なうなければならない。

粒子の形状の球からの片寄りを示すために、形状係数(Sphericity)  $\psi$ を次のように定義する。

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{\text{対象とする粒子と同体積の球の直径}}{\text{対象とする粒子の直径}} \\ &= \frac{d_{avg}}{d_s} \left( \frac{1}{n} \right) \end{aligned}$$

ここで、 $d_{avg}$  : 対象とする粒子の平均径(測定径),  $d_s$  : 対象とする粒子と等しい体積を持つ等価球の直径,  $n$  : 比表面積の比。

$$\begin{aligned} n &= \frac{(\text{対象とする粒子の表面積}) / (\text{対象粒子の体積})}{(\text{等径の球の表面積}) / (\text{等径の球の体積})} \\ &= \left( \frac{\pi d_s^2 / \psi}{\pi d_s^3 / 6} \right) \left( \frac{\pi d_{avg}^3 / 6}{\pi d_{avg}^2} \right) = \frac{d_{avg}}{d_s \psi} \end{aligned}$$

沈降速度の計算に当っては径を示す値として常に $d_s$ を用いる。

表(2-4)は種々の形状の粒子の形状係数 $\psi$ から、等価球の直径 $d_s$ を測定径 $d_{avg}$ を用いて求めるための係数 $\psi$ である。

フロックの形状は不整なものでありフロックが成長するにつれて変化した同じ成長程度のフロックでも個々の粒子の形状は異なるので、1つの形状係数 $\psi$ でフロックの形状を代表的に表示することはできない。しかし、形状係数の大略値がどの範囲にあるかを推定するために図(2-4)と実験のフロック写真を参照してみると、フロック粒子の形状係数として0.7~0.9程度が考えられる。

そこで、本論では一応正八面体の形状係数である $\psi = 0.847$ を採用して計算を進めることとした。

次に、採用した形状係数を用いて式(2-2)にあって計算を行なうためにはこの様な粒子の形状係数を知らねばならない。種々の形状係数を持つ粒子の抵抗係数 $C_D$ を与えるものとしてWaddellにあって与えられた図(2-5)がある。この図からも明らかのように、通常のフロック粒子の沈降が考えられる $Re < 1$ のストークス領域では抵抗係数 $C_D$ は形状係数 $\psi$ が異なっても、 $C_D = K/Re$ と近似的に見なすことのできる直線群から成り立っている。

図(2-5)から $\psi = 0.847$ に対応する直線を直ちに見出すことは難しいので、まず $\psi = 0.125, 0.220, 0.660, 0.806, 1.000$ の各線について $K$ を求め図(2-6)の示すように横軸に $\psi$ 、縦軸に $K$ を取って1本の曲線とし、 $\psi = 0.847$ の $K$ を逆に求めたところ45であった。この結果、形状係数 $\psi$ が0.847の粒子のストークス領域における抵抗係数は、 $C_D = 45/Re$ であることが推定された。

$\psi = 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$ に対してそれぞれ $K = 60, 50, 40, 24$ となるので、これらも合わせ各々の $\psi$ に対する $C_D$ と $Re$ の関係を示すと図(2-7)のようである。図(2-7)から判断して、形状係数が $\psi = 0.7 \sim 0.9$ の範囲ではそれ程 $C_D$ と $Re$ の関係に差がないことが分かる。

式(2-2)に $C_D = K/Re$ を代入して、沈降速度を与える式を求めると次式のようになる。

$$\begin{aligned} W &= \frac{4}{3} \frac{g}{K} \frac{\rho_s - \rho_w}{\mu} d_s^2 \\ &= \frac{g}{K'} \frac{\rho_s - \rho_w}{\mu} d_s^2 \quad \text{----- (2-4)} \end{aligned}$$

$\psi = 0.7, 0.8, 0.847, 0.9$  に対してそれぞれ $K' = 45$ ;

38, 34, 30 となる。したがって、本論で採用した  $\psi = 0.847$  の粒子に対する沈降速度を与える式は、

$$W = \frac{g}{34} \frac{\rho_s - \rho_w}{\mu} d_s^2 \text{-----} (2-5)$$

## (2) 計算例

表(2-2)の測定値に基づいての計算例を示すと次の通りである。

$W = 0.108 \text{ cm/sec}$ ,  $d_{avg} = 112 \times 10^{-3} \text{ cm}$ ,  $\mu = 1.274 \times 10^{-2} \text{ poise}$ ,  $g = 980 \text{ cm/sec}^2$ ,  $\psi = 0.847$ ,  $\xi = 0.965$ .

$$\begin{aligned} \rho_e &= \rho_s - \rho_w = \frac{135 \mu W}{4 g d_s^2} = \frac{135}{4} \frac{\mu}{g} \frac{W}{\xi^2 d_{avg}^2} \\ &= \frac{135}{4} \frac{1.274 \times 10^{-2}}{980} \frac{0.108}{(0.965 \times 112 \times 10^{-2})^2} \\ &= 0.0041 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

ここで、 $\rho_e$ : フロックの水中での有効密度 ( $\text{g/cm}^3$ )、フロックが水中に存在する時に問題となるのはフロックの実密度から水の密度を差し引いた値で、この値を本論ではフロック有効密度と称する。

## 2-2-5 実験条件

フロック密度に影響を与える因子としては次のようなものが考えられる。

(1) 水中にけん濁している濁質粒子の特性とその濃度, (2) 水質および凝集条件, 例えば pH, アルカリ度, 共存イオン, 水温等, (3) 添加された凝集剤の特性とその注入量, (4) フロック形成攪拌強度, (5) フロック形成補助剤の効果。

以上の5つの因子がフロックの密度に与える影響を調べるために、前節で述べた装置・方法によって実験を行なった。 (1) については、上水・工業用水処理の対象となるのは主として河川水中にけん濁している粘土粒子であるから、実験には濁質粒子として市販のカオリンを用いた。

(2) については、原水として表(2-5)に水質を示してあるような北海道大学自家用排水と札幌市排水および蒸留水にアルカリ分として  $\text{NaHCO}_3$  を 50ppm 加えたものの

三種類を使用した。

凝集  $PH$  は自家用水道水では 6.0, 7.0, 7.5, 8.0, 8.5, 9.0 とし、蒸留水は 8.0 札幌市水道水は 7.0 に調整し、 $PH$  の影響は自家用水道水を用いて調べることにした。

(3) については、凝集剤として硫酸アルミニウム  $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O]$  とポリ塩化アルミニウム (PAC) を用いその添加量は濁質量に応じて変化させた。

(4) については、急速攪拌は 100 r.p.m に固定しフロック形成攪拌は 40, 50, 60, 80 の 4 水準とした。

(5) については、フロック形成補助剤として活性ケイ酸とアルギン酸ソーダ、アコフロック、フローナックを使用した。

## 2-2-6 フロック密度関数

測定結果の 1 例を、原水が自家用水道水、濁質濃度 50 ppm, 凝集剤添加量 PAC 2 ppm,  $PH$  7.0, フロック形成攪拌 40 r.p.m について、横軸にフロック径  $ds$  縦軸にフロックの有効密度  $\rho_e$  をとり両対数グラフ上にプロットすると図(2-8) のようになる。

すべからずの実験条件について図(2-8) の関係が見出された。したがって、同一条件で凝集・フロック形成を行なったフロックであっても、その寸法によっても密度も異なるので粒径と密度の関係を数式化しておかなくてはならない。

両対数グラフ上で、フロックの有効密度  $\rho_e$  とフロック径  $ds$  は右下がりの直線関係を有するので、 $\rho_e$  と  $ds$  の関係を与える実験式は次のようになる。

$$\rho_e = \frac{a}{(ds/1)^{K_p}} \text{-----}(2-6)$$

ここで、 $\rho_e$ : フロックの有効密度 = フロックの実密度 - 水の密度 ( $g/cm^3$ )、 $ds$ : フロックと等体積の球の直径 (cm)、フロックの実測径を  $df$  とすると  $ds = 0.965 df$ 、 $a \cdot K_p$ : 凝集条件によって決まる定数値であり、次元はそれぞれ ( $g/cm^3$ )・(無次元)、 $a$  は式(2-6)の直線が  $ds = 1 cm$  を切る値すなわちフロック径が 1 cm の時に想定される有効密度を示す。したがって、式(2-6)の右辺の分母はフロック径を 1 cm で除した無次元の形をとる。以下の式中ではこの 1 cm を略すか次元を考える際には注意されたい。

本章における実験結果の整理に当っては、式(2-6)に従って各々の実験毎に最小自乗法によつてフロック密度関数の指数 $K_f$ と係数 $a$ を求め、それらの値を用いてフロック密度を定量的に表示することとした。

濁度20ppm, PAC/PPmの条件でのフロックの有効密度とフロック径の関係を、PHをパラメーターとして整理したものが図(2-9)である。濁度50ppm, 硫酸アルミニウム30, 40ppmの場合に、 $PH=7.0\sim 9.0$ の範囲の実験結果をまとめプロットしたものが図(2-10)と図(2-11)である。

図(2-9)～図(2-11)を参照すると、 $PH=7.0\sim 9.0$ と云つた実用の範囲では凝集の際のPHはフロック密度に影響しないと思つて良いであらう。

また、フロック形成攪拌強度についても図(2-12)に見られるように40～80r.p.m.のデータがすべて同一直線上にあると思つて得るので、フロック密度に対するフロック形成攪拌強度の影響を無視することができるとする。

原水の違いによる効果も図(2-13)に示すように実用上は有意の差が認められなかった。

次に、以上の知見をもとにしてけん濁質濃度、凝集剤添量、凝集剤の種類、フロック形成補助剤がフロック密度に対していかなる影響を及ぼすかについて検討してみることとする。実験条件は次のようである。

1) 凝集剤として硫酸アルミニウムを用いた場合に原水として自家用下水道水として用い、表(2-6)の組合わせで実験を行なった。

2) 凝集剤としてポリ塩化アルミニウム(PAC)を用いた場合に原水として自家用下水道水を用いて $PH=6.0\sim 9.0$ の範囲で表(2-7)の組合わせで実験を行なった。

濁質濃度と添加凝集剤量とは次式で定義されるALT比によつて表わし一括表示することとした。

$$ALT比 = \frac{\text{アルミニウム注入率}}{\text{けん濁カオリン濃度}} \quad \text{-----} (2-7)$$

ただし、アルミニウム注入率は硫酸アルミニウム、PACのいずれに依つても $Al^{3+}$ イオンとして計算した。

各々のALT比における測定結果のプロットしたものが図(2-14)～図(2-17)である。いずれの場合も、フロック密度関数で示されるような両対数グラフ上で右下がりの直線関係を有している。図(2-14)は硫酸アルミニウムを用いたALT比が1:20の図であり、表(2-8)のような各実

験結果を総括したものである。図(2-15)は硫酸アルミニウムを用いた A/L 比 1:12 につりま表(2-9), A/L 比 1:60 につりま表(2-10)のようない条件の実験結果を総括したものである。図(2-16)は PAC を用いた場合の A/L 比が 1:10 につりまの表(2-11), A/L 比が 1:100 につりまの表(2-12)のようない実験結果を総括したものである。

図(2-17)は PAC を用いた A/L 比が 1:20 の表(2-13), A/L 比が 1:50 の表(2-14)のようない実験結果を総括したものである。

ハ凝集剤として硫酸アルミニウムを用いフロック形成補助剤を併用した場合

カオリン濃度 100 ppm, 硫酸アルミニウム 40 ppm (A/L 比 = 1:30) でフロック形成補助剤としてアコフロックを 0.1, 0.2, 0.3 ppm 注入し, pH を 7.5, 9.0 とした実験結果が図(2-18)であり, フロック形成補助剤として活性ケイ酸 1.0 ppm, アルギン酸ソーダ, アコフロックを 0.1, 0.2, 0.3 ppm 注入し pH を 9.0 に固定したものが図(2-19)である。

図(2-14)~ 図(2-17)に示された密度関数の指数  $K_s$  と係数  $a$  とを A/L 比との関係で示すと図(2-20)が得られる。

## 2-2-7 実験結果の総括

本章で行なわれたフロック密度に関する実験によつて得られた知見は次の諸項目に要約される。

1) フロック粒子の沈降はほとんどの場合ストークス領域で行なわれる。

2) フロック粒子の有効密度  $\rho_e$  とフロック径  $d_s$  の間には次のような関係が成立する(フロック密度関数)。

$$\rho_e = \frac{a}{(d_s/1)^{K_s}} \quad \text{----- (2-6)}$$

3) 凝集の際の pH, 原水水質, フロック形成攪拌強度は、実用範囲内ではフロック密度に影響を与えない。

4) アルミニウム注入率に対するけん濁質濃度の比 (A/L 比) が大きくなると同一粒径のフロックの密度は低くなる。A/L 比が小さくなるにつれて粒径の増加に伴うフロック密度の減少率は小さくなる。すなわち, A/L 比が小さく

なるにつれてフロック密度関数の指数  $K_F$  は小さくなり係数  $a$  は大きくなる。

A/LT比が 1: (50~100) では  $K_F$  はほぼ 1 となり, A/LT比が 1: 20 では  $K_F = 1.2 \sim 1.3$ , A/LT比が 1: 10 では  $K_F \approx 1.4$  となった。

5) 同じ A/LT比であれば硫酸アルミニウムによるフロックと PAC によって形成されたフロックは同一密度関数で示され差はない。

PAC によって生成したフロックの沈降性やぐれづまりのほ, 低い A/LT比でも凝集・フロック形成が可能であり, 低い A/LT比でのフロックの密度は同一粒径について高いためと, 同一 A/LT比では硫酸アルミニウムに比して大形のフロックが形成されると云った理由にある。

6) A/LT比が 1: 10, 1: 20 と云った大きな割合では 1 ppm 以下の微量のフロック形成補助剤がフロック密度に及ぼす影響も無視することができるが, A/LT比が 1: 50 程度以下の小さな場合はフロック形成補助剤の影響も無視できなくなる。

フロック形成補助剤は A/LT を大きくすると同様の効果があり, 同一攪拌強度下でのフロック径を増加させるか密度を減少させる。しかし, 通常使用される程度の凝集剤とフロック形成補助剤の併用によって, フロック密度に対するフロック形成補助剤の影響は無視しうる。

以上に述べたように, フロック密度を支配する主要な因子としては, ①フロック径と②A/LT比がある。実際の装置の設計・運転に当たってはこの二因子を考慮しなければならない。

この実験的研究で見出されたフロック径と有効密度との間にランダムな現象と見えても示すところから, フロック径の増加は有効密度の増加に伴って起こる。実際は図(2-2)に示すように A, B, C と云う同一密度を持つフロックが混合して新たに大形フロックが形成された場合に, A, B, C フロックに加えて間隙水を該フロックの中に取り込むと云った模式的説明によって定性的には理解できる。

フロック密度関数は次式のよう書き換えることができる。

$$f_e = a^* \left( \frac{ds}{d^*} \right)^{-K_F} \text{-----} (2-8)$$

$$\alpha^* = \rho_s - \rho_w \text{ ----- (2-9)}$$

ここで、 $\alpha^*$ :初期粒子の有効密度 ( $g/cm^3$ )、 $d^*$ :フロック密度関数グラフ上で  $\rho_e = \alpha^*$  を与えるフロック径 ( $cm$ )。

式(2-8)によれば、 $d_s = d^*$  の時  $\rho_e = \rho_s - \rho_w$  となるがカオリン粒子の有効密度である 1.65 程度の数値となるはずであるが、 $\rho_e = 1.65$  を与える  $d^*$  と  $K_F$  の関係を表示すると表(2-15)となる。

フロック密度関数がカオリン粒子を最小粒子とし数  $m_m$  程度のフロックを最大粒子とする全領域にわたって成立するためには、 $d^* = d_1 \div 4 \times 10^{-4} cm$  (カオリンの直径) とならなければならない。この条件は  $K_F \div 0.9$  の時に満たされるが、それ以上の  $K_F$  については  $d^* > d_1$  となっている。

式(2-1)によって求められた含水率とフロック密度の関係を示した表(2-1)を参照しながらフロック密度関数の特性を考察してみることとした。

フロックの含水率  $e$  とフロック密度関数の関係は式(2-1)から求めることができる。

$$\rho_s(1-e) + \rho_w e = \rho_f = \rho_e + \rho_w$$

$$\rho_s(1-e) - \rho_w(1-e) = \rho_e \text{ ----- (2-10)}$$

式(2-8)と式(2-10) から

$$(1-e) = \left( \frac{d_s}{d^*} \right)^{-K_F} \text{ ----- (2-11)}$$

式(2-6)あるいは式(2-8)で示されたフロック密度関数が信頼しうるものであれば、式(2-1)によって求められた式(2-11)の左辺の値と、式(2-8)から求められた右辺の値が一致しなければならぬ。

例を A L T 比 = 1 : 50 および 1 : 10 にとって以下に検討してみることにする。

表(2-1)より、 $1-e = 0.05$  とすると  $\rho_e = 0.08$  となるからフロック密度関数を用いて  $\rho_e = 0.08$  を与えるフロック径  $d_s$  を求め、各々の A L T 比毎の  $K_F$  と  $d^*$  を用いて式(2-11)の右辺を計算しその結果が 0.05 とならなければならない。

A L T 比 1 : 50 では、 $K_F = 1.03$ 、 $d^* = 10 \times 10^{-4} cm$  であ

り図(2-17)〔ALT比 1:50 のフロック密度関数のプロット〕から  $\rho_e = 0.08$  を与えるフロック径として  $d_s = 200 \times 10^{-4} \text{ cm}$  を得る。したがって、

$$\left(\frac{d_s}{d^*}\right)^{-K_s} = \left(\frac{200}{10}\right)^{-1.03} \doteq 0.05$$

ALT比 1:10 では  $K_s = 1.40$ ,  $d^* = 20 \times 10^{-4} \text{ cm}$  であり図(2-16)〔ALT比 1:10 のフロック密度関数のプロット〕から  $\rho_e = 0.08$  を与えるフロック径として  $d_s = 180 \times 10^{-4} \text{ cm}$  を得る。したがって、

$$\left(\frac{d_s}{d^*}\right)^{-K_s} = \left(\frac{180}{20}\right)^{-1.40} \doteq 0.05$$

同様にして、 $1 - e = 0.03$  においても式(2-11)の成立することが示された。

以上の議論によっても本章6節で提示されたフロック密度関数の有効性が明らかである。

今迄に実測されたフロック密度は 100  $\mu$  程度以上のフロックについてのものであるから、100  $\mu$  以下のフロックについてのもフロック密度関数を使用し得るか否かを検討しておかなければならぬ。例を图(2-14)に示した ALT 比 1:20 のフロック密度関数にとって検討を行なうこととする。

图(2-14)の回帰直線を小粒径側に外押して行くとカオリン粒子の直径を与える  $d_s = 3 \sim 4 \mu$  に至る以前の  $d_s = 12 \sim 15 \mu$  の所でカオリンの有効密度  $\rho_e = 1.65 \text{ g/cm}^3$  に達する。さらに、 $d_s = 3 \sim 4 \mu$  の所で直線を延長すると  $\rho_e \doteq 7.8 \text{ g/cm}^3$  となり不合理が生ずる。したがって、フロック密度関数をもつての粒径範囲に適用することはできない。

その理由としては、表(2-1)からも分かるように粒径の小さいすなわち含水率の低いフロックでは、同じ含水率の増分に対する有効密度の減少率が含水率の高いフロックに比べて小さい。例えば、10%から50%へと40%だけ含水率が増加した場合の有効密度の減少率は  $(1.50/0.83) \doteq 1.8$  であるのに対して、50%から90%へと40%含水率が増加した場合に  $(0.83/0.17) \doteq 5$  と非常に差がある。

そこで、厳密にはフロック密度関数は图(2-22)に示されるように勾配の異なる二本の回帰直線で構成されていることとなる。勾配の異なる回帰直線で表わされる二つの領域は次のような特徴を持つてゐる。

領域1: フロック径が小さい場合でフロックの含水率が

低く、その中に含まれるけん濁粒子がフロック密度を規定する。したがって、フロック径の増加に伴う密度の減少率は小さい。

領域2: フロック径が大きい場合でフロックの含水率は高く、その中に含まれる間隙水がフロック密度を規定する。したがって、フロック径の増加に伴う密度の減少率は大きい。

散密には各々の領域毎に別々のフロック密度関数が成り立つが、領域1にあるフロックのほ極め小さい場合、 $10 \sim 15 \mu$  径のフロック程度以下のみで論を進めると、対象とした領域よりけん濁粒子そのものの本質密度関数でフロック密度を表すことがでる。

## 2-3 シミュレーションによるフロック構造の検討

前節において、フロックの静水中での単粒子沈降速度と粒子径を測定し、適当な沈降速度公式を用いてフロック密度を推算し、フロックの有効密度とフロック径  $d_s$  との間に関数式(2-6)で示されるフロック密度関数が成立することを実験によって明らかにした。

凝集剤として硫酸アルミニウムとポリ塩化アルミニウムを使用した場合には、フロック密度関数の指数  $K_f$  はアルミニウム注入率に対するけん濁濃度の比 ( $A/T$  比 = アルミニウム注入率 / 濁度) によって一義的に決まり、 $A/T$  比が  $1/50 \sim 1/100$  では  $K_f \approx 1.0$  程度、 $A/T$  比が  $1/20 \sim 1/30$  では  $K_f \approx 1.3$  程度の値となり、通常フロック形成操作では  $K_f \approx 1.0 \sim 1.5$  程度となることを明らかにした。

本節において、電子計算機を用いるシミュレーションによってモデル的にフロックを形成させ、形成されたモデルフロックの構造を検討することによってフロック密度関数の論理的な裏付けを行なうこととした。

### 2-3-1 フロック構造の基礎式

フロック構造体を構成している部分は次の3つに大別される。

- (1) 原水中にけん濁している濁質粒子。
- (2) 添加された凝集剤 (加水分解等の化学変化を受ける)。
- (3) フロックが衝突合して集塊化して行く際に取込まれ

に間隙水。

凝集剤は何らかの化学変化を受けた後で濁質粒子の表面に吸着されるので、フロックの構成部分はさらに次の二つに集約できる。

(1) 固形物で構成されている実質部分。

(2) 水のみが存在している空隙部分。

今、フロックの全体積を  $V_f (\text{cm}^3)$ 、実質部分の体積を  $V_s (\text{cm}^3)$ 、空隙部分の体積を  $V_w (\text{cm}^3)$  とすると、体積平衡条件から、

$$V_f = V_s + V_w \text{ ----- (2-12)}$$

フロックの実密度を  $\rho_f (\text{g/cm}^3)$ 、水の密度を  $\rho_w (\text{g/cm}^3)$ 、実質部分を構成する固形物の密度を  $\rho_s (\text{g/cm}^3)$  とすると、質量平衡条件から、

$$\rho_f V_f = \rho_s V_s + \rho_w V_w \text{ ----- (2-13)}$$

式(2-13)の左辺はフロックの全重量、右辺第一項はフロック内の実質部分の重量、右辺第二項はフロック内の間隙水の重量である。また、式(2-14)のような関係が存在する。

$$\left. \begin{aligned} V_f &= k_1 d_f^3 \\ V_s &= i k_2 d_i^3 \\ V_w &= V_f - V_s = k_1 d_f^3 - i k_2 d_i^3 \end{aligned} \right\} \text{----- (2-14)}$$

ここで、 $d_f$ : フロックの直径 (cm),  $d_i$ : 実質部分を構成している初期粒子 (濁質粒子に凝集剤が吸着した粒子) の直径 (cm),  $k_1, k_2$ : フロックと初期粒子の形状によって決まる係数 (球の場合は  $\pi/6$ , ここでは粒径  $d_f, d_i$  は各々フロックと初期粒子の長径と短径の二軸平均径を用いてそれぞれの体積を球として求めるので  $k_1 = k_2$  となる)

さらに、 $\rho_e = \rho_f - \rho_w$  をフロック有効密度として定義してあるので、式(2-13)と式(2-14)から、

$$(\rho_w + \rho_e i)(k_1 d_i^3) = \rho_s i k_2 d_i^3 + \rho_w (k_1 d_i^3 - i k_2 d_i^3)$$

初期粒子が  $i$  個集合したフロックについて考えるので添字  $i$  を付ける。そこで、有効密度  $\rho_{ei}$  とフロック径  $d_i$  と

の間には次式が成立する。

$$\rho_{ei} = i(\rho_s - \rho_w) / (d_i/d_1)^3 \text{ ----- (2-15)}$$

もし  $i$  と  $(d_i/d_1)$  とを式(2-16)のように関係づけることができれば、式(2-15)は式(2-17)となつて式(2-6)に示されたフロック密度関数に帰一させることができる。

$$i = \alpha \left( \frac{d_i}{d_1} \right)^\beta \text{ ----- (2-16)}$$

$$\begin{aligned} \rho_{ei} &= \alpha (\rho_s - \rho_w) d_1^{3-\beta} d_i^{\beta-3} \\ &= K' d_i^{\beta-3} \text{ ----- (2-17)} \end{aligned}$$

そこで、何らかの方法で式(2-16)の関係を見出すことができれば、式(2-6)で与えられたフロック密度関数に対する論理的な説明が与えられたことになる。

本節では以下に示すような方法によつてモデル的に形成させたフロックの特性から式(2-16)の関係を見出せるか否かを検討することとした。

## 2-3-2 シミュレーションモデル

フロックの衝突合の過程を一種のランダム現象として取扱つて、その点に着目して、乱数を用いたシミュレーションによつてフロックをモデル的に形成させその構造を明らかにしようとする試みは、最初に Vold にまつた。Vold の採用したシミュレーションモデルは、初期粒子が乱数によつて定められた位置から次にまた乱数によつて定められた方向に移動することによつて、1個づつフロックに衝突合して行くモデルである。しかし、このようなモデルでは複数の初期粒子が集合してゐる集塊粒子群(フロック)同志が衝突合して行くような通常のフロック形成過程を正確にモデル化することはできない。

Vold モデルは1個づつフロックに取込まれると云つた条件を採用してゐるため、このシミュレーションモデルによつて形成されたフロックは実際に形成されるフロックよりも高密度となるはずである。この点については Sutherland

— *Gold* も同様の批判も行ない彼独自のモデルも提示して  
いるが<sup>5)</sup>、密度関数を誘導するに足る結論を得ていない。

図(2-23)が *Vold* モデル，図(2-24)が *Sutherland*  
モデル<sup>6)</sup>で形成されたモデルフロックである。

図(2-23)のモデルフロックの特性は次のような式で示  
される。

$$r = K_1 i^{0.429} \text{-----} (2-18)$$

$$\rho_c = K_2 i^{-0.290} \text{-----} (2-19)$$

ここで， $r$ ：フロックの半径， $i$ ：フロックに取込まれて  
いる初期粒子の数， $\rho_c$ ：フロック中で実質部分の占める割  
合， $K_1$ ・ $K_2$ ：定数。

*Gemmell* 等は式(2-18)，(2-19)を基にして式(2-  
20)を誘導し著者と異なる実験方法による測定値から，式  
(2-20)の裏付けを行なった。

その結果，攪拌強度，フロック形成補助剤等がフロック  
密度に与える影響に関して著者と類似の結論を独自に発表  
している。

$$\rho_f - \rho_w = K_3 A_p^{-0.338} \text{-----} (2-20)$$

$$= K_4 d^{-0.676} \text{-----} (2-21)$$

ここで， $\rho_f$ ・ $\rho_w$ ：フロックと水の密度( $g/cm^3$ )， $A_p$ ・ $d$ ：  
フロックの投影面積と直径( $cm^2$ )・( $cm$ )， $K_3$ ・ $K_4$ ：定数。

しかし，基礎となつてゐる *Vold* のモデルが前述のよう  
な欠陥を持つたためにフロック形成過程を正しく再現しえな  
い以上，*Gemmell* 等の結果は定性的にはともかく定量的  
な設計基準値として採用するには問題がある。

そこで，本論では次に示すような新しいモデルを提示し  
て，より正確に実際のフロック形成過程を再現しうるシミ  
ュレーションによるモデルフロックを形成させることを  
試みた。

簡単のために三次元の現象を二次元の現象に置き換えて  
考えることとした。着目してゐる現象がランダムであつて  
方向性を持たないもので，二次元に置き換えても支障はなく

次にモデルの詳細について述べることにする。  
 1) まず、平面上に単位直径の初期粒子が一様に分布して  
 おり、その存在位置が座標  $(X, Y)$  で与えられる。図 (2-25) の  
 およそこの座標を 1 から 100 までの格子番地で代表  
 させる。

初る。す々の一決  
最も問題をつけ  
は成問ッ付タ  
的形を過口を  
終が布のフみラ  
最ッ度合れる向  
は、口粒とさよ方  
けつの突成に動  
行たク衝形さ移  
し合口ウが火そ  
近集フよこでし  
リかとこの扱  
を全部示、多選  
を全速にかなを  
作子成章と子分  
操粒形5お象粒  
の期ウ第が対マ  
こ初ッ、要のっ水  
続きたは議論ま  
引きし、合に議に  
存在お、論の教  
なるなるにも様  
定

のれ、実。数と粒子が、  
つめのである。関する粒  
る沢い密度 *Suther* の  
すに、なん密は勝、他  
一ムが、進ッ点に、間、  
合ダ、制限も、あるの、  
突ン、制リ、は、る、子、  
衡ラ、に、よ、つ、い、ほ、  
は、何、倍、デ、ル、に、お、つ、  
ル、オ、モ、粒、の、直、と、お、  
デ、動、粒、の、能、に、さ、  
モ、移、に、性、可、性、さ、  
ン、め、も、*Vol*、の、特、用、さ、  
ツ、方、で、*Vo*、の、示、突、  
一、の、相、点、ッ、表、も、衡、  
レ、一、の、有、口、的、ま、は、  
ユ、合、子、の、量、的、ま、  
ミ、と、粒、の、定、量、デ、目、  
シ、扱、え、し、デ、モ、デ、  
の、選、る、く、モ、け、の、  
著、者、の、選、る、く、モ、  
粒、の、突、に、そ、付、  
粒、の、突、情、子、結、  
- *land*、著、者、の、  
存、在、と、衡、

この点について著者のフロック形成理論が第3章で述べられるように渦による乱流拡散によって粒子同志が接近し、衝突の律速段階が粒子近傍のマイクロな拡散にあると云った仮定に立っているもので何ら理論と矛盾する所はない。

シミュレーションモデルをフローチャートで示すと表(2-16)となり、そのフローチャートに従って作成したプログラムが表(2-17)である。

### 2-3-3 計算結果

表(2-18)は打出された計算結果の1例である。第一列は左から順に粒子の存在位置、その粒子(フロック)に集合している初期粒子の数、粒子の相対径(粒子の二軸平均径/初期粒子径)、その存在位置にあった集合前の粒子の重心の座標(X, Y)である。第二列以下は集合後のフロック集合体を構成している個々の初期粒子すべての座標(X, Y)を示す数値である。

表(2-18)のデータ( $X_i, Y_i$ )を1個づつXY平面上にプロットして作成したモデルフロックが図(2-26)である。Voldのモデルフロックと著者のモデルフロックとの形状の差が明確に示されており、図(2-26)のモデルフロックは実際に形成される膨潤な構造のフロックに近い形状となっている。その他の畚地で形成されたモデルフロックが図(2-27)と図(2-28)である。

次に種々の乱数の組合せによる計算結果を総括して、横軸にフロック相対径  $d_i/d_1$ 、縦軸にフロックに含まれている初期粒子数  $i$  をとって両対数グラフ上にプロットすると図(2-29)が得られる。図(2-29)の関係によって式(2-16)の仮定が成立することが示され、その指数  $\beta$  は図の回歸直線の勾配がほぼ1.4であるから二次元モデルの結果を三次元モデルに換算することによって決められ  $\beta \div 2.1$  となり、係数  $\alpha$  は  $\alpha \div 1$  となった。

したがって、式(2-16)は次式のようになる。

$$i = \left( \frac{d_i}{d_1} \right)^{2.1} \text{-----} (2-22)$$

そこで、式(2-17)は次式のよう決定される。

$$P_{ei} = (P_s - P_w) d_1^{0.9} d_i^{-0.9} \text{-----} (2-23)$$

$$K' = (\rho_s - \rho_w) d_1^{0.9} \text{-----} (2-24)$$

粘土粒子が濁質成分となつてゐる場合には、 $\rho_s \div 2.65 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_w \div 1.00 \text{ g/cm}^3$ ,  $d_1 \div (3 \sim 4) \times 10^{-4} \text{ cm}$  であるから、式(2-23)より式(2-6)の定数  $a \cdot K_s$  はそれぞれ、 $a \div (1.1 \sim 1.5) \times 10^{-3}$ ,  $K_s = 0.9$  と決められる。

前述の通り  $a \cdot K_s$  は A L T 比の関数であり、実験によつて求められた  $a \cdot K_s$  と A L T 比の関係は図(2-20)のようになされた。本節でのモデルフロックは濁質粒子表面への凝集剤の吸着を無視し、濁質粒子そのものを初期粒子と見なし議論を進めて来た。したがつて、形成されたモデルフロックは A L T 比が 0 の場合に生成するフロックと考へなければならぬ。

以上の点を考慮して図(2-20)を参照すれば、実験とシミュレーションによつて得られた  $a \cdot K_s$  の値が非常に良く一致しており、実験値の信頼性が確認された。

いかなる接触フロック形成は既成の大形フロックに微小なマイクログロック群が吸合されて行く著しく粒径を異にする二群の間の集塊現象であるが、この場合には、前者のモデルで形成されたフロックへ Vold 様のモデルによつて微小フロックが 1 個づつ取込まれて行くプロセスが考えられる。図(2-30)に示されるように、フロックグラウンケッ ト内のフロックの密度が通常のフロック形成によつて生成するフロックの密度よりかなり大きな値を持つと云つた事はこの考え方を裏付けるものである。

## 2-4 生物フロック(活性汚泥)の密度

60 l 容量の水槽に自家用水道水を 50 l 入れ、ヒーターで水温を  $20^\circ\text{C}$  に保ちエアープレッサーで槽内に空気を送り曝気を行つた。表(2-19)に示されるような組成の薬品を溶解し、真駒内処理場の曝気槽流入直前の都市下水を 100 ml 加えて種付けをした。水温を  $20^\circ\text{C}$  に保つたのは、水温の変化によつて生物相が変化するのを防ぐためである。

生物フロックの測定方法は本章 2 節で述べた方法によつたが、汚泥濃度が低い場合はフロック形成槽内で直接フロックを形成させたが濃度が高い場合は適当に槽内液を希釈してからフロックを形成させた。フロック形成は 3.0 r.p.m で 30 分間の攪拌によつて行つた。

図(2-31)は上述の入下水にカオリンを 20, 40, 50

ppm加えた（薬品の溶解と同時に添加した）もの、北大学  
生工学科下水工学研究室の人工下水、札幌市の奥駒内、釧  
成川両処理場の活性汚泥について示したフロック密度関数  
のプロットである。

## 2-5 フロック強度

フロックの持つ物性の中で処理施設の合理的設計を行な  
うために不可欠な因子はフロック密度とフロック強度であ  
る。

前者については前節まで詳細に述べて来た。本節では  
後者について先に丹保らによって発表されたフロック強度  
に関する取扱いの概要を述べ、本研究および他の2, 3の  
研究から得られた資料を合わせてフロック強度に関する若  
干の検討を加えたい。

さらに、先に提示されたフロック密度関数の与攪拌強度  
下でのフロックの最大成長径を求める式への適用について  
述べることにする。

### 2-4-1 フロックの最大成長径を求める式<sup>9)</sup>

与えられた攪拌条件下で浮遊しているフロック粒子は、  
乱流変動によって生ずる剪断破壊力によって破壊するもの  
と考える。

この破壊現象を支配する2つの力は、1)フロックの結合  
力と、2)乱流変動によってフロックが受ける力である。フ  
ロックの結合力 $B$  ( $g \cdot cm/sec^2$ )はフロックの破壊断面内  
でのフロックの実質部(2次空隙を除いた部分)の占める  
面積 $A$  ( $cm^2$ )に比例すると考えることができる。

$$B = \sigma A \text{ ----- (2-25)}$$

ここで、 $\sigma$  : フロックの結合強度を示す係数 ( $g/cm \cdot sec^2$ )

今、粒子の直径を $d_f$  ( $cm$ )とするとフロック粒子の実体積  
(空隙水を除いた部分の体積)  $V$  ( $cm^3$ )は、

$$V = k_1 d_f^3 (1 - e) \text{ ----- (2-26)}$$

ここで、 $k_1$  : フロックの形状によって決まる係数 (無次元)

$e$ : 空隙率 (無次元)。

したがって、破壊断面における実質部の面積  $A$  は、

$$A = k_2 d_f^2 (1-e)^{\frac{2}{3}} \quad \text{-----} (2-27)$$

ここで、 $k_2$ : 無次元係数

そこで、直径  $d_f$ 、空隙率  $e$  のフロックの結合力  $B$  は

$$B = k_2 d_f^2 (1-e)^{\frac{2}{3}} \sigma \quad \text{-----} (2-28)$$

実質部分の占める割合  $(1-e)$  は前節の式 (2-10) から与えられるので、剪断破壊に対するフロックの抵抗力  $B$  は、

$$B = k_3 d_f^{2(1-\frac{K_p}{3})} \sigma \quad \text{-----} (2-29)$$

ここで、 $k_3: k_2 d^{*\frac{2}{3}K_p} \{(\text{g/cm}^3)^{\frac{2}{3}}\}$ ,  $d^*$ : 式 (2-8) 参照。

一方、乱流変動によって粒子が受ける外力は、粒子表面の二点間の動圧強度の差として表わされその最大のものは粒子直径  $d$  だけ離れた二点間の単位面積に作用する力で次のように表わされる。

$$\Delta f = k_4 \rho_w \frac{|\overline{v_1' - v_2'}|^2}{2} \quad \text{-----} (2-30)$$

ここで、 $\Delta f$ : 直径  $d$  の両端に働く動圧強度差 ( $\text{g/cm} \cdot \text{sec}^2$ )  
 $k_4$ : 比例定数 (無次元),  $\rho_w$ : 水の密度 ( $\text{g/cm}^3$ ),  $|\overline{v_1' - v_2'}|$ :  
 $d$  だけ離れた二点における速度差の時間平均の絶対値。

一般に、フロック形成のほとんどの段階はフロック径  $d_f$  が乱れのマイクロスケール入。に比してはるかに小さい粘性領域で行われるので、フロック形成理論は粘性領域内のマイクロ拡散輸送現象支配として展開される (第3章参照)。また、後述するように通常のフロック形成条件で最大成長フロック径  $d_{max}$  が乱れのマイクロスケール入。と同程度の範囲 ( $\lambda_0 \div d_{max}$ ) でも粘性領域 ( $\lambda_0 \gg d_{max}$ ) の理論が使用できることが明らかであるから、フロックの破

壊現象を支配しフロックの与搅拌強度下における最大成長  
径を規定する乱れの渦も局所等方性条件下にあるものと考  
えられる。したがって、距離  $d$  だけ離れた二点間の速度差  
 $|\underline{v}_1 - \underline{v}_2|$  はスケール  $\lambda = d$  の乱流渦の速度  $v_\lambda = d$  に等し  
いと考えられる。そこで、粘性領域で対して、

$$v_{\lambda=d} = \beta \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} d, \quad d \ll \lambda_0 \text{-----}(2-31)$$

ここで、 $\epsilon_0$ : 有効エネルギー消費量 ( $\text{erg/cm}^3 \cdot \text{sec}$ ),  $\mu$ :  
水の粘性係数 (poise),  $\beta$ : 定数

したがって、直径  $d$  なる粒子の両端に働く動圧強度差  $\Delta f$   
は、

$$\Delta f = k_5 \rho_w \frac{\epsilon_0}{\mu} d^2, \quad d \ll \lambda_0 \text{-----}(2-32)$$

ここで、 $k_5$ : 比例定数。

総動圧  $\Delta F$  は粒子の表面積に比例すると考えられるので、

$$\Delta F = k_6 \rho_w \frac{\epsilon_0}{\mu} d^4, \quad d \ll \lambda_0 \text{-----}(2-33)$$

ここで、 $k_6$ : 比例定数。

フロックの破壊が生ずるのはフロックを剛体と見て、 $B$   
<  $\Delta F$  となった時である。そこで、式(2-29)と式(2-33)  
から破壊限度条件を  $B = \Delta F$  とし、粘性領域におけるフ  
ロックの最大成長粒径  $d_{\max}$  は、

$$k_3 d_{\max}^{2(1-\frac{k_F}{3})} \sigma = k_6 \rho_w \frac{\epsilon_0}{\mu} d_{\max}^4$$

$$\therefore d_{\max} = k \left( \frac{\mu}{\rho_w} \right)^{\frac{3}{2(3+k_F)}} \epsilon_0^{-\frac{3}{2(3+k_F)}} \text{-----}(2-34)$$

ここで、 $k$ : 比例定数 ( $\text{cm}^{\frac{3}{3+k_F}}$ )。

フロックの結合強度と構造は主として凝集条件によって  
定まるものと考えられるので、同じ性質 (A-L-T 比などの  
等しい) について搅拌強度  $\epsilon_0$  とフロックの最大成長粒径

の関係をも式(2-34)から次のように簡略化して示しうる。

$$d_{max} = K \varepsilon_0^{-\frac{3}{2(3+K_f)}} \text{-----} (2-35)$$

$$K = k \left( \frac{\rho_m}{\rho_w} \right)^{\frac{3}{2(3+K_f)}} \text{-----} (2-36)$$

前節で明らかにされたように、淨水処理の通常の化学的凝集条件でのフロック密度関数の指数  $K_f$  の値は 1.0 ~ 1.5 の間にある。また、有効エネルギー消費率  $\varepsilon_0$  は乱流条件下では、攪拌翼回転数  $N_r$  の3乗に比例する。そこで、与攪拌翼回転数  $N_r$  での最大フロック径  $d_{max}$  は式(2-37)で示される。

$$d_{max} = K \varepsilon_0^{-(0.375 \sim 0.333)} \propto N_r^{-(1.13 \sim 1.0)} \text{-----} (2-37)$$

## 2-5-2 計算式の実験的検討

第3章6節で示されるような接触フロック形成にまつ間接的方法とトルクメーターを使用する直接的方法にまつ有効エネルギー消費率  $\varepsilon_0$  を求め、種々の実験条件におけるフロックの写真撮影の結果から  $\varepsilon_0$  と  $d_{max}$  の関係をも求めた。図(2-32)は著者、丹保ら、小笠原<sup>(9)</sup>、Argaman<sup>(10)</sup>の実験値を一括して同一グラフ上に示したものである。小笠原のデータはパイプフロッキユレーターによるものであり、その際の有効エネルギー消費率  $\varepsilon_0$  は損失水頭から求めた総エネルギー消費率  $\varepsilon_*$  の5%もなわち  $\varepsilon_0 = 0.05 \varepsilon_*$  とし、丹保らおよび Argaman のデータはパドル攪拌にまつものであり、その際の  $\varepsilon_0$  はトルクメーターで求められた  $\varepsilon_*$  の10%程度と考えられるので  $\varepsilon_0 = 0.1 \varepsilon_*$  として計算した。

図(2-31)から、今迄行なってきた議論の妥当性が確認された。したがって、フロックの最大成長径がフロック強度を直接的に示すことになる。

さらに、丹保らは標準的な凝集条件で生成されたフロックと他の凝集条件で生成されたフロックの最大成長径を比較することによって、フロック強度を式(2-38)にまつ相対的に表示した。

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_0} = \left( \frac{a_i}{a_0} \right)^{-\frac{2}{3}} \left( \frac{d_{max-i}^{(3+K_{pi})}}{d_{max-0}^{(3+K_{p0})}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

----- (2-38)

ここで、 $\sigma_0$ ・ $\sigma_i$ :標準フロックと任意の凝集条件で生成したフロックの強度 ( $g/cm \cdot sec^2$ )、 $a_0$ ・ $a_i$ ・ $K_{p0}$ ・ $K_{pi}$ :標準および任意の凝集条件によって決まるフロック密度関数の係数と指数 ( $g/cm^3$ )・(無次元)。

種々の凝集条件におけるフロック強度比を示すと表(2-19)のようになる。

## 2-6 まとめ

本章では急速ろ過システムにおいて固液分離操作の直接の対象となるフロックの密度についての定量的検討を行なった。また、フロック密度特性を応用して丹保らによって誘導された与撹拌強度下におけるフロックの最大成長径を求める式を著者および他の研究結果を用いて検討し、その有用性・普適性を再確認した。

フロックは原水中に浮遊しているけん濁質と添加された凝集剤が結合したものが絮状にからみ合い、その空隙に多量の水を包含した非常に小さい粒子であり、径の増加に伴ってその空隙率は増加して行く。したがって、フロックが大形化するにつれてその密度は減少する。もし個々のフロックの密度を測定しようとするならば次の2つの条件を満たさなければならない。すなわち、フロックは極めて小さい粒子であるからその測定は水中に浮遊している状態でフロックに直接触れることなく行うこと、もう一つはフロックは沈降中に衝突合して粒子の寸法・形状を変えていくゆる凝集沈降をする粒子であるからできるだけ稀薄なけん濁液中で独立の粒子として存在させて測定を行なうことの2条件である。そこで、上記の条件を満たすための方法として、本章では、フロックの静水中での単粒子沈降速度 $w$ と沈降中のフロックの径 $d_f$ を測定し、適当な沈降速度式を用いてフロックの密度を推算する方法を採用した。

使用した沈降速度式はフロックを形状係数0.847の正八面体と仮定してその抵抗係数を補正してえた式(2-5)であ

る。

$$W = \frac{g}{34\pi} (\rho_f - \rho_w) ds^2 \text{ ----- (2-5)}$$

その結果、フロックの実密度から水の密度を差し引いた  
フロックの有効密度  $\rho_e$  とフロックの等価球換算径  $ds$  との間  
に式(2-6)の関係が成立することを明らかにした。

$$\rho_e = \rho_f - \rho_w = \frac{a}{(ds/1)^{K_f}} \text{ ----- (2-6)}$$

式(2-6)の関係を本論ではフロック密度関数と名付けた。  
フロック密度関数の指数  $K_f$  と係数  $a$  にまつ種々の条件  
で白陶土をアルミニウムで凝集させた場合のフロックの密  
度を評価し次のような結果を得た。

(1)凝集の際の水質、 $PH$  は実用の範囲内ではフロック密度  
に影響しない、(2)フロック形成攪拌強度はフロック密度  
に影響を与えない、(3)フロック形成補助剤の添加量が多  
くなるにつれてフロック密度は減少する傾向にあるが、通  
用範囲内ではフロック形成補助剤の添加量ではフロック  
密度に関係しないとしても良い、(4)アルミニウム注入率に  
対する白陶土濃度の比を  $A$  と  $T$  比と定義すると、 $a \cdot K_f$   
は  $A$  と  $T$  比によつてその値が変化する。 $A$  と  $T$  比と  $a \cdot K_f$   
の関係は図(2-20)で示される。

したがって、フロック密度を決定する主因子は、(1)フロ  
ック径と(2)  $A$  と  $T$  比である。

フロックが衝突合して成長して行く過程はランダム現象  
象として扱うことができる。そこで、乱数を用いて電算機  
によつてフロックが形成されて行く過程のシミュレーショ  
ンを行ない、生成されたモデルフロックの構造を検討し、  
フロックの見かけの直径  $d_i$  とその中に含まれる初期粒子  
数  $i$  との間に式(2-22)の関係を見出した。

$$i = \left( \frac{d_i}{d_1} \right)^{2.1} \text{ ----- (2-22)}$$

式(2-22)の関係をを用いると、実験によつて求められた  
フロック密度関数を次のようにして誘導することが出来る。

フロック構造体を構成している部分は次の二つに大別さ  
れる。(1)固形物で形成されている実質部分、および(2)水  
のみが存在している空隙部分。

フロックの体積と質量をそれぞれ式(2-12)と(2-13)で表らし、初期粒子を*i*個含むフロックの有効密度を  $\rho_{ei} = \rho_i - \rho_w$  とおくと式(2-15)の関係が得られる。

$$\frac{\pi}{6} d_i^3 = \frac{\pi}{6} d_1^3 i + V_w \text{ ----- (2-12)}$$

$$\frac{\pi}{6} d_i^3 (\rho_{ei} + \rho_w) = \frac{\pi}{6} d_1^3 i (\rho_{e1} + \rho_w) + V_w \rho_w \text{ ---- (2-13)}$$

$$\rho_{ei} = i (\rho_s - \rho_w) / (d_i/d_1)^3 \text{ ----- (2-15)}$$

式(2-15)中の*i*と( $d_i/d_1$ )は式(2-22)のようない関係にあるので、結局式(2-15)は次式のようになる。

$$\begin{aligned} \rho_{ei} &= (\rho_s - \rho_w) d_1^{0.9} d_i^{-0.9} \\ &= K' d_i^{-0.9} \text{ ----- (2-23)} \end{aligned}$$

式(2-23)はフロック密度関数と同形のものである。また、フロック構造体の物質収支式とフロック密度関数によって式(2-10)を求め、左辺と右辺を別個に計算しても良好一致を示したことから式(2-6)に対する検証がなされた。

$$1 - e = \left( \frac{ds}{d^*} \right)^{-K_p} \text{ ----- (2-10)}$$

フロック密度関数の存在が実証されたので、薬品沈殿池を設計する際に用いるフロック密度をフロック群全体について定数として扱い、粒度分布を知るのみでフロック群の沈降速度分布を求める従来の方法を用いることはできない。フロック粒子の沈降は一般にストークス領域で行なわれているので、式(2-5)と式(2-6)または式(2-8)を用いてフロックの沈降速度を表わす一般式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} w &= \frac{g}{34\mu} a^* \left( \frac{ds}{d^*} \right)^{-K_p} ds^2 = \frac{g}{34\mu} a^* (d^*)^{K_p} d_f^{2-K_p} \\ &\text{----- (2-30)} \end{aligned}$$

$d^*$ ;  $K_p$ とAL<sub>T</sub>比の関係は表(2-15)で与えられている。

$K_s$  は 1.0 ~ 1.5 と云った範囲にあるので、

$$w \propto d_s^{1.0 \sim 0.5} \text{-----} (2-31)$$

となり従来考えられていたように、ストークス領域で  $\rho_e$  を不変とした場合に粒径が2倍になれば沈降速度はその2乗である4倍になると云ったことはなく、密度の減少によって高々1.5 ~ 2倍程度にしかならない事が理解しえよう。  
式(2-30)に実験値を代入して各々のAとT比における沈降速度式を求めると次のようである。

A L T比 1 : 10では、

$$w = \frac{g}{34\mu} (1.65) \left( \frac{d_s}{2 \times 10^{-3}} \right)^{0.6} \text{ cm/sec}$$

A L T比 1 : 20では、

$$w = \frac{g}{34\mu} (1.65) \left( \frac{d_s}{1.5 \times 10^{-3}} \right)^{0.75} \text{ cm/sec}$$

A L T比 1 : (50 ~ 100) では、

$$w = \frac{g}{34\mu} (1.65) \left( \frac{d_s}{10^{-3}} \right)^{1.0} \text{ cm/sec}$$

また、著者および他の研究者のデータを整理して、有効エネルギー消費率と最大成長フロック形  $d_{max}$  の関係を求めた所、先に丹保らによって提示された関係を再び確認することができ、フロック密度関数をフロックの最大成長径を求める式に適用しえることを明らかにした。

表(2-1) フロックの含水率と  
密度の関係

| 含水率<br>$e(\%)$ | フロック密度<br>$\rho_f(g/cm^3)$ | フロック有効密度<br>$\rho_e(g/cm^3)$ |
|----------------|----------------------------|------------------------------|
| 10             | 2.50                       | 1.50                         |
| 20             | 2.32                       | 1.32                         |
| 30             | 2.18                       | 1.18                         |
| 40             | 1.99                       | 0.99                         |
| 50             | 1.83                       | 0.83                         |
| 60             | 1.66                       | 0.66                         |
| 70             | 1.50                       | 0.50                         |
| 80             | 1.33                       | 0.33                         |
| 90             | 1.17                       | 0.17                         |
| 95             | 1.08                       | 0.08                         |
| 97             | 1.05                       | 0.05                         |
| 99             | 1.017                      | 0.017                        |
| 99.5           | 1.008                      | 0.008                        |
| 99.7           | 1.005                      | 0.005                        |

表(2-2) フロック密度測定例

| 室温   | 水温   | 所要秒数 | 沈降速度  | ベローズの長さ | 倍率   | 実径(d) | $d^2$ | $(d\zeta)^2$ | $\mu$ | Re   | Se     |
|------|------|------|-------|---------|------|-------|-------|--------------|-------|------|--------|
| 10.0 | 11.0 | 23.3 | 0.214 | 8.0     | 2.55 | 169   | 28.6  | 25.6         | 1.275 | 2.8  | 0.0032 |
| "    | "    | 46.4 | 0.108 | 10.7    | 3.00 | 112   | 12.4  | 11.7         | "     | 0.94 | 0.0051 |
| "    | "    | 22.0 | 0.228 | 7.1     | 2.40 | 193   | 37.3  | 34.8         | "     | 3.4  | 0.0027 |
| "    | "    | 31.4 | 0.159 | 9.4     | 2.80 | 134   | 18.0  | 16.8         | "     | 2.2  | 0.0040 |
| "    | 10.0 | 25.8 | 0.193 | 6.8     | 2.35 | 136   | 18.6  | 17.3         | 1.310 | 1.1  | 0.0046 |
| "    | "    | 42.0 | 0.119 | 6.6     | 2.33 | 107   | 10.7  | 10.0         | "     | 0.97 | 0.0051 |
| "    | "    | 53.2 | 0.094 | 11.2    | 3.10 | 39.8  | 1.69  | 1.57         | "     | 0.21 | 0.0250 |
| "    | "    | 30.4 | 0.165 | 8.4     | 2.63 | 126   | 15.9  | 14.8         | "     | 1.6  | 0.0047 |
| "    | "    | 45.2 | 0.111 | 11.7    | 3.18 | 130   | 16.9  | 15.7         | "     | 1.1  | 0.0030 |
| "    | "    | 53.0 | 0.095 | 9.9     | 2.88 | 64.0  | 4.1   | 3.8          | "     | 0.46 | 0.0105 |
| "    | "    | 40.6 | 0.123 | 6.7     | 2.35 | 95.6  | 9.2   | 8.6          | "     | 0.90 | 0.0060 |
| "    | "    | 50.5 | 0.099 | 9.4     | 2.80 | 60.8  | 3.7   | 3.5          | "     | 0.46 | 0.0120 |

表(2-3) フロック密度測定例

|      |      |      |       |      |      |      |      |      |       |      |        |
|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|-------|------|--------|
| 17.0 | 16.5 | 21.5 | 0.232 | 7.4  | 2.44 | 205  | 42.0 | 39.1 | 1.110 | 4.34 | 0.0023 |
| "    | "    | 31.5 | 0.160 | 8.8  | 2.68 | 179  | 32.0 | 29.8 | "     | 2.61 | 0.0021 |
| "    | "    | 44.3 | 0.114 | 7.8  | 2.50 | 94.0 | 8.83 | 8.21 | "     | 0.98 | 0.0054 |
| "    | "    | 43.6 | 0.112 | 8.5  | 2.63 | 81.7 | 6.69 | 6.22 | "     | 0.84 | 0.0069 |
| "    | "    | 59.1 | 0.085 | 9.1  | 2.73 | 78.8 | 6.20 | 5.76 | "     | 0.61 | 0.0057 |
| 16.5 | "    | 23.0 | 0.217 | 8.6  | 2.65 | 234  | 54.9 | 51.0 | "     | 4.62 | 0.0016 |
| "    | "    | 39.2 | 0.128 | 7.5  | 2.45 | 97.9 | 9.60 | 8.95 | "     | 1.14 | 0.0055 |
| "    | "    | 46.7 | 0.107 | 10.3 | 2.95 | 90.0 | 8.10 | 7.55 | "     | 0.88 | 0.0055 |
| "    | "    | 69.0 | 0.073 | 9.7  | 2.84 | 60.0 | 3.60 | 3.35 | "     | 0.40 | 0.0083 |
| "    | "    | 25.5 | 0.196 | 8.7  | 2.66 | 188  | 35.2 | 32.8 | "     | 3.36 | 0.0023 |
| "    | "    | 39.9 | 0.125 | 8.8  | 2.68 | 155  | 24.0 | 22.3 | "     | 1.77 | 0.0022 |
| "    | "    | 83.6 | 0.060 | 10.0 | 2.89 | 46.7 | 2.18 | 2.02 | "     | 0.25 | 0.0114 |

- 室温 : 北大工学部衛生工学科水処理実験室の温度(°C)  
 水温 : 使用原水の水温(°C)  
 所要秒数 : フロックがシリンダー中を5cm沈降するのに要する秒数(sec)  
 沈降速度 : (cm/sec)  
 接写ベローズ長 : (cm)  
 倍率 : 接写ベローズ長-倍率直線より求めた最も多フロックの倍率  
 実径(d) :  $d_{avg}$  フロックの測定径( $\times 10^{-3}$ cm)  
 $\zeta$  :  $d_s/d_{avg}$   $\psi=0.847$ に対しては  $\zeta=0.965$   
 $d_s$  : 等価球径( $\times 10^{-3}$ cm)  
 $(d\zeta)^2$  : ( $\times 10^{-2}$ cm<sup>2</sup>)  
 $\mu$  : 使用原水の絶対粘性係数( $\times 10^{-2}$ g/cm $\cdot$ sec)  
 $Se$  : フロック有効密度(g/cm<sup>3</sup>)

表(2-4) 形状係数と  $ds/davg$  の関係

| 形                       | 形状係数( $\psi$ ) | $\xi = ds/davg$ |
|-------------------------|----------------|-----------------|
| 球                       | 1.00           | 1.00            |
| 正八面体                    | 0.847          | 0.965           |
| 正六面体                    | 0.806          | 1.24            |
| 角柱                      |                |                 |
| $a \times a \times 2a$  | 0.767          | 1.564           |
| $a \times 2a \times 2a$ | 0.761          | 0.985           |
| $a \times 2a \times 3a$ | 0.725          | 1.127           |
| 円柱                      |                |                 |
| $h = 2r$                | 0.874          | 1.135           |
| $h = 3r$                | 0.860          | 1.31            |
| $h = 10r$               | 0.691          | 1.96            |
| $h = 20r$               | 0.580          | 2.592           |
| $h = 1.22r$             | 0.858          | 1.00            |
| 円盤                      |                |                 |
| $h = r$                 | 0.827          | 0.909           |
| $h = r/3$               | 0.594          | 0.630           |
| $h = r/10$              | 0.323          | 0.422           |
| $h = r/15$              | 0.254          | 0.368           |

表(2-5) 自家用水道水の水質

| 項目       | 分析値     | 項目          | 分析値       |
|----------|---------|-------------|-----------|
| 水温       | 11°C    | $Ca^{2+}$   | 42.9      |
| pH       | 6.9     | $Mg^{2+}$   | 25.7      |
| S-Re     | 257     | $Cl^-$      | 38.0      |
| $NH_4-N$ | 0.01 以下 | $SO_4^{2-}$ | 35.0      |
| $NO_2-N$ | 0.01 以下 | M-アルカリ度     | 1.97 me/l |
| $NO_3-N$ | 3.95    | $SiO_2$     | 34.7 me/l |
| $Na^+$   | 21.4    | $Mn^{2+}$   | 0.01 以下   |
| $K^+$    | 4.6     | Fe (total)  | 0.08      |

表(2-6) 実験の組み合わせ

| 白陶土(カオリン)濃度<br>ppm | 硫酸アルミニウム注入率 <sup>*</sup> $[Al(SO_4)_3 \cdot 18H_2O]$ ppm |
|--------------------|----------------------------------------------------------|
| 500                | 100 , 300 , 500                                          |
| 150                | 80                                                       |
| 50                 | 10 , 37 , 50                                             |
| 30                 | 15                                                       |
| 20                 | 10 , 20                                                  |

\* Al量に換算するには  $\frac{54}{664} = 0.081$  をかけると良い。

表(2-7) 実験の組み合わせ

| 白陶土(カオリン)濃度<br>ppm | ポリ塩化アルミニウム注入率 $[Al]$ ppm |
|--------------------|--------------------------|
| 1000               | 1000 , 60 , 20 , 10      |
| 500                | 50 , 30 , 10             |
| 150                | 15 , 8 , 1.5             |
| 50                 | 5 , 3 , 0.5              |
| 20                 | 1                        |

表(2-8) ALT比 = 1/20

| 白陶土濃度 ppm | アルミニウム濃度 <sup>*</sup><br>$[Al]$ ppm | pH        | 図中の記号 |
|-----------|-------------------------------------|-----------|-------|
| 20        | 0.80                                | 8.0       | ■     |
| 30        | 1.30                                | 8.0       | ⊙     |
| 50        | 2.50                                | 7.0 ~ 9.0 | ●     |
| 150       | 6.70                                | 8.0       | △     |
| 500       | 25                                  | 8.0       | □     |

\* 硫酸アルミニウム量は12をかけて得られる。

表(2-9) ALT比  $\div 1/12$

| 白陶土濃度 ppm | アルミニウム濃度 [Al] ppm | pH       | 図中の記号 |
|-----------|-------------------|----------|-------|
| 50        | 0.5               | 6.0~10.0 | ●     |
| 150       | 1.5               | 6.0~10.0 | ■     |
| 500       | 5                 | 7.0      | ⊙     |
| 1000      | 10                | 7.0      | ◎     |

表(2-10) ALT比  $\div 1/60$

| 白陶土濃度 ppm | アルミニウム濃度 [Al] ppm | pH       | 図中の記号 |
|-----------|-------------------|----------|-------|
| 20        | 1                 | 6.0~10.0 | ◻     |
| 50        | 3                 | 6.0~10.0 | ○     |
| 150       | 8                 | 6.0~9.0  | ◎     |
| 500       | 30                | 7.0      | □     |
| 1000      | 60                | 7.0      | △     |

表(2-11) ALT比  $\div 1/10$

| 白陶土濃度 ppm | アルミニウム濃度 [Al] ppm | pH  | 図中の記号 |
|-----------|-------------------|-----|-------|
| 50        | 1                 | 7.0 | ●     |
| 500       | 10                | 7.0 | ■     |
| 1000      | 20                | 7.0 | △     |

表(2-12) ALT比  $\div 1/100$

| 白陶土濃度 ppm | アルミニウム濃度<br>[Al] ppm | pH      | 図中の記号      |
|-----------|----------------------|---------|------------|
| 20        | 1.67                 | 8.0     | $\Delta$   |
| 50        | 4.17                 | 7.0~9.0 | $\bigcirc$ |
| 500       | 41.7                 | 8.0     | $\square$  |

表(2-13) ALT比  $\div 1/20$

| 白陶土濃度 ppm | アルミニウム濃度<br>[Al] ppm | pH  | 図中の記号          |
|-----------|----------------------|-----|----------------|
| 50        | 0.83                 | 8.0 | $\odot$        |
| 500       | 8.3                  | 8.0 | $\blacksquare$ |

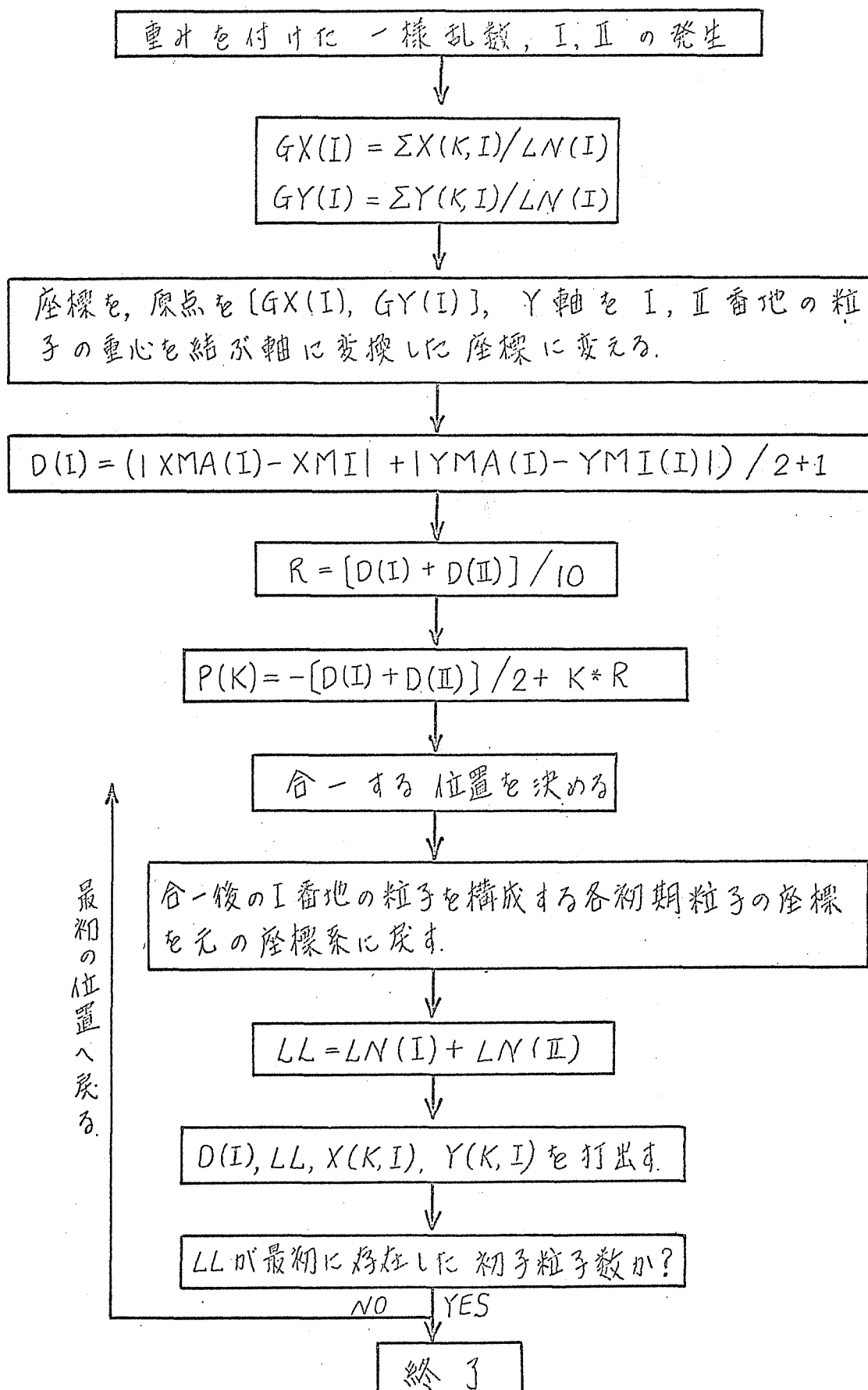
表(2-14) ALT比  $\div 1/50$

| 白陶土濃度 ppm | アルミニウム濃度<br>[Al] ppm | pH       | 図中の記号      |
|-----------|----------------------|----------|------------|
| 50        | 5                    | 6.0~10.0 | $\Delta$   |
| 150       | 15                   | 6.0~10.0 | $\bigcirc$ |
| 500       | 50                   | 7.0      | $\odot$    |
| 1000      | 100                  | 7.0      | $\square$  |

表(2-15) A L T 比と  $d^*$  の関係

| A L T 比    | K $\beta$ | $a_0(\frac{g}{cm^3})$ | $d^*(cm)$           |
|------------|-----------|-----------------------|---------------------|
| 0          | 0.9       | $1.45 \times 10^{-3}$ | $4 \times 10^{-4}$  |
| 1:(50~100) | 1.0~1.1   | $2 \times 10^{-3}$    | $10 \times 10^{-4}$ |
| 1:20       | 1.2~1.3   | $5 \times 10^{-3}$    | $15 \times 10^{-4}$ |
| 1:10       | 1.4~1.5   | $3 \times 10^{-3}$    | $20 \times 10^{-4}$ |

表(2-16) フローチャート



表(2-17) モデルフロックシミュレーションのプログラム

```

C      MODEL FLOC SIMULATION
      DIMENSION X(120,120),Y(120,120),LN(200,200),GX(200),
           GY(200),GGX(200),GGY(200),P(20),D(200),XMI(200),
           XMA(200),YMI(200),YMA(200),IK(200),IIK(200)
      N=0
      NN=0
8     J=0
      DO 9 I=1+NN,10+NN
      J=J+1
      X(1,I)=J*100
      Y(1,I)=(NN/10+1)*100
      LN(I)=1
9     CONTINUE
      NN=NN+10
      IF(NN+90) 8,8,410
410   MM=0
      READ(5,10)(IK(L),IIK(L),L=1,200)
10    FORMAT(16I5)
500   MM=MM+1
      J=IK(MM)
      JJ=IIK(MM)
      IN=0
11    L=0
      IN=IN+1
      IQ=0
12    L=L+1
      IF(L+1) 13,14,13
13    IQ=IQ+LN(L+1)
14    IIQ=IQ+LN(L)
      IF(J-IQ) 12,12,15
15    IF(IIQ-J) 12,16,16
16    IF(IN-2) 17,18,17
17    I=L
      J=JJ
      GO TO 11
18    II=L
      IF(I-II) 19,500,19
19    IF(LN(I)*LN(II)) 500,500,23
23    M=1
24    GXX=0
      GYY=0
      DO 30 K=1,LN(M)
      GXX=GXX+X(K,M)
      GYY=GYY+Y(K,M)
30    CONTINUE
      V=LN(M)
      GX(M)=GXX/V
      GY(M)=GYY/V
      IF(M-II) 40,50,40
40    M=II
      GO TO 24
50    R=((GX(I)-GX(II))**2+(GY(I)-GY(II))**2)**0.5
      S=(GY(II)-GY(I))/R
      C=(GX(II)-GX(I))/R
      GGX(I)=0

```

```

      GGY(I)=0
      M=I
55  DO 60 K=1, LN(M)
      XX=X(K,M)
      YY=Y(K,M)
      X(K,M)=(XX-GX(I)) *C+(YY-GY(I)) *S
      Y(K,M)=(YY-GY(I)) *C-(XX-GX(I)) *S
60  CONTINUE
      IF(M-II) 70,80,70
70  M=II
      GGX(M)=(GX(M)-GX(I))*C+(GY(M)-GY(I)) *S
      GGY(M)=0
      GO TO 55
80  M=1
      XMI(M)=YMI(M)=1.E20
      XMA(M)=YMA(M)=0
      DO 220 K=1, LN(M)
      IF(XMA(M)-X(K,I)) 86,86,90
90  XMI(M)=X(K,M)
86  IF(XMA(M)-X(K,M)) 130,87,87
130 XMA(M)=X(K,M)
87  IF(YMI(M)-Y(K,M)) 88,88,170
170 YMI(M)=Y(K,M)
88  IF(YMA(M)-Y(K,M)) 210,220,220
210 YMA(M)=Y(K,M)
220 CONTINUE
      IF(M-II) 225,230,225
225 M=II
      GO TO 85
230 D(I)=(ABS(XMA(I)-XMI(I))+ABS(YMA(I)-YMI(I)))/2.+1.
      D(II)=(ABS(XMA(II)-XMI(II))+ABS(YMA(II)-YMI(II)))/2.+1.
      T=D(I)+D(II)
      R=T/10.
      DO 240 K=1,10
      Q=K
      P(K)=-T/2.+Q*R
240 CONTINUE
      H=RANDOM(0)
      LM=(H+0.1)*10.
      U=(T/2.)**2
      V=-P(LM)/GGX(II)
      W=P(LM)
      A=1.+V**2
      B=V*W
      G=W**2-U
      ZX=(-B+(B**2-A*G)**0.5)/A
      ZY=V*ZX+P(LM)
      DX=ZX-GGX(II)
      DY=ZY
      LI=LN(I)+1
      LL=LN(I)+LN(II)
      DO 260 K=LI,LL
      KI=K-LN(I)
      X(K,I)=X(KI,II)+DX
      Y(K,I)=Y(KI,II)+DY
260 CONTINUE
265 A=GX(I)*S-GY(I)*C
      B=GX(I)*C+GY(I)*S
      DO 270 K=1,LL

```

```

      XX=X(K,I)
      YY=Y(K,I)
      X(K,I)=(XX+B)*C+(A-YY)*S
      Y(K,I)=(YY-A)*C+(B+XX)*S
270  CONTINUE
      XMI(I)=YMI(I)=1.E20
      XMA(I)=YMA(I)=0
      DO 340 K=1,LL
        IF(XMI(I)-X(K,I))280,280,275
275  XMI(I)=X(K,I)
280  IF(XMA(I)-X(K,I))290,300,300
290  XMA(I)=X(K,I)
300  IF(YMI(I)-Y(K,I))320,320,310
310  YMI(I)=Y(K,I)
320  IF(YMA(I)-Y(K,I))330,340,340
330  YMA(I)=Y(K,I)
340  CONTINUE
      D(I)=(ABS(XMA(I)-XMI(I))+ABS(YMA(I)-YMI(I)))/2.+1.
      WRITE (6,350) I,LL,D(I),GX(I),GY(I),(X(K,I),Y(K,I),
        K=1,LL)
350  FORMAT(1H0//2(15),F8.2,2(E12.4)/(5(E12.4,E12.4)))
      LN(I)=LL
      LN(II)=0
395  N=N+1
      IF(N-100) 500,400,400
400  STOP
      END

```

表(2-16)と(2-17)の記号の説明.

I番地とII番地の粒子の衝突が起こる場合にフローチャート, プログラムで用いられる記号は次のとおりである.

$[X(K, I), Y(K, I), K=1, LN(I)]$ : I番地の粒子が  $LN(I)$  個の初期粒子の集合体であり, それぞれの座標が  $[X(K, I), Y(K, I)]$  で表わされる.

$[GX(I), GY(I)]$ : I番地の粒子集合体 (フロック) の重心の座標

$D(I)$ : I番地の粒子の平均直径

$P(K)$ : 乱数  $K$  で決定されるII番地の粒子の移動方向

$XMA(I), YMA(I)$ : I番地にある初期粒子の中の最大の  $X, Y$  座標

$XMI(I), YMI(I)$ : I番地にある初期粒子の中の最小の  $X, Y$  座標

$DX, DY$ : II番地の粒子がI番地の粒子と合一するために移動する  $X, Y$  座標の距離

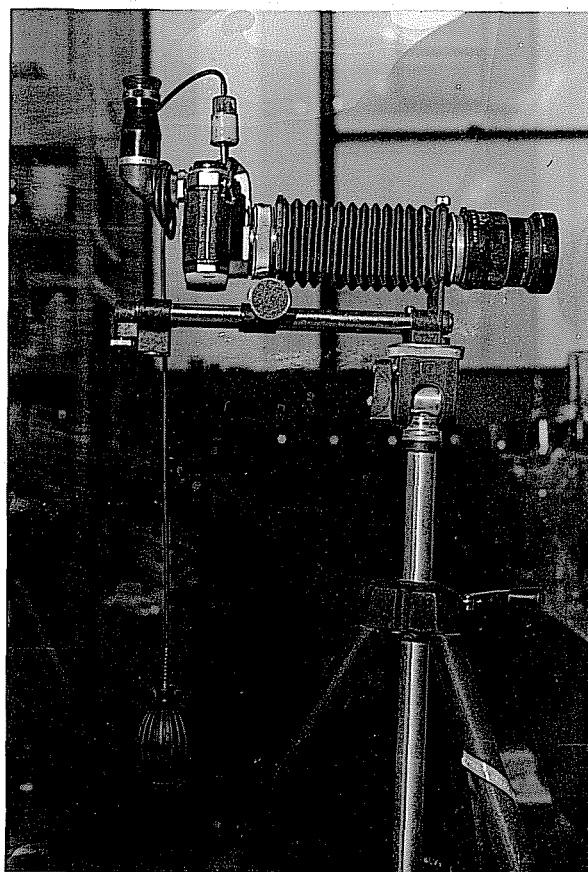
$LL$ : 合一後のI番地の粒子に集合している初期粒子数. II番地においては番号IをIIに変えると上記の記号がそのまま使用できる.

表(2-18) 計算結果の1例

| 29         | 37         | 10.61      | 0.8996E 03 | 0.3008E 03 |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.9000E 03 | 0.3000E 03 | 0.8989E 03 | 0.3011E 03 | 0.8998E 03 |
| 0.8906E 03 | 0.3058E 03 | 0.8924E 03 | 0.3053E 03 | 0.8902E 03 |
| 0.8979E 03 | 0.3011E 03 | 0.8914E 03 | 0.2997E 03 | 0.8980E 03 |
| 0.8964E 03 | 0.3045E 03 | 0.8917E 03 | 0.3051E 03 | 0.8926E 03 |
| 0.8937E 03 | 0.3050E 03 | 0.8945E 03 | 0.3044E 03 | 0.8963E 03 |
| 0.8928E 03 | 0.3019E 03 | 0.8955E 03 | 0.3014E 03 | 0.8932E 03 |
| 0.8946E 03 | 0.3014E 03 | 0.8956E 03 | 0.3015E 03 | 0.8952E 03 |
| 0.8998E 03 | 0.3030E 03 | 0.8991E 03 | 0.3037E 03 |            |

凡 例

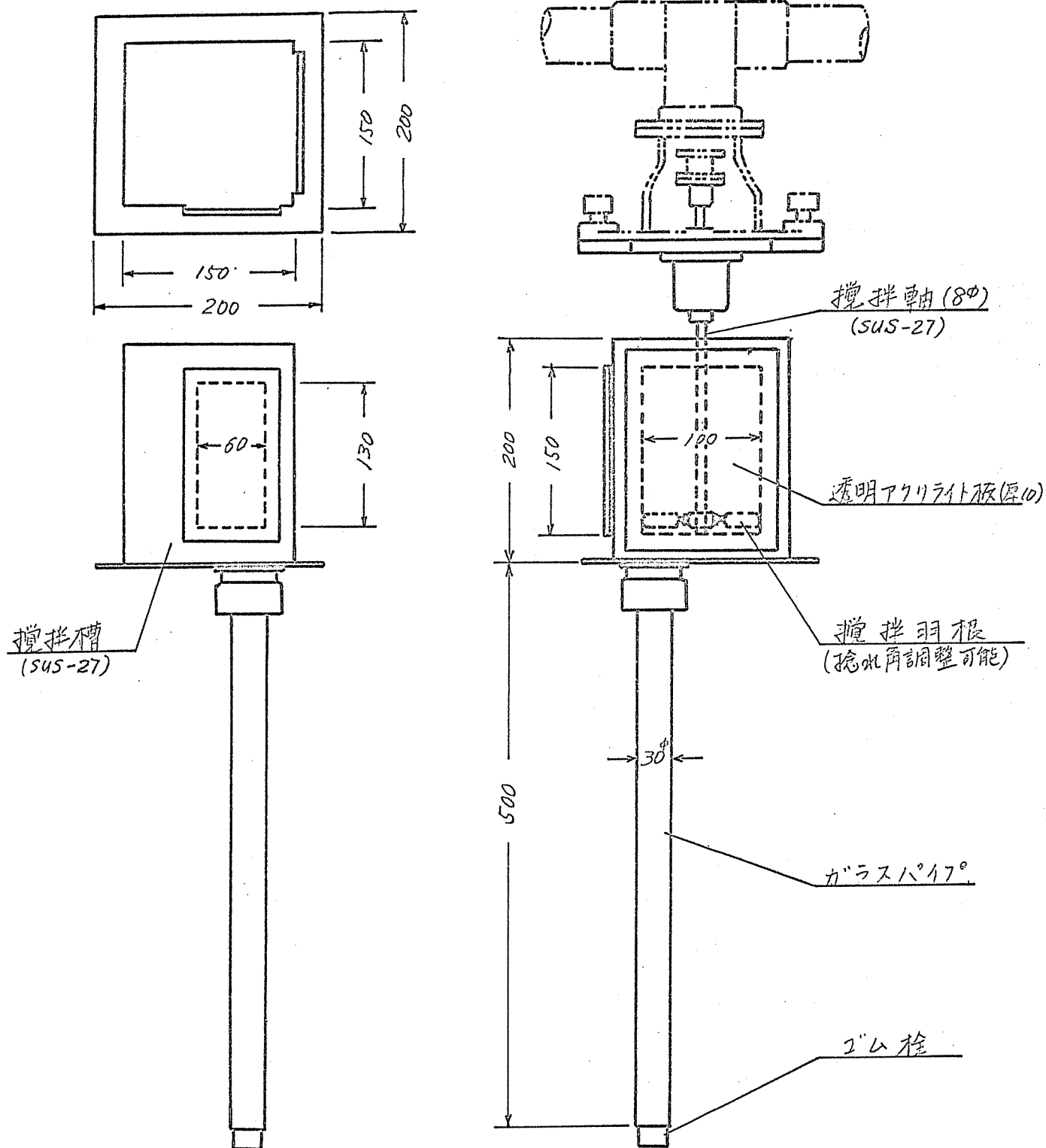
29 席地, 初期粒子集合数37個, フロック相対径10.61, 合一前の重心の座標 [ $X=0.8996 \times 10^3$ ,  $Y=0.3008 \times 10^3$ ]  
 $[X_1=0.9000 \times 10^3$ ,  $Y_1=0.3000 \times 10^3]$ ,  $[X_2=0.8989 \times 10^3$ ,  $Y_2=0.3011 \times 10^3]$ .....  
 $[X_6=0.8906 \times 10^3$ ,  $Y_6=0.3058 \times 10^3]$ ,  $[X_7=0.8924 \times 10^3$ ,  $Y_7=0.3053 \times 10^3]$ .....



写真(2-1) フロック密度測定用カメラ

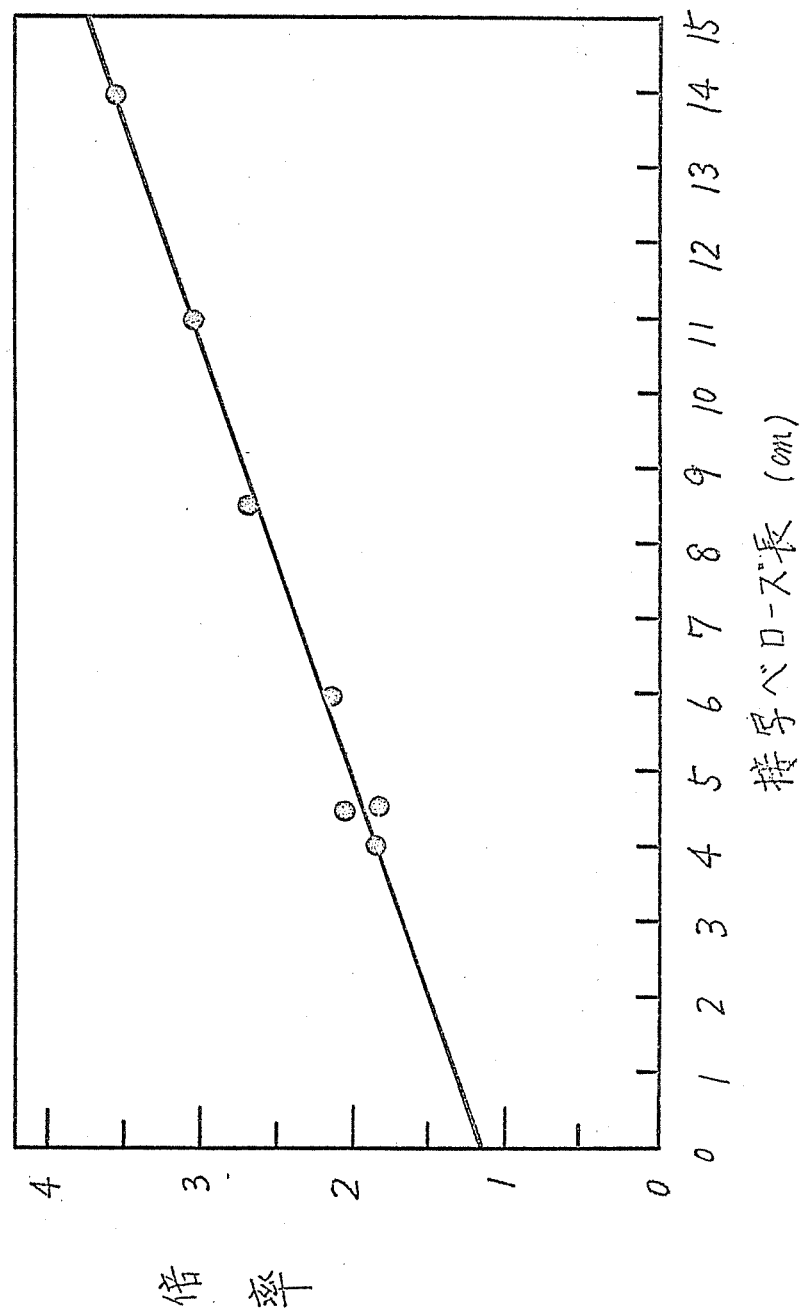
表(2-19) フロック強度指標  $f(\sigma_i)$  と フロック比強度  $\sigma_i/\sigma_0$

| I                               |      |     | II                  |          | III                           | IV            | V                   |
|---------------------------------|------|-----|---------------------|----------|-------------------------------|---------------|---------------------|
| 硫酸アルミニウム 40ppm                  |      |     | $f_e$ の関係           |          | $d_{max}$<br>( $S_i=201ppm$ ) | $f(\sigma_i)$ | $\sigma_i/\sigma_0$ |
| 補助剤                             | ALT比 | PH  | $a_i$               | $K_{Si}$ |                               |               |                     |
| なし                              | 1:30 | 9.2 | $8 \times 10^{-4}$  | 1.17     | 0.064                         | 6.83          | 1                   |
| アルギン酸 $7-9 \frac{1}{1} ppm$     | 1:30 | 9.3 | $11 \times 10^{-4}$ | 1.18     | 0.093                         | 13.38         | 1.96                |
| 活性ケイ酸 1ppm                      | 1:30 | 8.9 | $50 \times 10^{-4}$ | 1.32     | 0.090                         | 16.72         | 2.46                |
| 了工フロック 0.2ppm                   | 1:30 | 9.3 | $21 \times 10^{-4}$ | 0.97     | 0.245                         | 160.1         | 23.3                |
| PAC 40ppm<br>(硫酸アルミニウム)<br>(複算) | 1:30 | 9.3 | $8 \times 10^{-4}$  | 1.17     | 0.092                         | 18.71         | 2.74                |

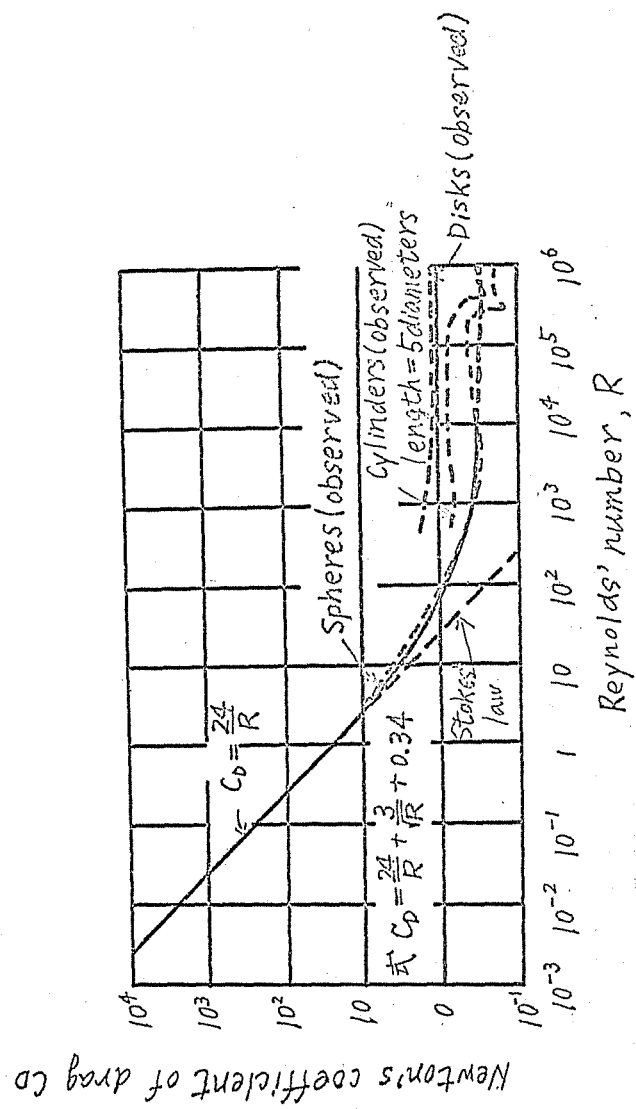


図(2-1) フロック密度測定装置

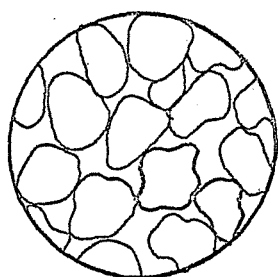
(縮尺 1/5, 単位 mm)



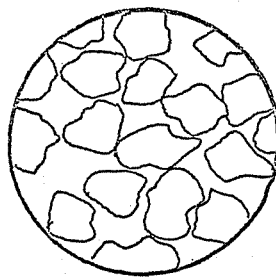
図(2-2) 接写ベロ-ズ長と撮影倍率の関係



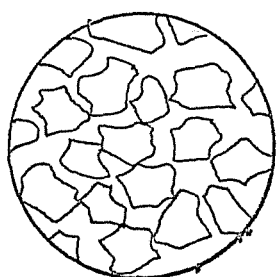
図(2-3) レイノルズ数と抵抗係数の関係



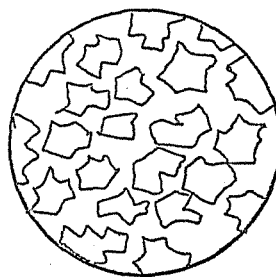
$$\psi = 0.94$$



$$\psi = 0.81$$

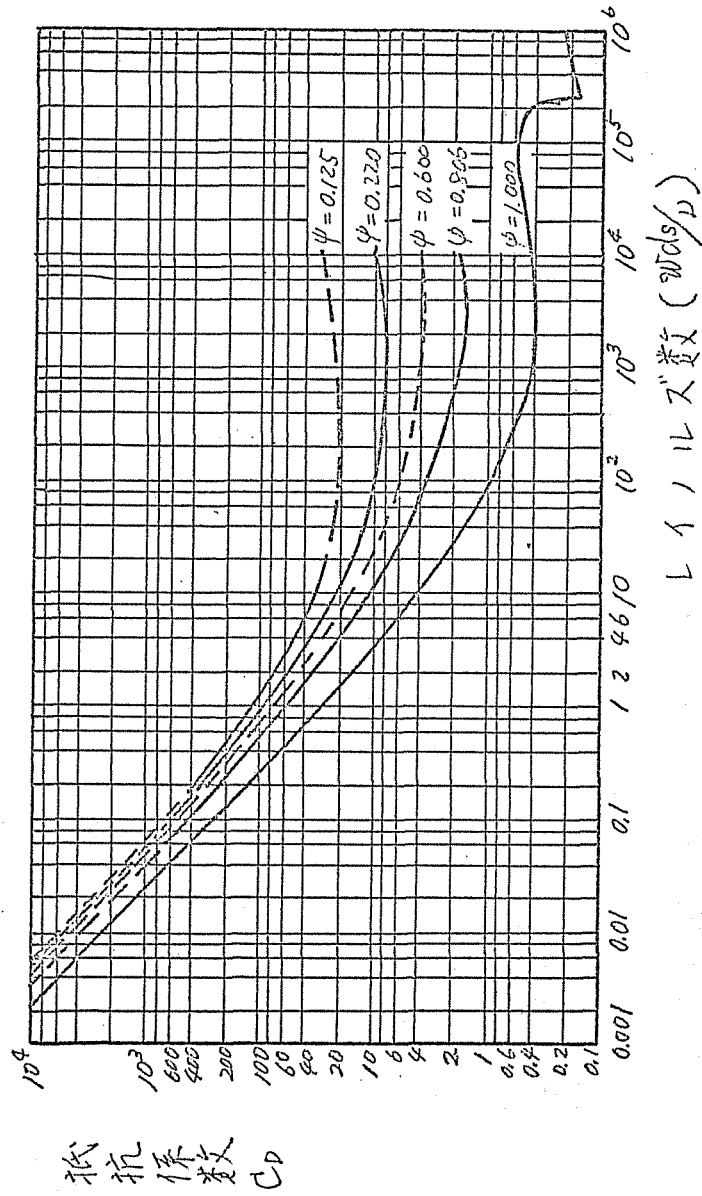


$$\psi = 0.78$$

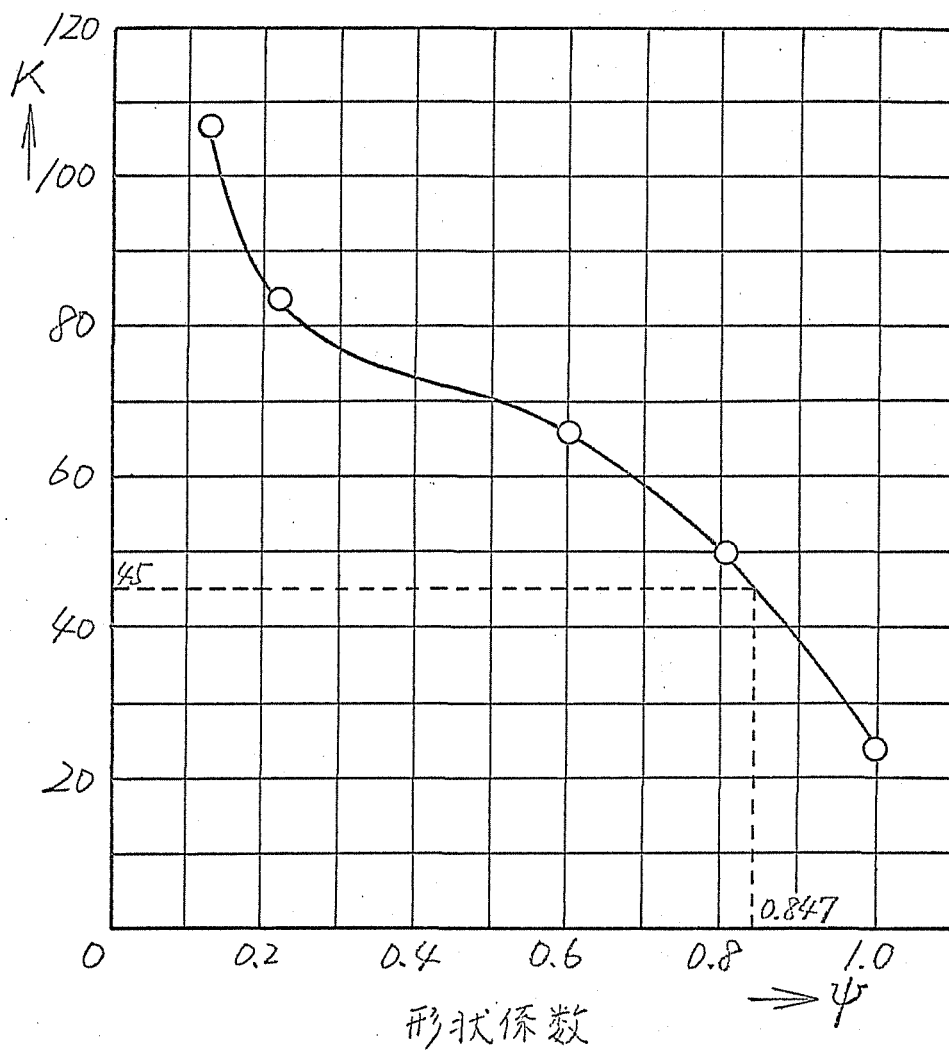


$$\psi = 0.70$$

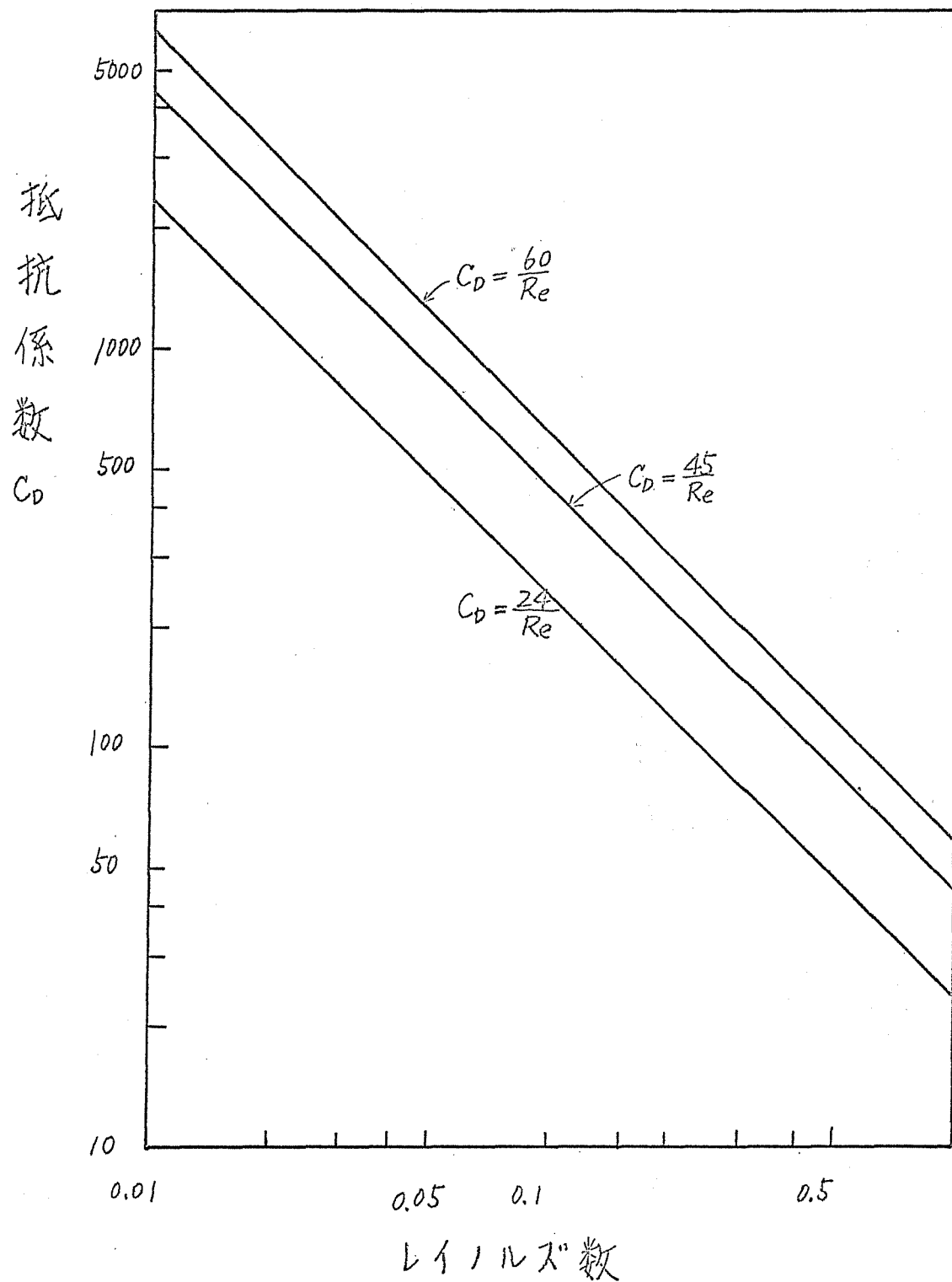
図(2-4) 粒形と形状形数( $\psi$ )



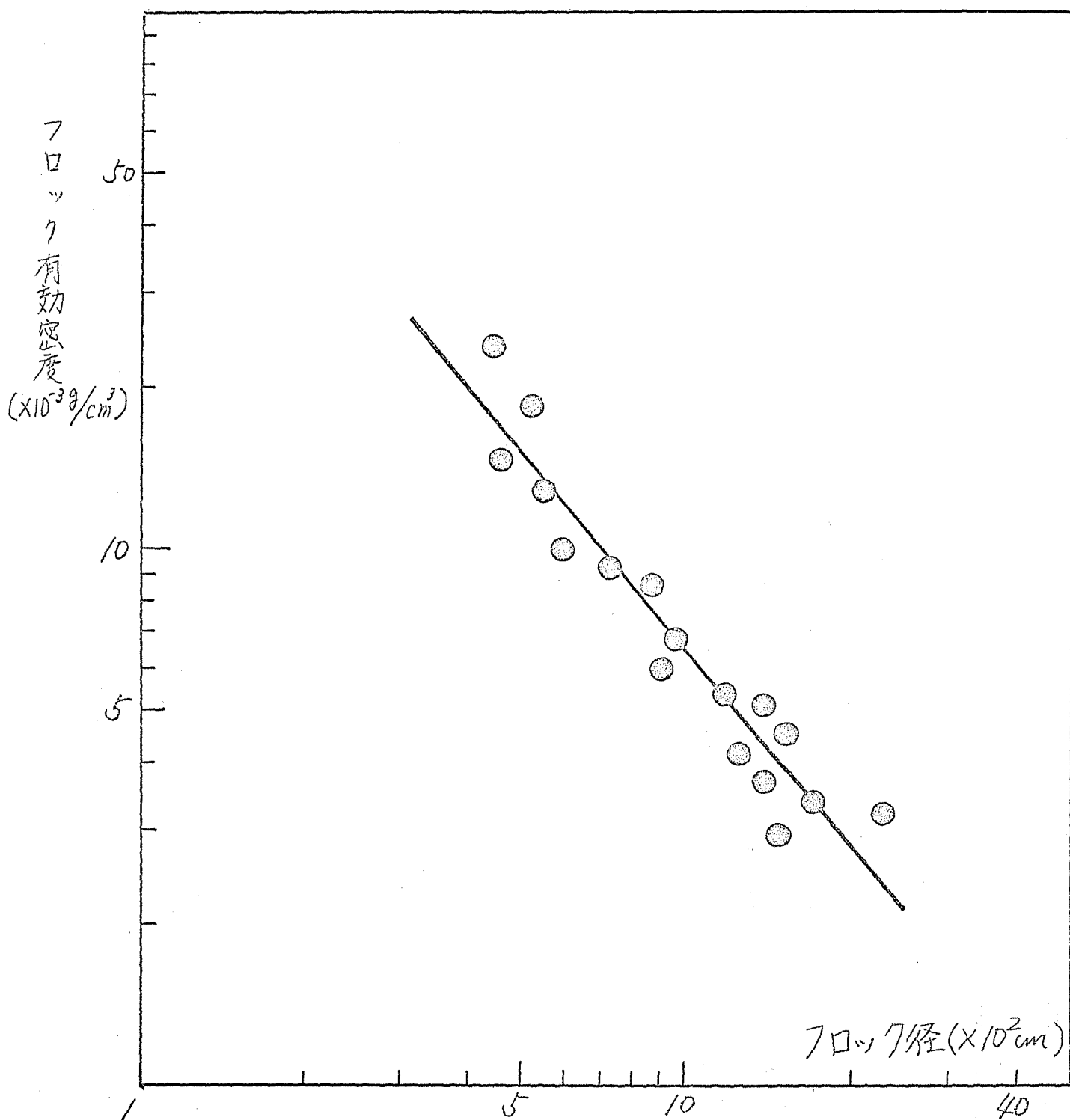
図(2-5) 種々の形状係数でのレイノルズ数と抵抗係数の関係



図(2-6) 形状係数とKの関係

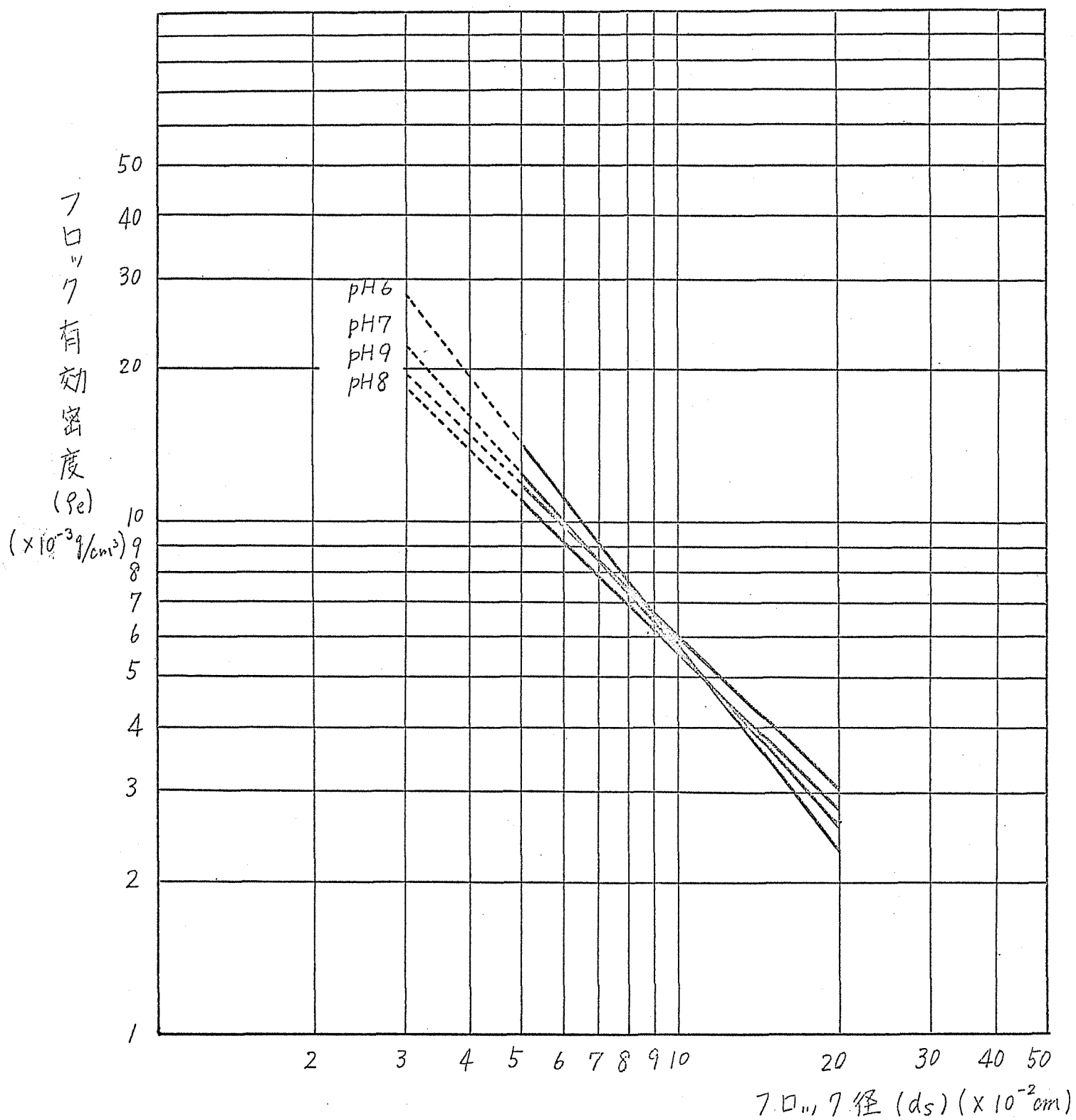


図(2-7) ストークス領域におけるレイノルズ数と抵抗係数の関係



濁度 50 ppm, PAC 2 ppm, pH 7

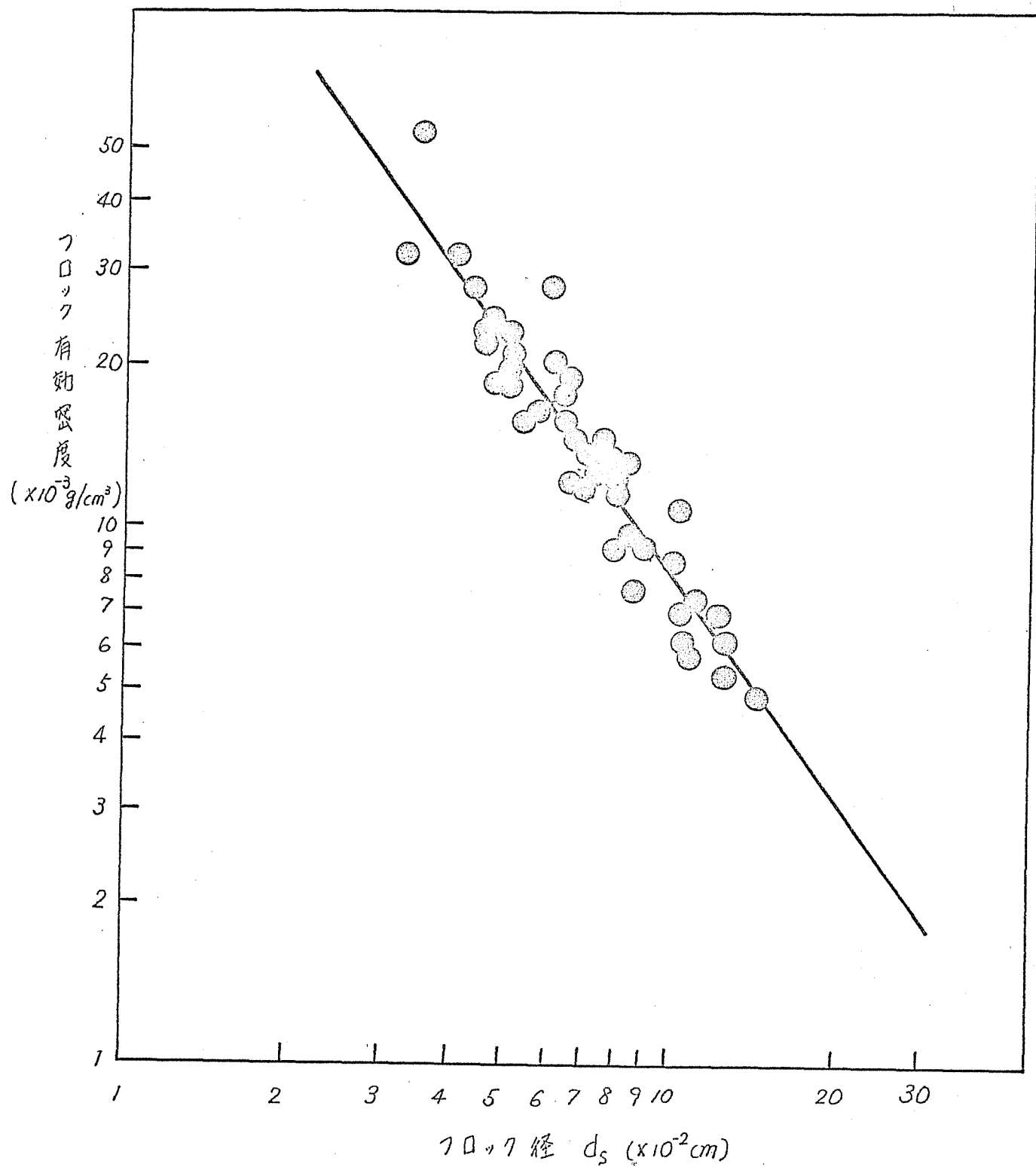
図(2-8) フロック径とフロック有効密度の関係



フロック密度関数のプロット

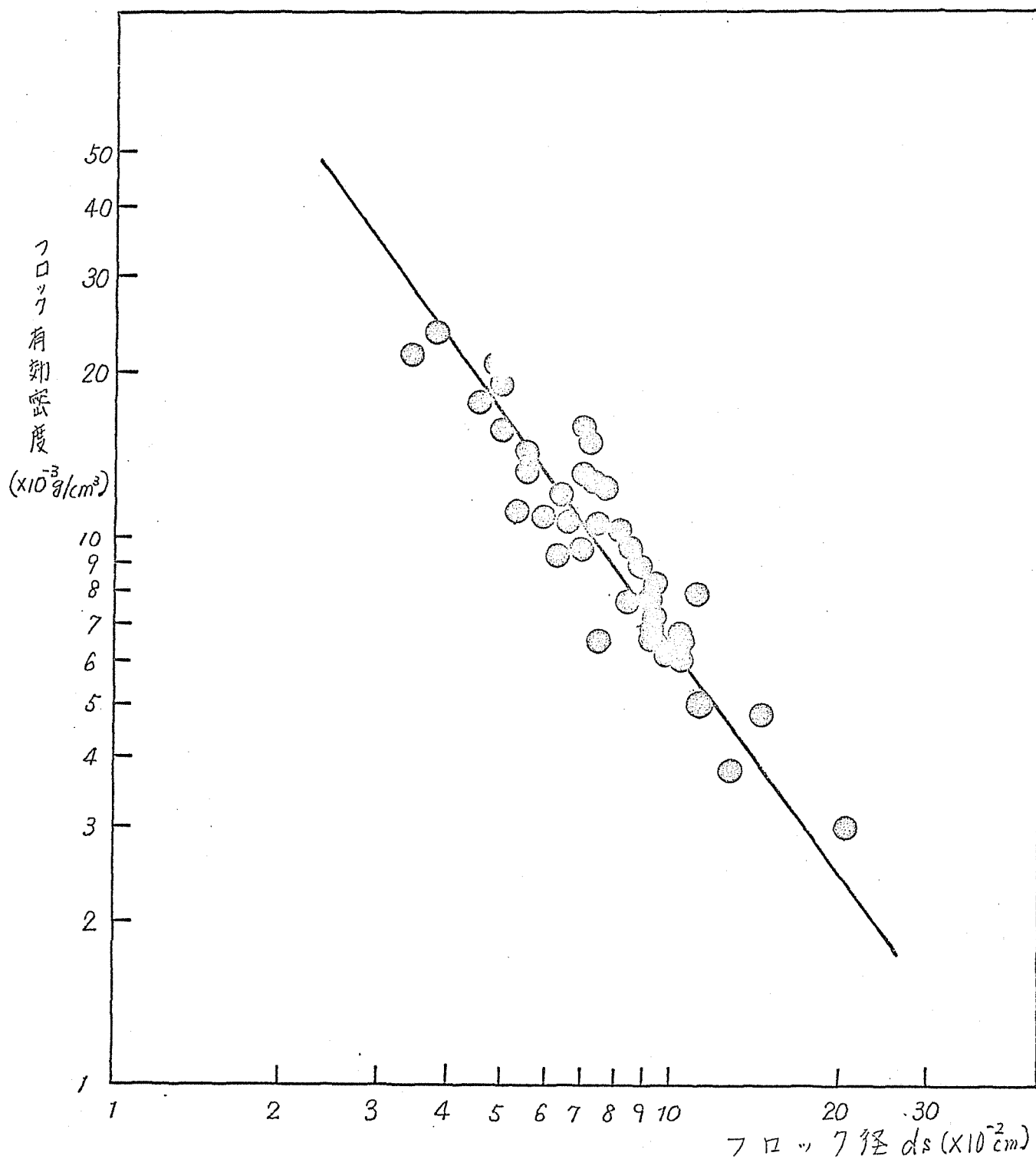
(濁度 20ppm・ポリ塩化アルミニウム 1ppm)

図(2-9) フロック密度に対する凝集pHの影響



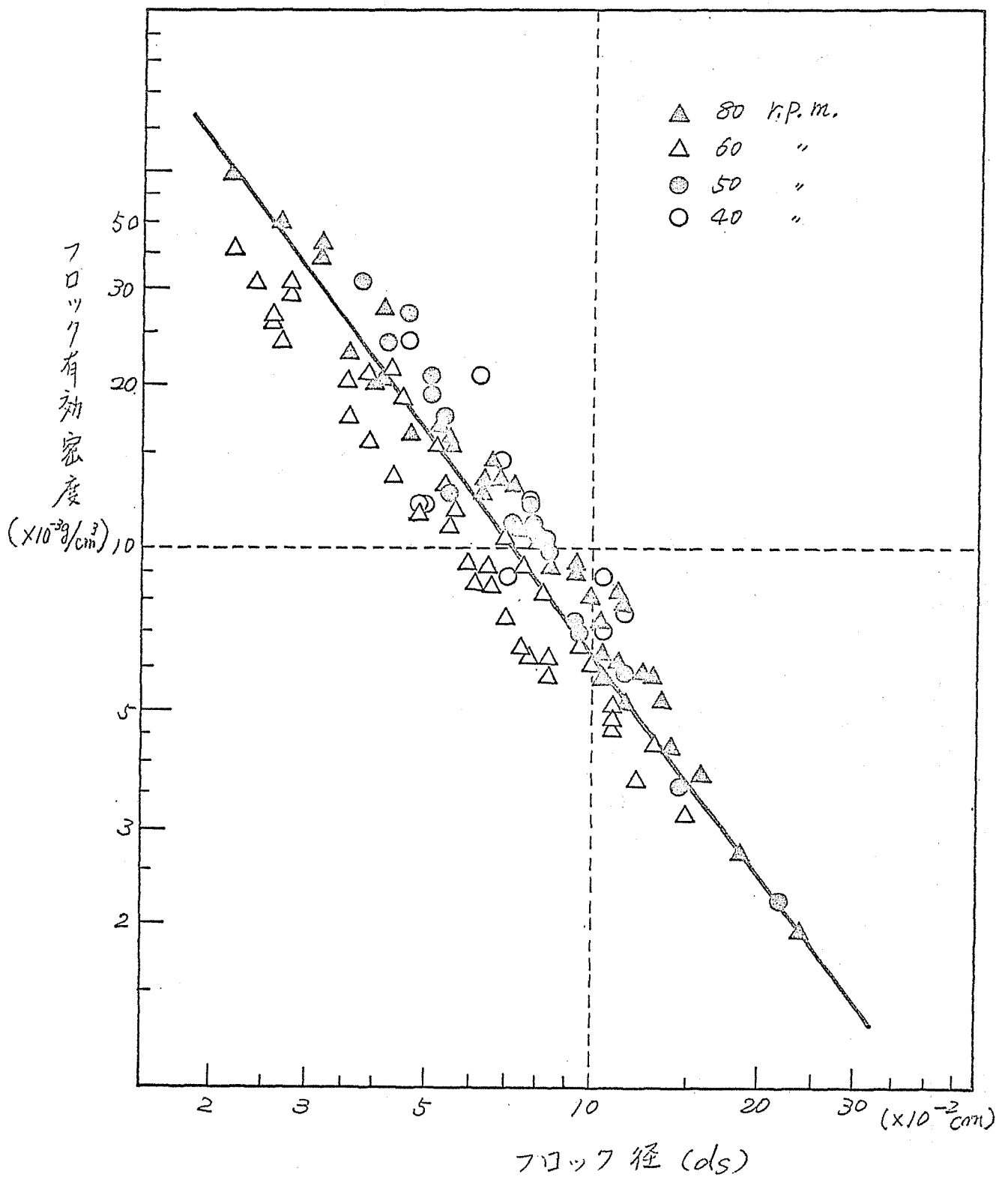
図(2-10) フロック密度 $\kappa$ 及ぼす凝集 $\text{pH}$ の影響

(濁質濃度 50 ppm, 硫酸アルミニウム 30 ppm の)  
 $\text{pH} = 7.0 \sim 9.0$  の測定値をまとめたもの

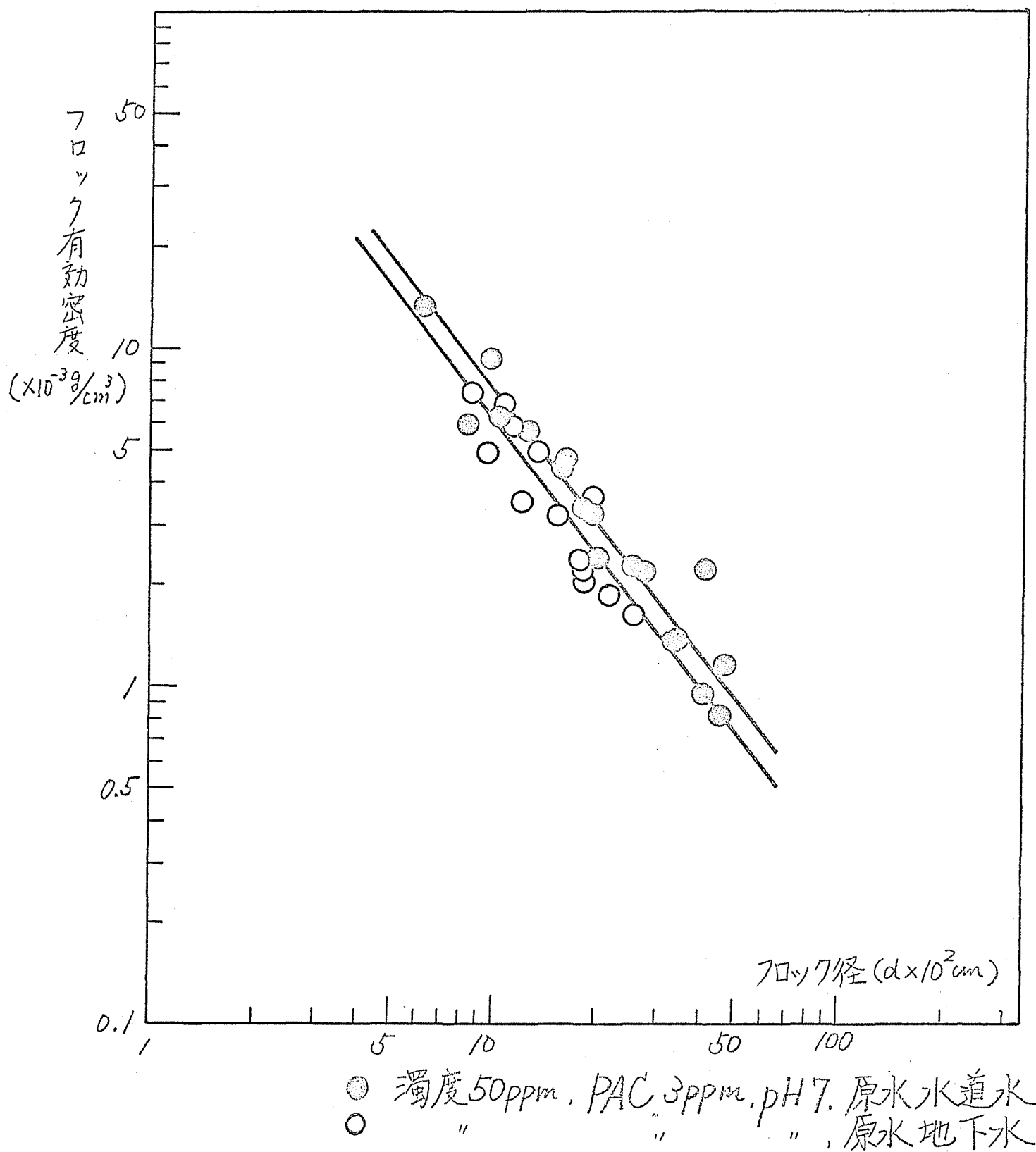


図(2-11) フロック密度に及ぼす凝集 pH の影響

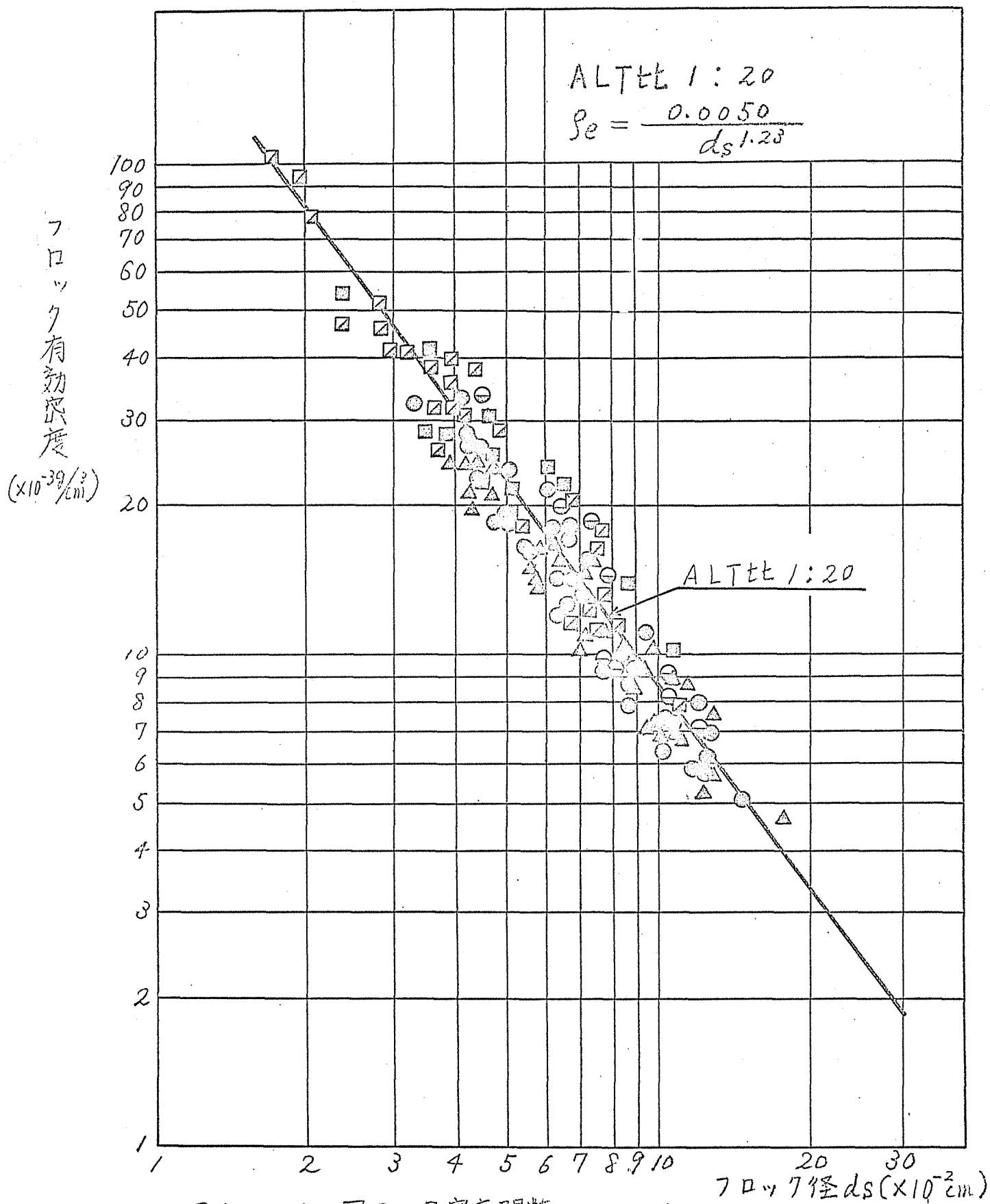
(濁質濃度 50ppm, 硫酸アルミニウム 40ppm の)  
pH=7.0 ~ 9.0 の測定値をまとめたもの



図(2-12) フロック密度関数に及ぼす攪拌強度の影響  
(濃度 50 p.p.m., 硫酸アルミニウム 30 ppm, pH 8)

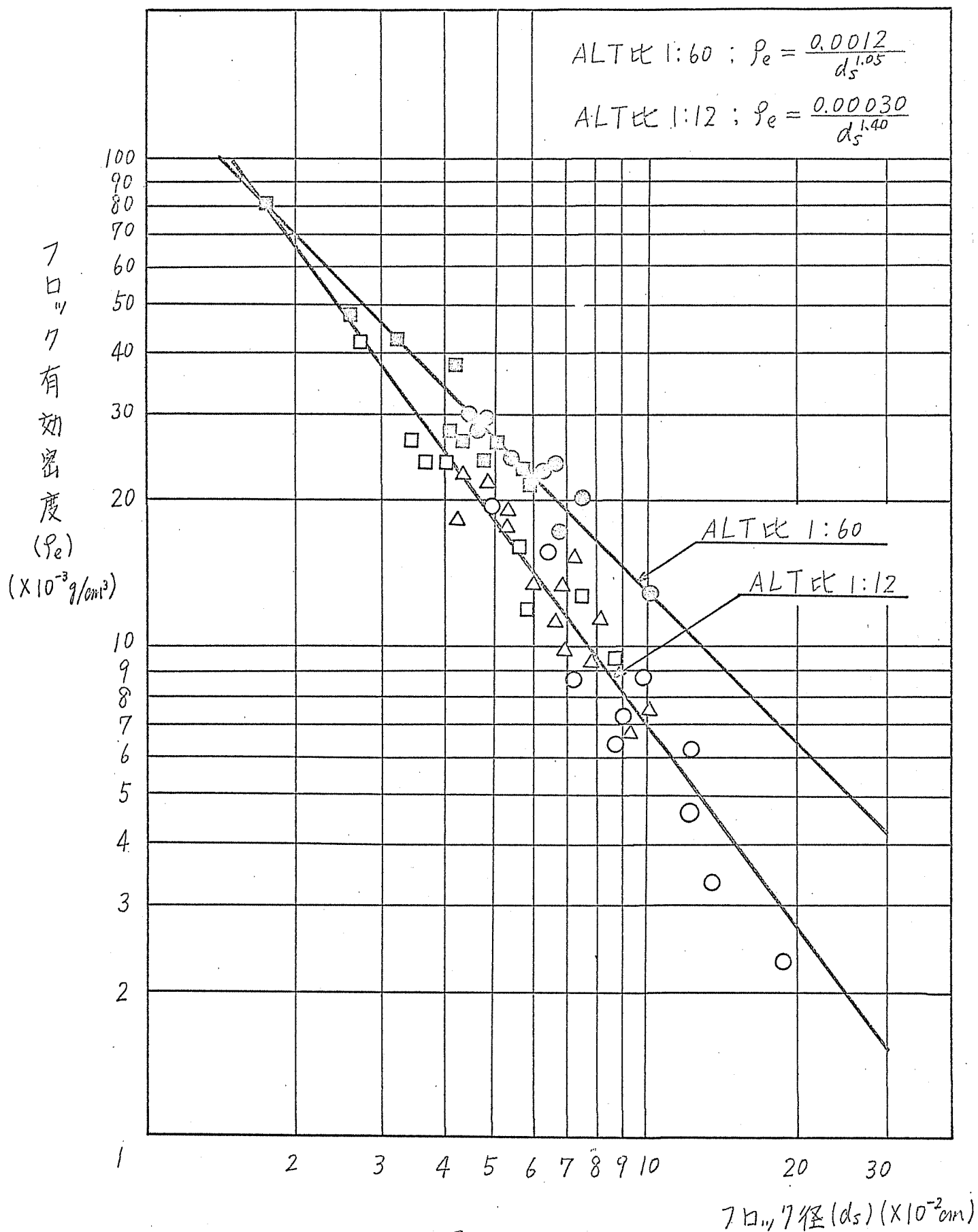


図(2-13) フロック密度に及ぼす原水水質の影響



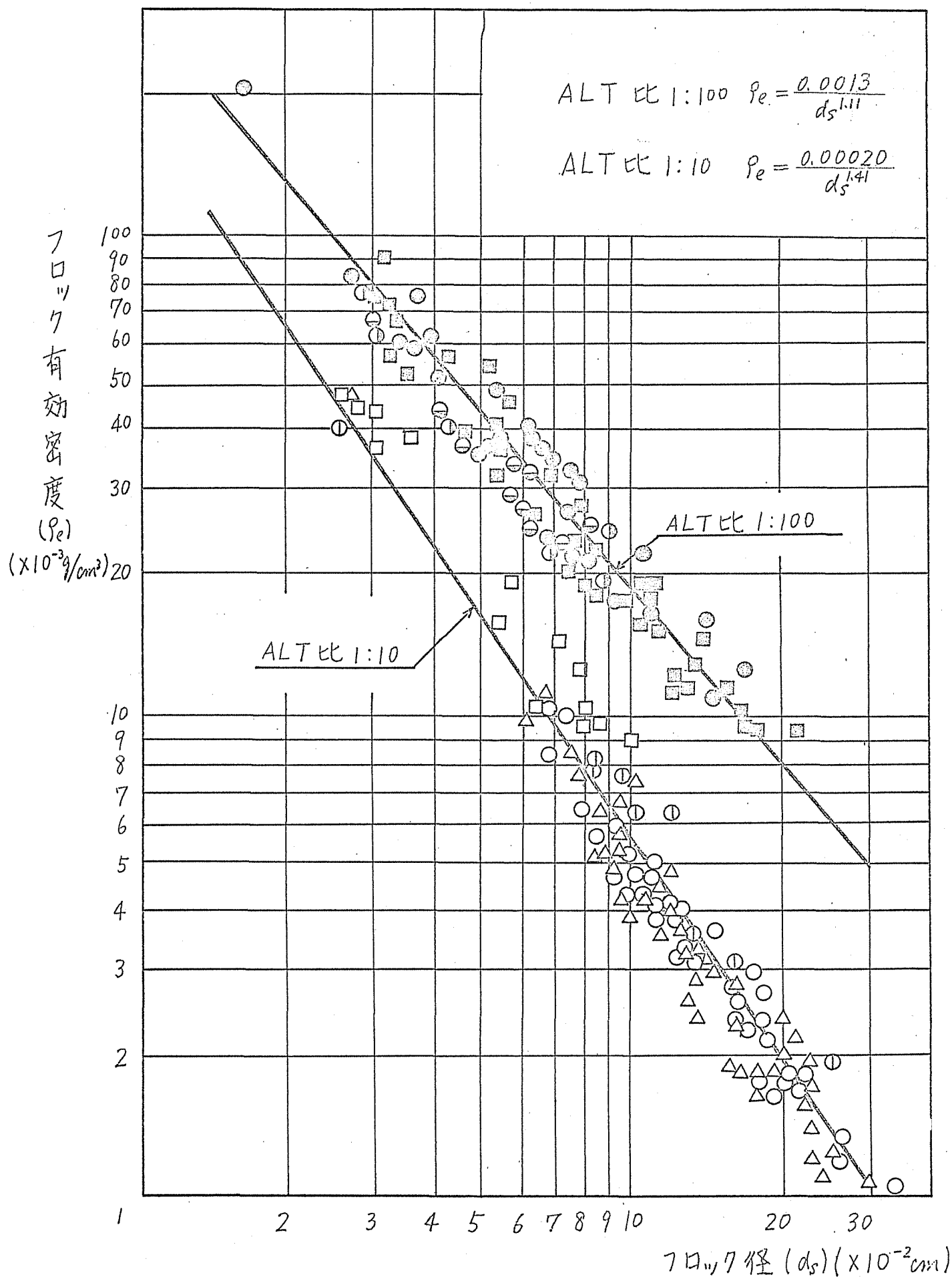
図(2-14) フロック密度関数のプロット

(硫酸アルミニウム ALT比 1:20)



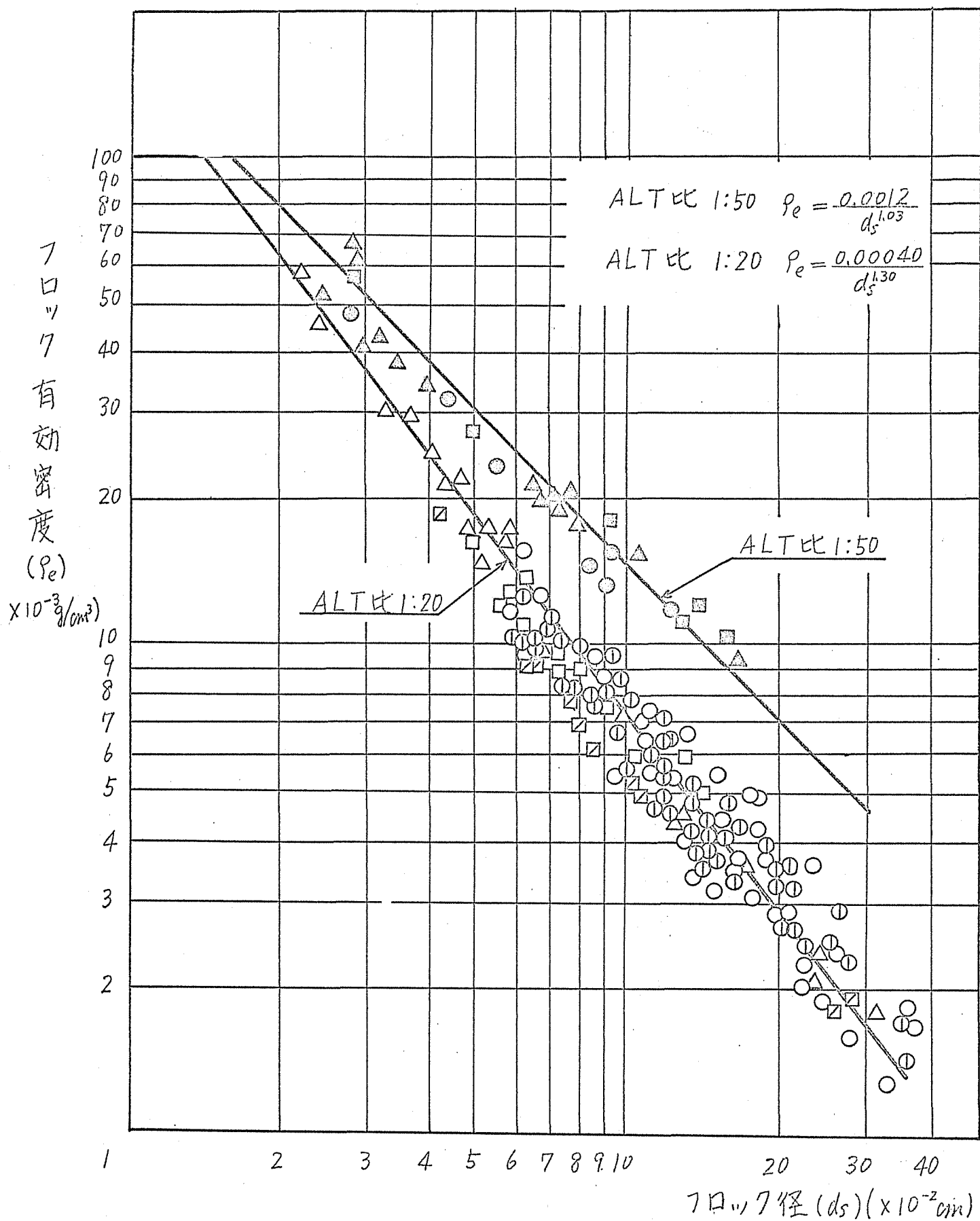
図(2-15) ブロック密度関数のプロット

(硫酸アルミニウム ALT比 1:60, ALT比 1:12)

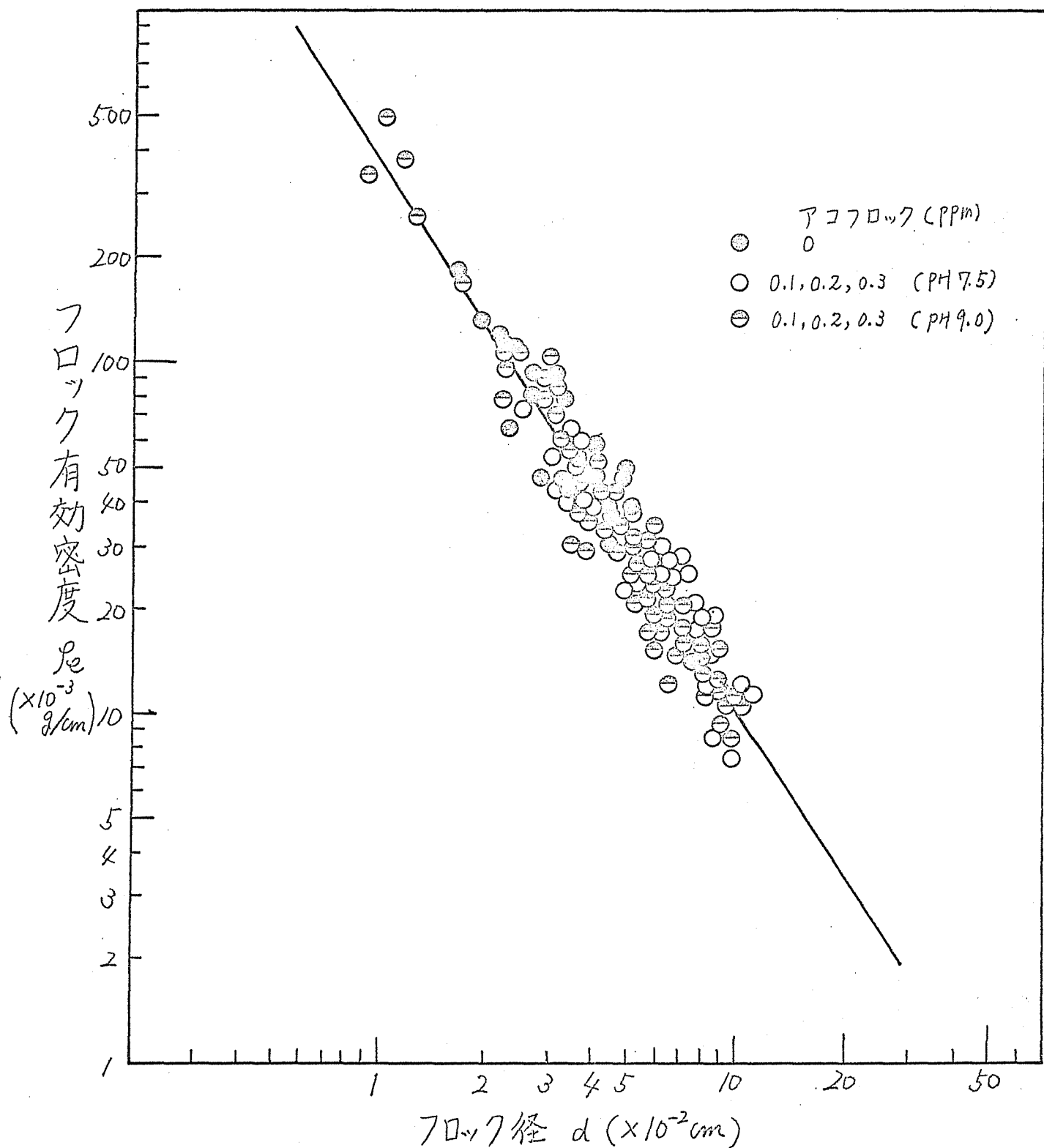


図(2-16) フロック密度関数のフロッット

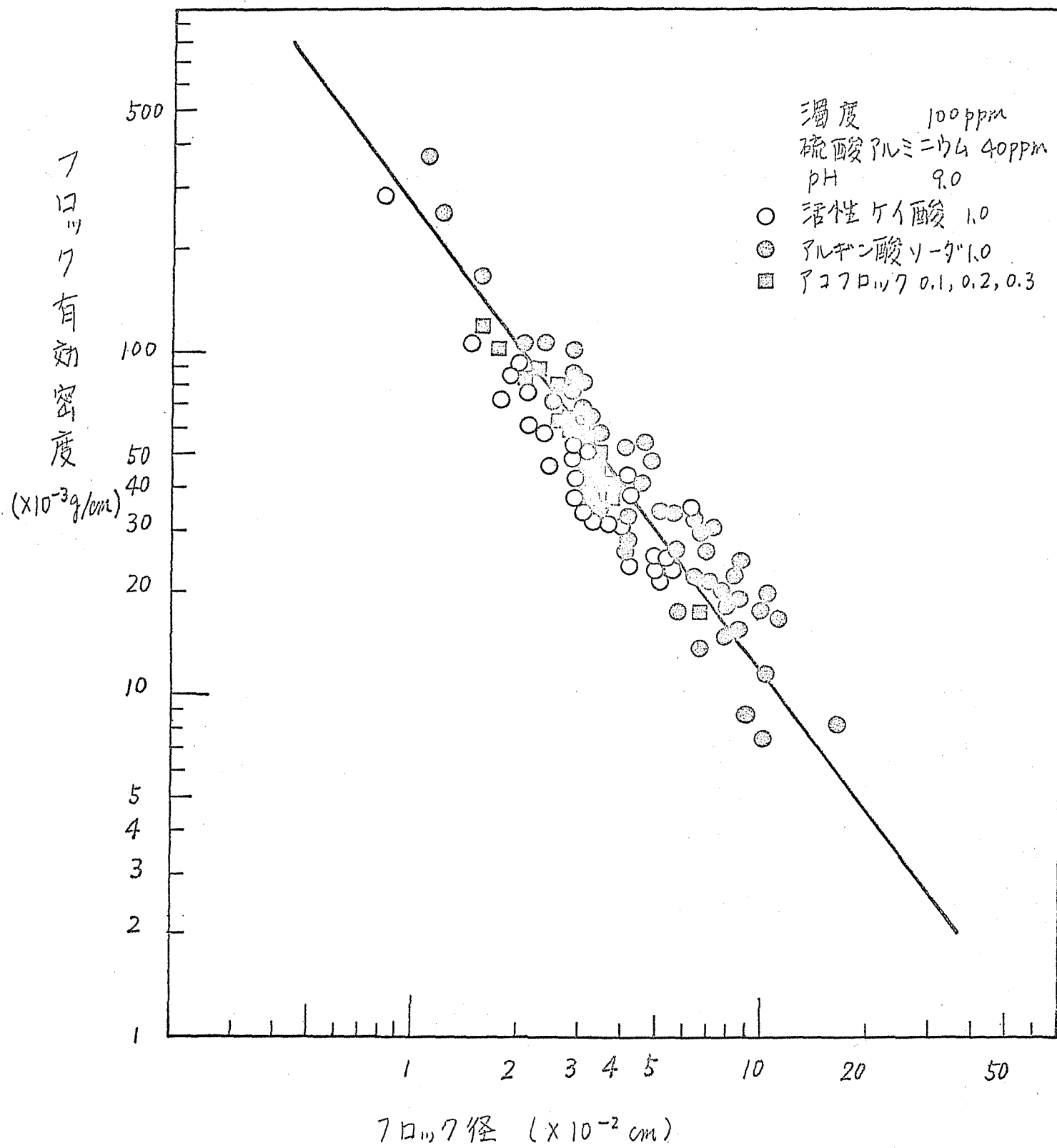
67 (ホリ)塩化アルミニウム ALT比1:100, ALT比1:10



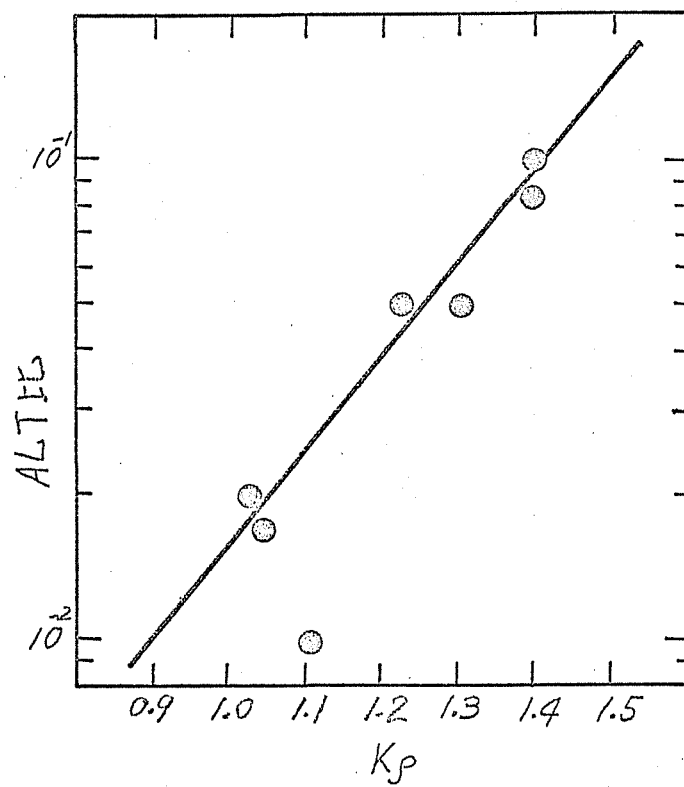
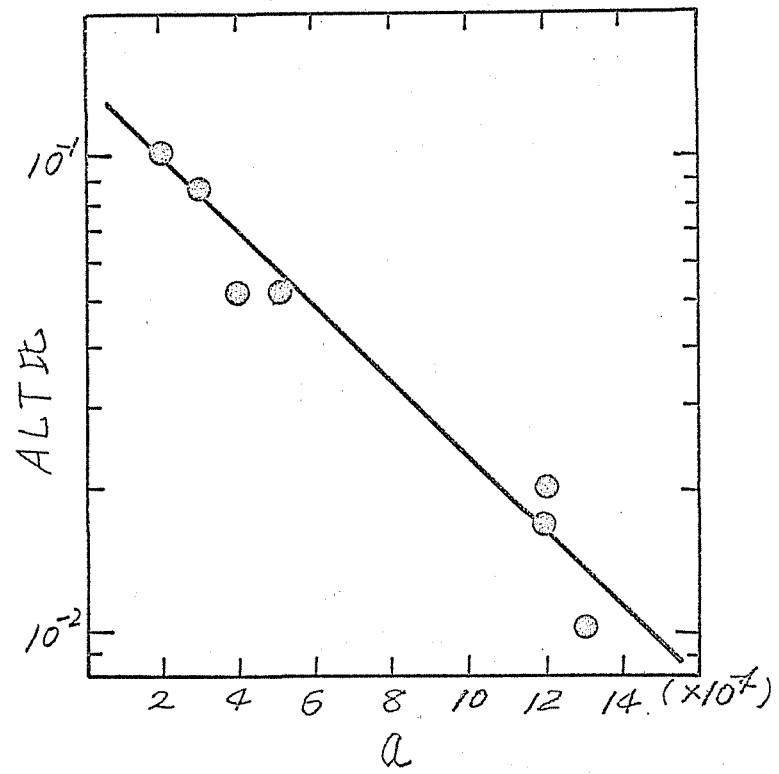
図(2-17) フロック密度関数のフロッット  
(ポリ塩化アルミニウム ALT比 1:50, ALT比 1:20)



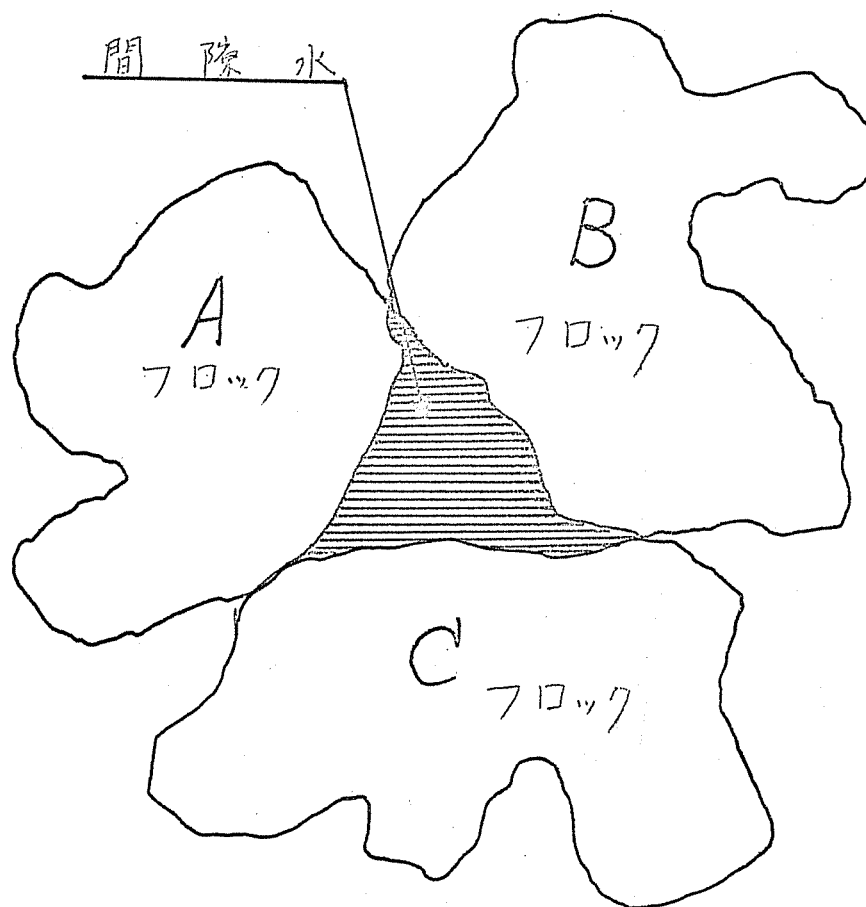
図(2-18) フロック密度に及ぼすフロック形成補助剤の影響



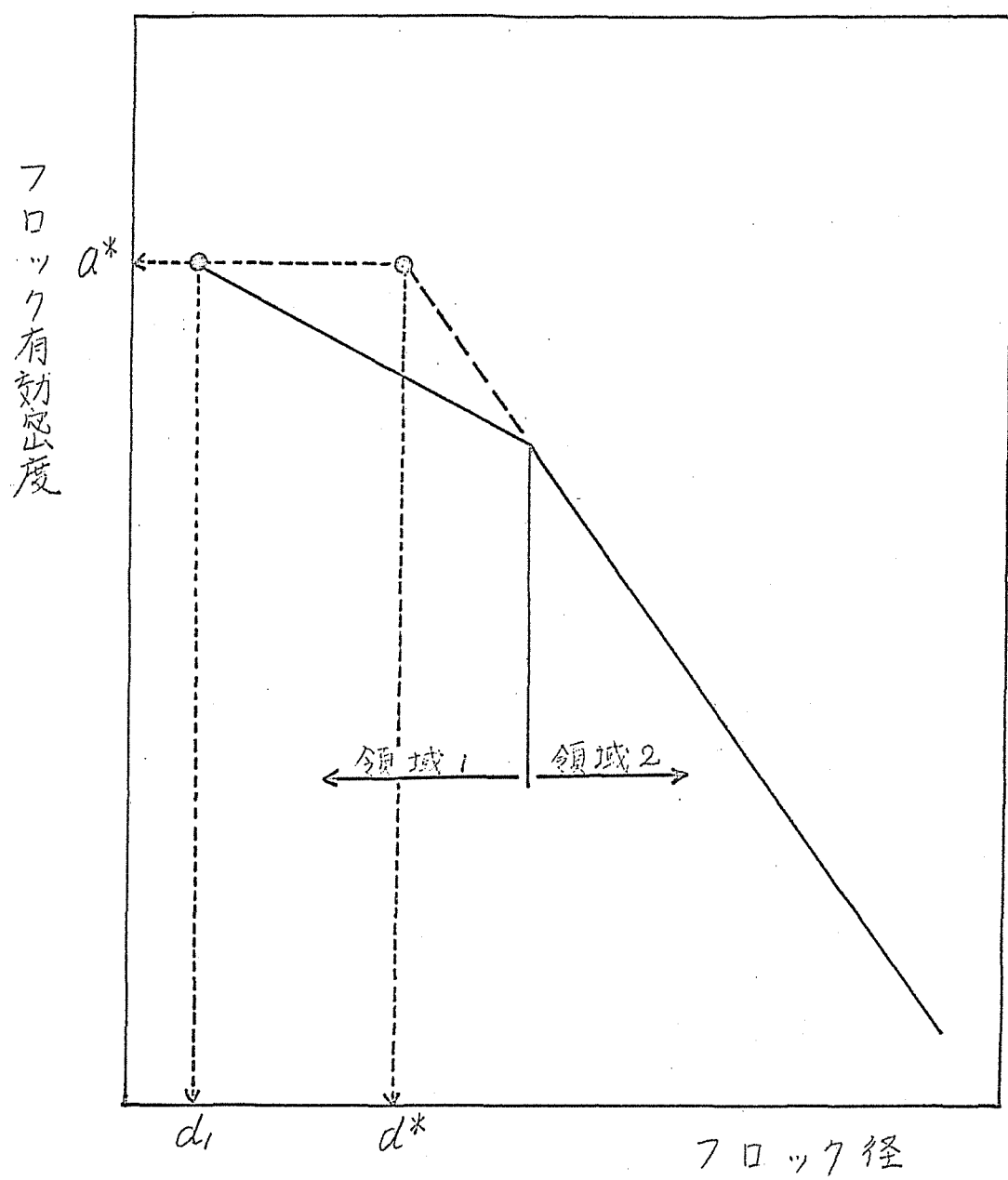
図(2-19) フロック密度に及ぼすフロック形成補助剤の影響



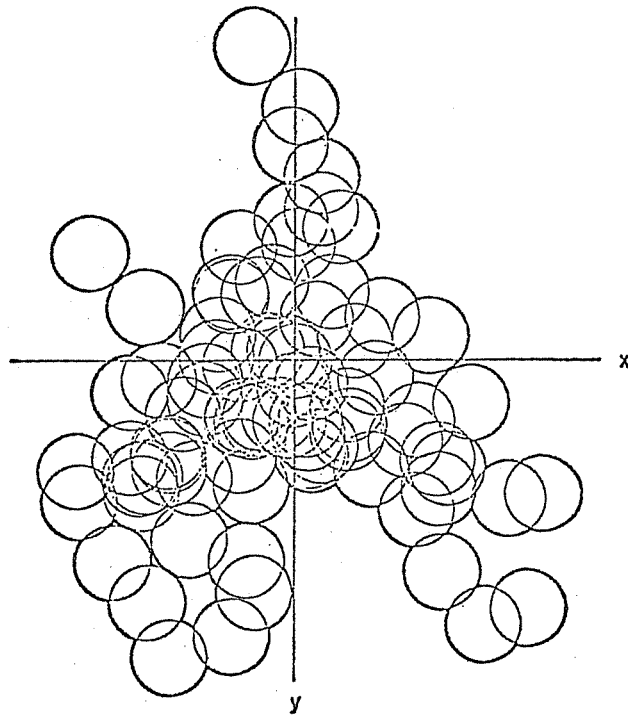
図(2-20) ALT比と密度関数の定数  $a, K_p$



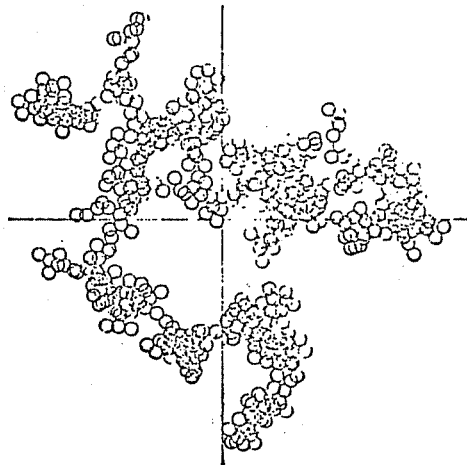
図(2-21) フロックの結合模式図



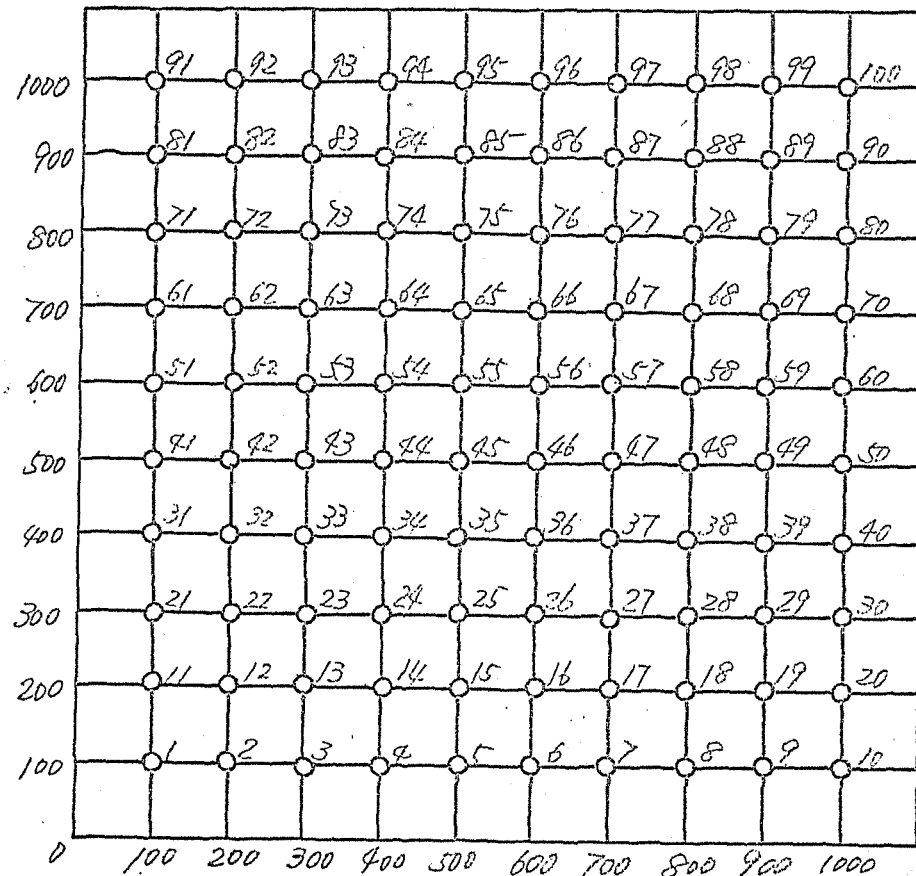
図(2-22) 小粒径側のフロック密度関数



図(2-23) Vold のモデルフロック

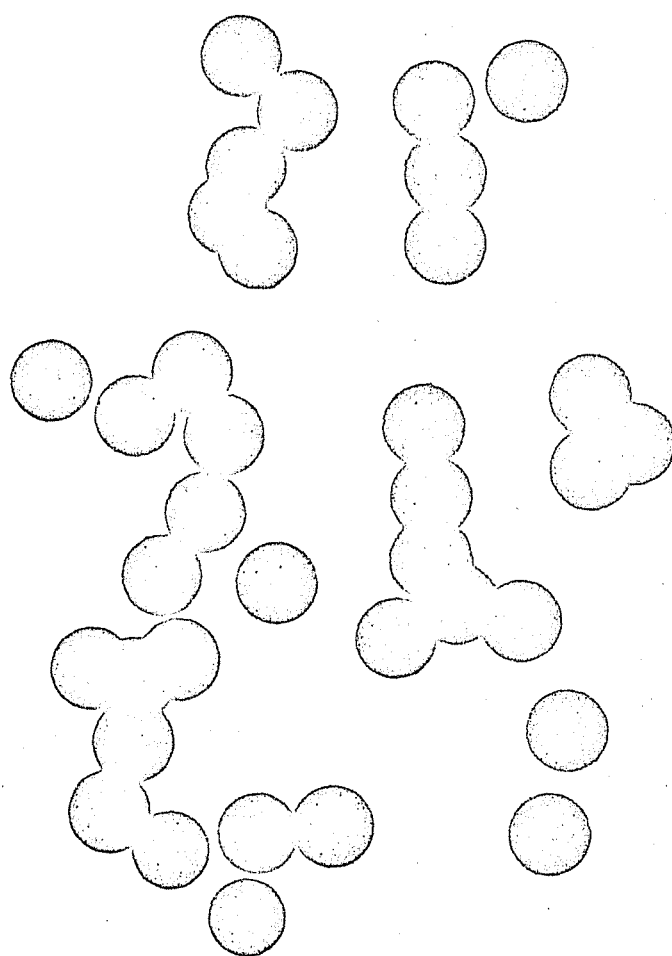


図(2-24) Suthenland の  
モデルフロック

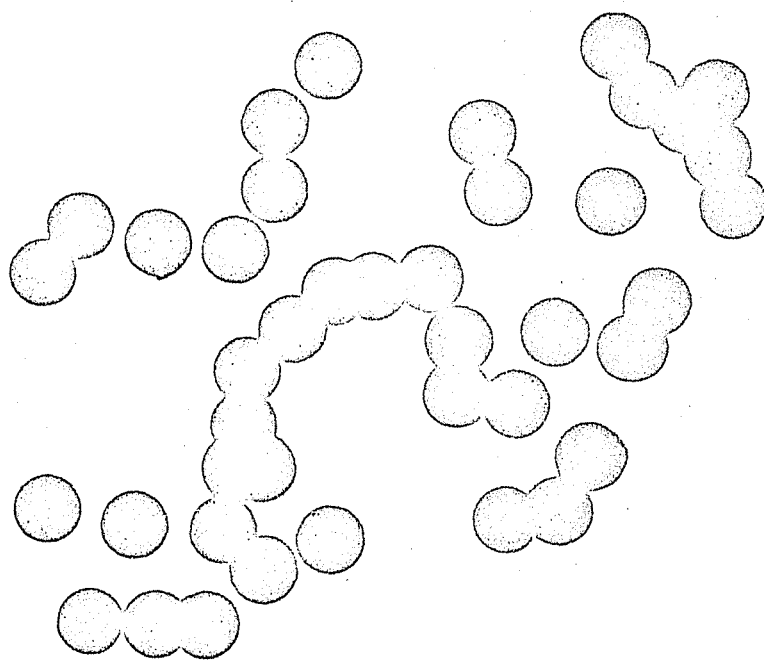


図(2-25) モデルの格子番地

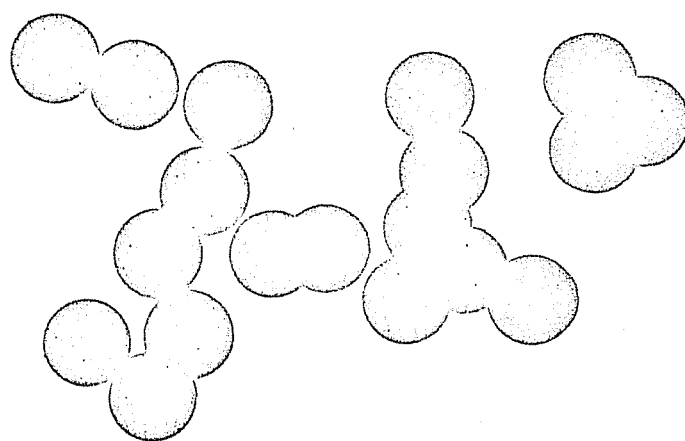
〔座標(100, 1000)は91番地, (300, 500)は43番地と表す。〕



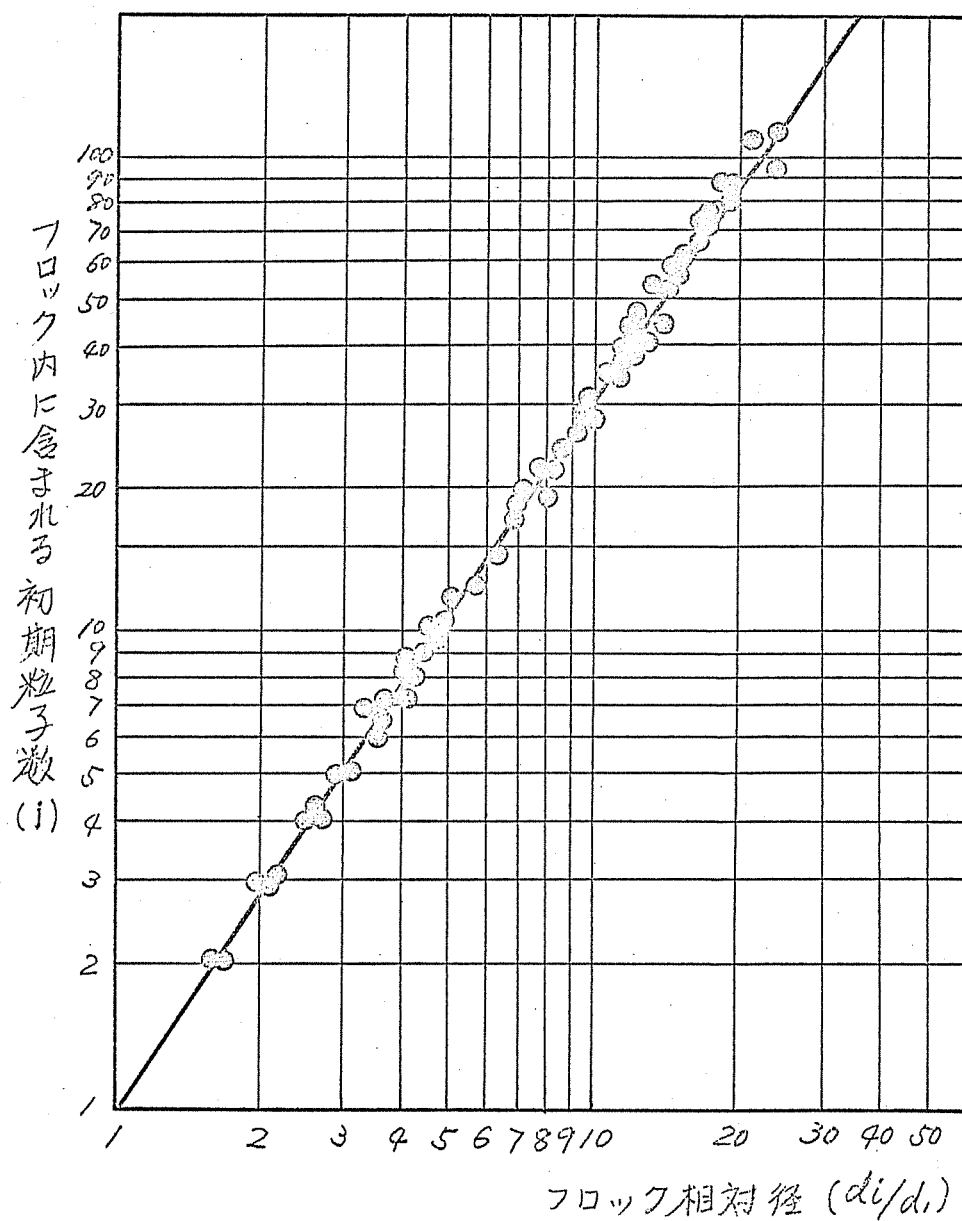
図(2-26) 表(2-18)のデータによるモデルフロッグ  
37個の初期粒子で構成されている。



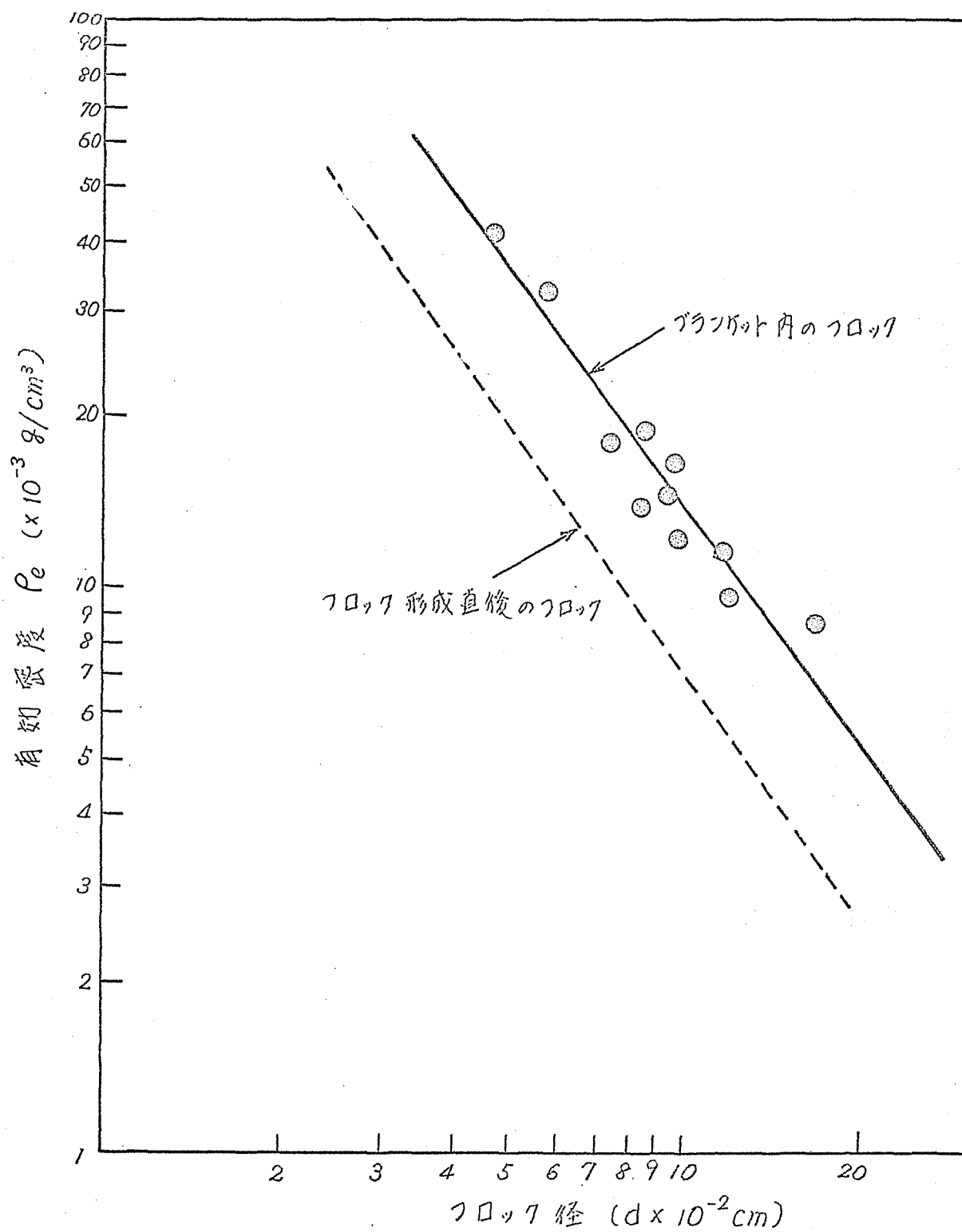
図(2-27) モデル7ロウワ  
44個の初期粒子で構成されている。



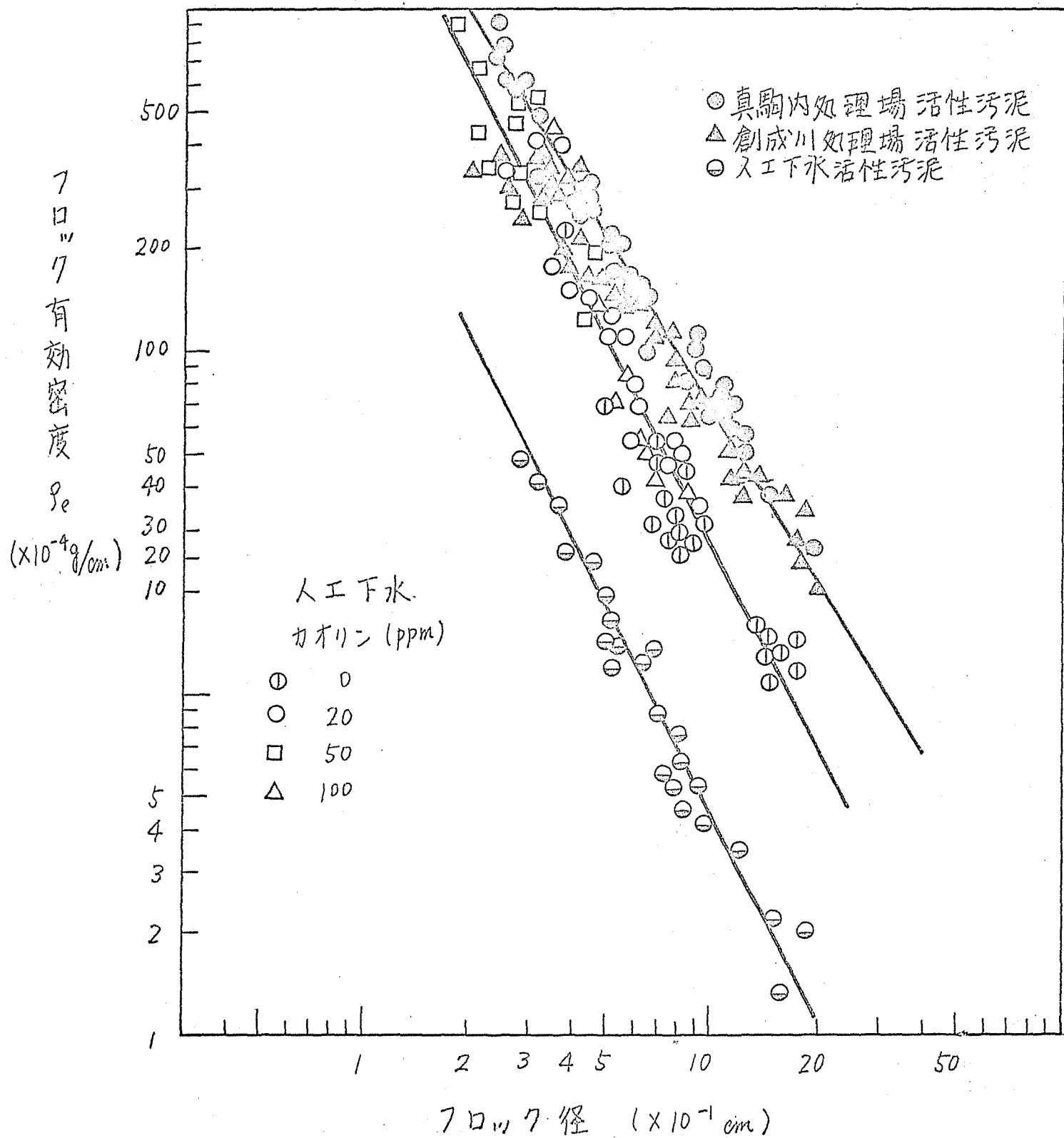
図(2-28) モデルブロック  
19個の初期粒子で構成されている



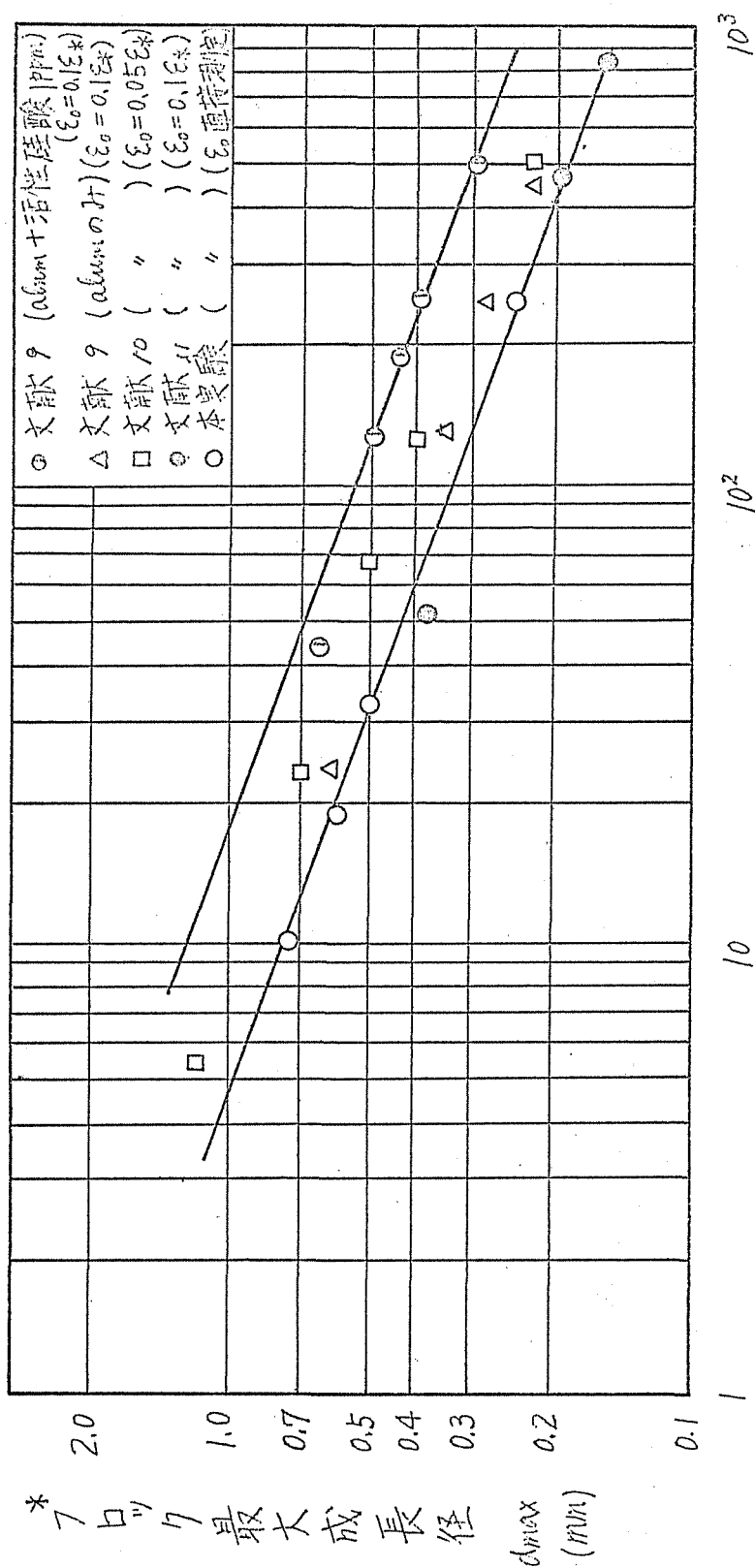
図(2-29) フロック相対径とフロック内に含まれる初期粒子数の関係



図(2-30) フロックフロッティングにおける密度関数



図(2-31) 生物フロックの密度



\* フロツク最大成長径  $d_{max}$  (mm)

\* 注) フロツクの最大成長径は、分布の上限における適當個数の粒子の一方平均径を用いた。

図 (2-32) 有効エネルギー消費率とフロツクの最大成長径

## 参考文献 (第2章)

- 1) Camp, T.R., Sedimentation and the Design of Settling Tanks, Transactions, ASCE, p.1852, Paper No.2285 (Nov.1946)
- 2) Rich, L.G., Unit Operation of Sanitary Engineering, John & Wiley, Inc., P.84
- 3) Brown, G.G., Unit Operation, John & Wiley, Inc., p.77
- 4) Vold, M.J., Computer Simulation of Floc Formation in a Colloidal Suspension, J. Colloid Science, 18, p.684 - 695 (1963)
- 5) Sutherland, D.N., Comments on Vold's Simulation of Floc Formation, J. Colloid and Interface Science, 22, p.300 - 302 (1966)
- 6) Sutherland, D.N., A Theoretical Model of Floc Structure, J. Colloid and Interface Science, 25, p.373 - 380 (1967)
- 7) Lagvanker, A.L., and Gemmel, R.S., A Size-r Density relationship for Flocs, J. American Water Works Association, Vol.60, No.9, p.1040 - 1046 (1968)
- 8) Fair, G.M., Geyer, J.C. and Okun, D.A., Water and Wastewater Engineering Vol.2, John Wiley and Sons, Inc., p.27 - 12
- 9) 丹保・山田・穂積, フロック強度に関する研究, 水道協会雑誌 427号, 昭.45.4, p.4 ~ 15
- 10) 丹保・小笠原, 管路によるフロック形成の研究, 水道協会雑誌 426号, 昭.45.3, p.29 ~ 39
- 11) Argaman, Y., Turbulence in Orthokinetic Flocculation, Univ. of Calif., Berkeley, ph.D. Thesis, 1968 Engrg., Sanitary and Municipal

注) 本章の一部はすでに下記の論文で発表済みである。

丹保・渡辺, アルミニウムフロックの密度に関する研究(I), 水道協会雑誌, 397号, 昭.42.10, p.2 ~ 10

丹保・渡辺・清水, アルミニウムフロックの密度に関する研究(II), 水道協会雑誌, 410号, 昭.43.11, p.14 ~ 17

渡辺・丹保, アルミニウムフロックの密度に関する研究(III), 水道協会雑誌 445号, 昭.46.10, p.2 ~ 9

### 第3章 フロック形成の基礎理論

#### 3-1 はじめに

水中に浮遊している粘土等のけん濁微粒子は、凝集操作により粒子相互の反発力が取除かれると何らかの外力により流体変動もしくは水流状態が与えられると、衝突合一して集塊化さるるゆへにフロックを形成し、後続の沈でんろ過によって水中から除かれる。フロック形成はこの物理的衝突合一現象を促進するための単位操作である。

ブラウン運動によりはもはや有効な相互衝突の機会を得られなくなる迄に成長したフロックに相互会合の機会を与えらるには、流体に変動を与え流体の乱れの中にフロックを包み込んで強制的に相対運動を与えなければならぬ。

現在迄に水流状態を作る外力とフロック形成の關係は多くの研究者により論じられて来たが、理論の中に実測のむずかしい因子が含まれていたり誤った概念の導入があったりして、必ずしも合理的設計の基礎理論として採用することができなかつた。

そこで、本章では理論的に最も健全であると思われ、V. G. Levichにより提示された乱流衝突理論をさらに発展させて、フロック形成過程を正確に記述し得る基本式を誘導することとする。ここで誘導された理論を用いて凝集沈でんろの主要なプロセスのノットでありながら、単なる滞留時間とパドルの周辺速度を規定する程度（水道施設基準）の設計手順しか持たないフロッキコレーターの設計に対して理論的設計への指針を与えようとするものである。

フロック形成池の起点断面におりて、 $x$ （流下方向）、 $y$ （幅方向）、 $z$ （鉛直方向）の3軸を取り各軸に直交する平面で囲む微小体積要素  $dV = dx dy dz$  により出入する粒子個数  $n$  の増減を示す基本式は次のようである。

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial n}{\partial y} \right) + \left( D_z \frac{\partial n}{\partial z} \right) \right\} - \frac{\partial (w_0 n)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} (u n) - F(n) + G(n)$$

----- (3-1)

ここで、 $n$ ：単位体積中のフロック数、 $D_x \cdot D_y \cdot D_z$ ：大きなスケールの渦による各々  $x, y, z$  軸方向への拡散係数、 $w_0$ ：時刻  $t$  における点  $(x, y, z)$  でのフロック群の瞬間平均沈降速度、 $u$ ： $x$  軸方向の平均流速（ $y, z$  軸方向

渦項し、こるを運あ衝ユマ右与るに子。  
 なる示。運動対にはキシ。まう粒ある。  
 大、分あ従この件つ口数ある動たさか深  
 のを増でさう間条あつ関らで変水大クか  
 ル分るの成うク流れの突な項流さ上ッ形  
 一増もも形ブッ層下隙衝はる乱示以口数  
 ケるにさウ。口か件突、れわとでれつ関  
 又よ動示ッ口流条。でけ表力節そ長の  
 的の運を口な水流るのなを合々、成(n)の  
 較散均率つらし、乱あるし環結率水大G  
 比拡平長はな長は、で用破のるさ過マ  
 口は成マば成件り動マ採のウ第制、つ  
 項ク項の、水道条あ運水をウッら規でよ  
 1ッウウ当か流で流さのッ口かかこに  
 第口第ッにおさ水の乱作も口つ又怪そか  
 辺フ、口るマさなもの操るつはンク。う  
 右のをつめつ大うの塊でけ長マラッる従  
 の中分は決知なよそ水下お成ハバ口なに  
 )積増項をめうる配小流に大おのつくル  
 1体る4の予よせ勾微乱下過口と長なデ  
 一位は第Fをささ度なは況は下力成得モ  
 3単に。形件さじ速効一狀項度壊大し壊  
 (る降る数条で生は有タ流5強破最在破  
 式は沈い閑流視を時に一乱第拌断る存な  
 にはその水無動る突しは辺攪剪あはう

攪拌子の。じ者之組　ユベ況の生　き  
、粒分子を生じキメ。キヤ状めか　基  
は、に粒々水項ツ群るッがたも環　に  
ごっ様も視らえ口ク菜口のった破　に  
内にも一分無げ第フツ出つも云しの　理論  
一々に散う妨、式口が式たと突ク　流  
夕濁上抜かる頂チフとチしハ衝ッ。  
一（戸）みとッノッ、こッ突なほ口る乱  
レて面へこま第バマするバ衝じにつべ性  
ユ大平向いに迎をえわ拌、生際長述方  
キハ又方の散右題換表攪はん実成に等  
ッルーエで振の問題さマ制式壊。大細所  
ローヤ、速流）マ置ッ強本破る過詳局  
フテ（に急乱ノシにマ基あな、にレ  
るス個もうな一と題につ成クとず決定  
的的平。そ模子〇問化も形ッのせは設  
マ較なるが類（＝常変にク口も一マを  
っ比角れ少大式に定う定ッつの合ハ況  
るに直ら減も、非拌飯口長そかつ状  
行じにえるん果にハになつ成就しハな  
も生何考よご結果で聞うの大関好うう  
拌マ方とに沈め。内時よ内過突合れよ  
攪ッ下る一のぞる一をハ一し衝割その  
制も流い合群。ホクタ社上ターはるか上  
強にはて突多いいさ一変以一分である以  
拌群し衝粒な略し成　レて下内ず

粘性領域内のマイクロスケール拡散が律速となる乱流拡散によってフロッギュレーター内でのフロッグの衝突合行が進行して行く場合には次のようにしてフロッグ群の衝突関数が与えられる。

乱流下における粒子群の集塊現象は衝突半径  $R$  を持った緩衝突粒子の同心円の表面への他粒子群の拡散輸送現象として扱われ、このような場合の球面座標系で表わした粒子濃度  $n$  の分布は次のように与えられる。

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_{\text{turb}} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial n}{\partial r} \right) \text{-----} (3-2)$$

境界条件として

$$\begin{cases} r = R^* \text{ 時 } n = 0 \\ r = \infty \text{ 時 } n = n_0 \end{cases} \text{-----} (3-3)$$

ここで、 $D_{\text{turb}}$ : 微小水塊による乱流拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ ),  $n$ : 粒子の個数濃度 ( $1/\text{cm}^3$ ),  $n_0$ : 初期状態における粒子の個数濃度 ( $1/\text{cm}^3$ ),  $r$ : 球中心からの距離 ( $\text{cm}$ ),  $R^*$ : 衝突半径 ( $\text{cm}$ )。

乱流拡散係数は乱流渦の変動速度とスケールの積として与えられる。Kolmogoroff の局所等方性乱流理論<sup>(2)</sup>によれば乱流を規定する確率分布は粘性領域では単位時間に単位体積中で失われるエネルギー量  $\epsilon_0$  ( $\text{erg}/\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$ ) と粘性係数  $\mu$  ( $\text{g}/\text{cm} \cdot \text{sec}$ ) によって、また慣性領域では  $\epsilon_0$  と流体の密度  $\rho$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) によって一義的に決えられる。拡散係数は次元解析によって各々の領域に対して次のように与えられる。

$$D_{\text{turb}} = v_\lambda \cdot \lambda = \alpha \left( \frac{\epsilon_0}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}} \lambda^{\frac{4}{3}}, \quad \lambda > \lambda_0 \text{----} (3-4)$$

$$D_{\text{turb}} = v_\lambda \cdot \lambda = \beta \left( \frac{\epsilon_0}{\mu} \right)^{\frac{1}{2}} \lambda^{\frac{1}{2}}, \quad \lambda < \lambda_0 \text{----} (3-5)$$

ここで、 $v_\lambda$ : 乱流変動速度 ( $\text{cm}/\text{sec}$ ),  $\lambda$ : 乱流渦のスケール ( $\text{cm}$ ),  $\alpha, \beta$ : 比例定数,  $\lambda_0$ : 渦のマイクロスケール。 $\lambda_0$  は渦レイノルズ数が丁度 1 となる所をわち慣性領域と粘性領域の境界とする渦のスケールとして定義される。渦レイノルズ数  $= v_\lambda \cdot \lambda / \nu$  が 1 となるスケール  $\lambda = \lambda_0$  がマイクロスケールを示すことになる。従って  $\lambda_0$  は、

$$\lambda_0 = \left( \frac{\rho \nu^3}{\epsilon_0} \right)^{\frac{1}{4}}$$

ここで、 $\mu$  : 水の動粘性係数 ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )

Levich は式(3-4), (3-5) を式(3-2) に代入し、境界条件として式(3-3) および  $r = \lambda_0$  で  $n, dn/dr$  が連続であるとして解いた結果に基づいて、直径  $d$  の等粒径粒子群の単位体積の流体中における単位時間での衝突回数  $F$  を次式で与えた<sup>3)</sup>。

$$F = 12\pi\beta\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu}} d^3 n^2 \text{-----} (3-7)$$

式(3-7)中の比例定数は例えは Obukhov, Yaglom<sup>4)</sup> が与えた乱流速度を表わす式(3-8)の資料と対比するなとして推定される。本論文では Obukhov 等の式(3-8)より  $\beta = 1/\sqrt{15}$  を用いる。

$$v_\lambda = \sqrt{\left(\frac{1}{15}\right) \cdot \left(\frac{\varepsilon_0}{\mu}\right)} \cdot \lambda \text{-----} (3-8)$$

したがって、衝突の基本式は式(3-9)のよう書かれる。

$$F = \frac{12}{\sqrt{15}} \pi \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu}} d^3 n^2 \text{-----} (3-9)$$

通常のフロック形成操作における有効攪拌エネルギー消費率は  $\varepsilon_0 \div 10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ erg/cm}^3 \cdot \text{sec}$  程度であるから、乱れのマイクロスケール  $\lambda_0$  は  $0.06 \sim 0.2 \text{ cm}$  の値となる。

$$\lambda_0 = \left( \frac{\rho \nu^3}{\varepsilon_0} \right)^{\frac{1}{4}} \div \left( \frac{1 \times 10^{-6}}{10^{-4} \sim 10^{-2}} \right)^{\frac{1}{4}} = 0.06 \sim 0.2 \text{ cm}$$

フロック形成過程で取扱われるフロック径は一般にこれらの値よりも小さいので式(3-9)をフロック形成の基本式として用いても良い。さらに第5章5節において明らかにされたように、最大フロック径  $d_{\max} = \lambda_0$  と云った領域でも実質上十分に粘性領域内の乱れの式を使用出来るので、フロック形成過程の全領域にわたって式(3-9)を用いることが確認された。

### 3-3 フロックの密度変化を考慮しない場合のフロック形式基本式<sup>6)</sup>

### 3-3-1 過大成長フロックの破壊を考えない場合

急速攪拌の段階を経てフロック形成池へ流入して来る粒子（以下初期粒子と称する）も近似的に単一粒度組成と考える。フロック形成初期において初期粒子同志の衝突合一点によって二倍大粒子がまず生成され、これら粒子間の組み合わせによって三倍、四倍粒子等が次々に生成されて行く。このような集塊現象を論ずるに当たって、初期粒子が $i$ 個集合して形成されるフロックを $i$ 倍粒子と定義する。衝突合一点によってフロック密度が一定に保たれる場合であるうち $i$ 倍粒子の体積が初期粒子の $i$ 倍となる場合には、

$$V_i = i V_1 \quad \text{あるいは} \quad d_i^3 = i d_1^3 \quad \text{-----} (3-10)$$

単位時間に単位体積中で生ずる $i$ 倍粒子と $j$ 倍粒子の衝突速度は式(3-1)と(3-7)から

$$\begin{aligned} \frac{dn_{ij}}{dt} &= 12 \pi \beta \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} \left( \frac{1}{2} d_i + \frac{1}{2} d_j \right)^3 n_i n_j \\ &= \frac{3}{2} \pi \beta \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} (d_i + d_j)^3 n_i n_j \\ &\text{-----} (3-11) \end{aligned}$$

さらに式(3-10)から、 $d_i = i^{\frac{1}{3}} d_1$ ,  $d_j = j^{\frac{1}{3}} d_1$  となり、 $A = \frac{3}{2} \pi \beta \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} d_1^3$  とおくと結局式(3-11)は、

$$\frac{dn_{ij}}{dt} = -A (i^{\frac{1}{3}} + j^{\frac{1}{3}})^3 n_i n_j \quad \text{-----} (3-12)$$

フロック形成過程中の任意時間において、単位体積中に存在する各大きさを持つ粒子数を次のように考える。

初期粒子の単位体積中の個数:  $n_1$   
 二倍粒子の " " " " :  $n_2$   
 $i$ 倍粒子の " " " " :  $n_i$

$i$ 倍粒子と $j$ 倍粒子の合一点によって生ずる $R$ 倍粒子( $R = i + j$ )の増加と他の粒子との合一点によって $R$ 倍粒子でなくなるものを総計した、 $R$ 倍粒子の単位体積中の個数 $n_R$ の消長は次式で与えられる。

$$\frac{dn_R}{dt} = \frac{1}{2} A \sum_{i=1}^{R-1} \left( i^{\frac{1}{3}} + (R-i)^{\frac{1}{3}} \right)^3 n_i n_{R-i} \\ - A n_R \sum_{i=1}^{\infty} \left( i^{\frac{1}{3}} + R^{\frac{1}{3}} \right)^3 n_i \text{-----} (3-13)$$

ここで、 $n_0$ :  $t=0$  の時の単位体積中の初期粒子数 ( $1/\text{cm}^3$ )  
 $\sum_{i=1}^{\infty} i n_i = n_0$

単位体積中のフロック粒子総数の減少は次式で与えられる。

$$\frac{d \sum_{R=1}^{\infty} n_R}{dt} = \frac{1}{2} A \left\{ \sum_{R=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{R-1} \left( i^{\frac{1}{3}} + (R-i)^{\frac{1}{3}} \right)^3 n_i n_{R-i} \right. \\ \left. - 2 \sum_{R=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} \left( i^{\frac{1}{3}} + R^{\frac{1}{3}} \right)^3 n_i n_R \right\} \\ \text{-----} (3-14)$$

今、式 (3-15) のようにフロックの全量を 1 とし、フロックの組成を比率で示し、式 (3-16) のような変数変換を行なって無次元攪拌継続時間  $m$  ( $m$ -値) を導入して式 (3-13) の無次元化を行なうとユニバーサルなフロック形成式を式 (3-17) のように得ることが出来る。

$$N_i = \frac{n_i}{n_0} \quad \sum_{i=1}^{\infty} i N_i = 1 \text{-----} (3-15)$$

$$m = \frac{3\pi}{2\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} d_1^3 n_0 t \div 1.22 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} d_1^3 n_0 t \text{---} (3-16)$$

$$\frac{dNR}{dm} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{R-1} \left( i^{\frac{1}{3}} + (R-i)^{\frac{1}{3}} \right)^3 N_i N_{R-i} \\ - N_R \sum_{i=1}^{\infty} \left( i^{\frac{1}{3}} + R^{\frac{1}{3}} \right)^3 N_i \text{-----} (3-17)$$

式 (3-17) は過大成長フロックの破壊を考慮しない場合の各倍数粒子の消長を示す式で、 $i=1$  の初期粒子が衝突合一によって最終的には  $i=\infty$  の 1 つの粒子になる場合を

扱っている。しかしながら、一定攪拌強度下にある実際のフロック形成池ではフロックがある寸法にまで達すると乱流変動による破壊力がフロックの結合力よりも大きくなり、フロックは一定限度以上に成長し得ず最大成長フロック径が存在することとなる。そこで、式(3-17)を過大成長フロックが破壊し一定限度以上のフロックが存在し得ない場合に適用出来るように補正するためには、過大成長フロックがどのように破壊するかと云うフロック破壊の機構を考えなければならぬ。

### 3-3-2 過大成長フロックの破壊を考える場合

与攪拌条件下で成長し得る最大フロックの初期粒子の集合数を $S$ とする。式(3-17)は過大成長フロックの破壊を考慮してないためにその点を考慮した理論式を求めなければならぬ。

そこで、次のような条件で過大成長フロックの破壊が生ずると考え、式(3-13)にフロックの破壊を示す項を付加して $R$ 倍粒子の消長を論じた。(1)フロックは $S$ 倍粒子に至るまで何等の破壊も伴わずに成長することが出来る。(2) $S$ 倍粒子よりも大きな $R$ 倍粒子を作るような $i$ 倍粒子と $(R-i)$ 倍粒子の衝突はフロックの成長には無効である。このような衝突がある場合には、衝突した粒子は直ちに元の $i$ 倍粒子と $(R-i)$ 倍粒子に解体してしまう。

そこで、単位体積中で単位時間に生ずる $R$ 倍粒子の消長は次式で示される。

$$\begin{aligned} \frac{dn_R}{dt} &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{R-1} \left( i^{\frac{1}{3}} + (R-i)^{\frac{1}{3}} \right)^3 n_i n_{R-i} \\ &\quad - A n_R \sum_{i=1}^S \left( i^{\frac{1}{3}} + R^{\frac{1}{3}} \right)^3 n_i \\ &\quad + A n_R \sum_{i=S-R+1}^S \left( i^{\frac{1}{3}} + R^{\frac{1}{3}} \right)^3 n_i \\ &= \frac{1}{2} A \sum_{i=1}^{R-1} \left( i^{\frac{1}{3}} + (R-i)^{\frac{1}{3}} \right)^3 n_i n_{R-i} \\ &\quad - A n_R \sum_{i=1}^{S-R} \left( i^{\frac{1}{3}} + R^{\frac{1}{3}} \right)^3 n_i \cdots \cdots (3-18) \end{aligned}$$

式(3-18)を式(3-17)と同様に無次元化した時間 $m$ に関する式に変換すると,

$$\frac{dN_R}{dm} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{R-1} \left\{ i^{\frac{1}{3}} + (R-i)^{\frac{1}{3}} \right\}^3 N_i N_{R-i} \\ - N_R \sum_{i=1}^{S-R} \left( i^{\frac{1}{3}} + R^{\frac{1}{3}} \right)^3 N_i \text{-----} (3-19)$$

ただし,

$$\sum_{i=1}^S i N_i = 1$$

第4章で述べるようなフロック成長パターンの実測によつて、ここで仮定した過大成長フロックの破壊モデルの妥当性が裏付けられた。すなわち、実測の結果フロック形成が進行して行くとある粒度分布状態でフロックの成長は停止し、それ以後は攪拌を続けながらも成長停止時の分布を維持することから示された。したがつて、この事実から過大成長粒子を形成するような衝突が起これば衝突以前の二粒子に解体することから理解しうる。しかし、写真(3-1)を参照すると分かるようにある分布状態のフロック群をフロックを形成させた時よりも数段強い攪拌を与えて破壊する場合には、 $P$ 個( $P=1, 2, 3, \dots$ )のほぼ等体積のフロックに解体するものと推察される。

そこで、フロック破壊のパターンは次の二つに大別できよう。(1)ゆるやかな乱流変動によりフロック形成が進行し、攪拌強度により決まってくる最大成長フロック以上の過大フロックを形成するような衝突が起こる場合には、直ちに衝突前の二粒子に解体する。(2)ある分布状態のフロック群をフロック形成を行なったよりも(破壊限度よりも)数段強い攪拌を与えて破壊した場合、ほぼ等体積の $P$ 個のフロック粒子に解体する。

### 3-4 フロックの密度変化を考慮した場合のフロック形成式

#### 3-4-1 フロック形成基本式へのフロック密度関数の導入

前節でのフロック形成理論は $i$ 個の初期粒子が集った $i$ 倍粒子の体積、重量ともに初期粒子の $i$ 倍の粒子であり、

フロック形成過程中にフロックの密度が変化しないものとして誘導された。しかし、実際に形成されるフロックは衝突合—して成長して行く際に周囲の水を間隙水として取り込み、径の増大に伴って密度を減じ含水率の高い構造に変化して行く事が第二章で示された。

したが、 $i$ 、 $j$  倍粒子と  $j$  倍粒子の衝突合—によって初期粒子の  $(i+j)$  倍の体積を持つ粒子が形成されるのではなく、より大きな体積の粒子が形成される。そこで、現実にくそしたフロック形成を論ずるためにはフロックの密度変化を考慮したフロック形成基本式を求めなければならぬ。

今、直径  $d_i$  の初期粒子が  $i$  個集って構成されてゐる直径  $d_i$  の  $i$  倍粒子の体積は、フロックの実質部と間隙水の体積の和として次のように与えられる。

$$\frac{\pi}{6} d_i^3 = \frac{\pi}{6} d_i^3 i + V_w \text{ ----- (3-20)}$$

ここで、フロック形成過程中にフロックに取込まれた間隙水の体積  $V_w$  には元々初期粒子中に存在する水分は含まない。したが、 $i$  倍粒子の全含水の体積を示すものでない。

直径  $d_i$  および  $d_i$  の粒子の有効密度を  $\rho_{ei}$ ,  $\rho_{ei}$  として次のように定義する。

$$\begin{aligned} \rho_{ei} &= \rho_i - \rho_w \\ \rho_{ei} &= \rho_i - \rho_w \end{aligned} \text{ ----- (3-21)}$$

ここで、 $\rho_i$ ,  $\rho_i$ : それぞれ直径  $d_i$  と  $d_i$  のフロックの実密度 ( $g/cm^3$ ),  $\rho_w$ : 水の密度 ( $g/cm^3$ )。

したが、 $i$  倍粒子の質量は次式で示される。

$$\frac{\pi}{6} (\rho_{ei} + \rho_w) = \frac{\pi}{6} d_i^3 i (\rho_{ei} + \rho_w) + V_w \rho_w \text{ ----- (3-22)}$$

式 (3-20) より、

$$V_w = \frac{\pi}{6} d_i^3 - i \frac{\pi}{6} d_i^3 \text{ ----- (3-23)}$$

式 (3-22) と式 (3-23) より

$$d_i^3 \rho_{ei} = i d_1^3 \rho_{e1} \text{ ----- (3-24)}$$

直径が  $10 \sim 20 \mu$  以上にまで成長したフロックに対して前章で示されたように、フロック径と有効密度との間にフロック密度関数が成立する ( $i$  倍粒子にっして示してあるので添字  $i$  を付けた)。

$$\rho_{ei} = \frac{a}{(d_i/1)^{K_p}} \quad d_i > 10 \sim 20 \mu \text{ ----- (3-25)}$$

急速攪拌の段階で形成される初期粒子の直径が式 (3-25) の関係を満足する程度まで成長している場合には、 $i$  倍粒子の直径とそれの中に含まれる初期粒子数  $i$  の関係は式 (3-25) を式 (3-24) に代入して式 (3-26) のように与えられる。

$$d_i = i^{\frac{1}{3-K_p}} d_1 \text{ ----- (3-26)}$$

そこで、初期粒子と間隙水がその構造の中に取り込まれて形成されている  $i$  倍粒子と  $j$  倍粒子の合一の際の衝突半径  $R_{ij}^*$  は、

$$R_{ij}^* = \frac{1}{2} (d_i + d_j) = \frac{1}{2} \left( i^{\frac{1}{3-K_p}} + j^{\frac{1}{3-K_p}} \right) d_1 \text{ ----- (3-27)}$$

したがって、単位時間に単位体積中で生ずる  $R$  倍粒子の消長を示す無次元式はフロックの破壊を考慮しない場合は、

$$\begin{aligned} \frac{dN_R}{dm} = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{R-1} \left\{ i^{\frac{1}{3-K_p}} + (R-i)^{\frac{1}{3-K_p}} \right\}^3 N_i N_{R-i} \\ & - N_R \sum_{i=1}^{\infty} \left( R^{\frac{1}{3-K_p}} + i^{\frac{1}{3-K_p}} \right)^3 N_i \end{aligned} \text{ ----- (3-28)}$$

ここで、
$$\sum_{i=1}^{\infty} i N_i = 1$$

また，過大成長フロックの破壊を考慮した場合に於て，与攪拌条件下で成長しうる最大成長フロックへの初期粒子集合数を  $S$  とすると，

$$\frac{dN_R}{dm} = \sum_{i=1}^{R-1} \left[ i^{\frac{1}{3-K_g}} + (R-i)^{\frac{1}{3-K_g}} \right]^3 N_i N_{R-i} \\ - N_R \sum_{i=1}^{S-R} \left( R^{\frac{1}{3-K_g}} + i^{\frac{1}{3-K_g}} \right)^3 N_i \\ \text{-----} (3-29)$$

ここに，

$$\sum_{i=1}^S i N_i = 1$$

### 3-4-2 基本式の適用範囲

フロック形成過程は，(1)界面電気的もしくは化学的反応が終了した直後の  $d < 10 \sim 20 \mu$  程度の，粒子密度の変化を無視できるとごく小寸法の粒子群に対し式(3-17)が適用できる領域，(2)密度変化が無視できない粒子群に対し式(3-29)が適用される領域，(3)両者が混在している中間の領域に分けられる。

表(3-1)，(3-2)は顕微鏡によつて急速攪拌終了直後の初期粒子径を実測した一例である。表(3-1)によれば  $d_1 = 10 \sim 15 \mu$ ，表(3-2)によれば  $d_1 = 5 \mu$  程度である。したがつて，フロック形成の極めて初期の段階では領域(1)，(3)が存在するが，この期間はフロック形成の全体から見ると極めて短時間であつて，フロック形成池の実設計の際にはこの段階のフロック形成を無視して，式(3-29)によつてフロック形成の定量的取扱いが可能である。

### 3-5 基本式中の特性値 $m$ $K_g$ $S$

式(3-29)で示されるような無次元式をフロック形成の基本式としてフロック粒子の成長を論ずる場合，最大成長フロックへの初期粒子集合数  $S$  およびフロック密度関数の指数  $K_g$  をパラメーターとして，無次元攪拌継続時間  $m$  によつて式(3-29)を数値積分することによつてフロック群の粒度組成の推移をユニバーサルな形で得ることができる。したがつて，これら3つの特性値がフロック形成状態

を支配する主因子となる。これらの因子の内、 $K_f$ は凝集剤の種類、注入率などの凝集条件によって支配される独立した因子であるが、 $m$ と $S$ は相互に関連し合う因子である。そこで、本節においてはこの二つの諸因子の内容を検討しそのフロック形成操作上で占める意義を明らかにしたい。

### 3-5-1 無次元攪拌継続時間 $m$

式(3-16)によつて定義される無次元攪拌継続時間 $m$ は他の二因子 $K_f, S$ が一定の場合には、一義的にフロックの集塊状態(粒度組成)を定める数値である。すなわち、 $K_f, S$ が一定のフロック形成過程では $m$ が等しければフロックの粒度組成は常に一定の分布を持つ。また、

$$A^* = \frac{m}{t} = \frac{3\pi}{2\sqrt{15}} \sqrt{\frac{E_0}{\mu}} d_p^3 n_0 \dots \dots \dots (3-30)$$

であるから $m/t$ は(1/sec)なる次元を持つ反応速度恒数(フロック形成速度係数)と云うことになり、フロック形成速度は $\sqrt{E_0/\mu} d_p^3 n_0$ に比例して増大することが知られる。

$\sqrt{E_0/\mu}$ はCampの $G$ 値と等しい表現であるが、Campが定義した層流条件とは異なる衝突機構の下でフロック形成が進行して行く事を注意し、さらに、 $E_0$ をフロック形成池全体で失われるエネルギー量 $E_x$ とも区別しなければならぬ点を加味して、次式のよう $G^*$ 値と $G_0$ 値を定義する。

$$G^* = \sqrt{\frac{E_x}{\mu}} \dots \dots \dots (3-31)$$

$$G_0 = \sqrt{\frac{E_0}{\mu}} \dots \dots \dots (3-32)$$

ここで、 $E_x$ : フロック形成池全体の総エネルギー消費率( $\text{erg/cm}^3 \cdot \text{sec}$ )、 $E_0$ : 有効エネルギー消費率( $\text{erg/cm}^3 \cdot \text{sec}$ )

Campは理論の誘導において層流条件を用いたが、フロッギュレーターの運転指標としての推薦値<sup>3)</sup>は乱流下の値を用いている。したがって、数値としてはCampの $G$ 値をそのまま $G^*$ 値として用いても良い。

また、 $d_p^3 n_0$ はフロック形成池に流入して来る初期粒子群の体積濃度 $C_0$ に比例する数値であり、凝集剤の注入率

が通常用いられる程度であれば、 $C_v$  は原水濁度  $C_T$  に近似的に比例するものと考えられる。したがって、 $d_i^3 n_0$  と  $C_T$  と近似的に置くことが出来る。そこで、フロック形成速度は攪拌強度指標  $G^*$  (もしくは  $G_0$ ) と初期粒子群の体積濃度  $C_v$  (近似的には原水濁度  $C_T$ ) の積  $G^* C_v$  で表わされる、フロック形成の程度はこれに実攪拌継続時間を掛けた  $G^* C_v t$  により表わされる。Camp の示した  $G_T$  値によってフロック形成度が支配されると云う考え方は今迄行なってきた理論的考察から、 $G^* C_v t$  値によって示されると改めなければならぬ。したがって、フロック群が最大成長平衡するよりそれ以上攪拌を続けるとフロック群の成長は進行しない状態に達するに要するフロック形成時間を  $T^*$  (sec) とすると、推奨されるフロック形成に必要な全攪拌継続値は  $G^* C_v T^*$  となる。

### 3-5-2 フロック密度関数の指数 $K_F$

式(3-25)に示したようなフロック密度関数の指数  $K_F$  は、フロックが集塊成長して行く際に間隙水を取り込んで密度を減じ、見かけ体積を増大して行く程度を示す数値である。このような粒径の増加に伴う見かけ体積の増大は、フロックの衝突合の過程において式(3-27)に示されるような衝突半径の増加となって作用し、大粒径側の粒子の衝突速度を加速させるように働く。

1倍粒子の衝突半径はフロックの密度変化がない場合には集合初期粒子数の  $1/3$  乗に比例するが、アルミニウムフロックの  $K_F$  値は 1.0 ~ 1.5 程度であるから実際には集合数の  $1/2 \sim 1/1.5$  乗に比例すると云った大幅な増大を示すことになる。したがって、フロックの粒度組成変化のパターンも異なってきた、フロック群が最大成長平衡分布に達するに要するフロック形成時間  $T$  はフロック密度の変化を考慮しない場合よりも著しく短縮される。

### 3-5-3 最大成長フロックへの初期粒子集合数 $S$ とフロックの最大成長度 $S_m$

与えられた攪拌条件下で成長しうる最大フロック径  $d_{max}$  はフロックの結合強度の大小によって決まり、初期粒径  $d_i$  との比  $(d_{max}/d_i)$  は  $m$  値とともにフロック形成過程を支配する重要な因子である。特に、最大成長平衡時のフロック粒度組成とそれに達するに要する攪拌継続時間を決定する主要因子である。式(3-29)等において  $d_{max}$  はフロックの最大成長度を示

すなわち、初期粒子の最大集合数  $S$  を用いるか  $d_1$ ,  $d_{max}$  が与えられれば  $S$  は  $d_{max}$  粒子にっり式(3-26)を変形して式(3-33)にょって与えられる。

$$S = \left( \frac{d_{max}}{d_1} \right)^{3-K_F} = S_m^{\frac{3-K_F}{3}} \text{-----} (3-33)$$

$$S_m = \left( \frac{d_{max}}{d_1} \right)^3 \text{-----} (3-34)$$

ここで、 $S_m$ : 初期粒子に対する最大成長フロック体積の倍率で最大成長度と称する。

前章において明らかにしたように<sup>5)</sup>、フロック形成が行われる乱流の粘性領域におけるフロックの最大成長径  $d_{max}$  と撹拌強度指標  $G_0 = \sqrt{\epsilon_0/\mu}$  の間には式(3-35)の関係が成立する。

$$d_{max} = K G_0^{-\frac{3}{3+K_F}} \text{-----} (3-35)$$

理論式によつて数値計算をするには  $S$ , 実験による場合には  $S_m$  が用いられるが、考えられる凝集条件に対しての  $K$ ,  $K_F$  を与え求めておけば式(3-33) ~ (3-35)によつて  $S$  と  $S_m$  を求めることが出来る。一般の凝集条件下でのフロック密度関数の指数  $K_F$  は 1.0 ~ 1.5 であるから、式(3-35)は実際には式(3-35')のようになる。

$$d_{max} \div K G_0^{-(0.75 \sim 0.67)} \text{-----} (3-35')$$

通常、 $d_1$  は数  $\mu$  のオーダーであり  $d_{max}$  は数百  $\mu$  のオーダーであるから、 $S_m = (d_{max}/d_1)^{3-K_F} = (50 \sim 100)^{2 \sim 1.5} = 350 \sim 10000$  となる。

### 3-6 接触フロック形成式

高速接触沈殿池の撹拌部に浮遊してゐる比較的高濃度の既成フロック群は最大成長平衡分布に近い粒度組成となつてゐる。実装置における通常の撹拌条件下での母フロック群はその直径が  $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ cm}$  の範囲に分布してゐる。一方、高い撹拌強度の急速撹拌によつて形成され、フロック形成

攪拌部に流入して来る初期粒子群は一般に  $10^{-4} \sim 10^{-3}$  cm の範囲のほぼ一様な大きさをもつ微小粒子である。しかかも、接触フロック形成は大径の既成フロック群と小径の初期フロック群との、粒子径の著しく異なる二群の間の衝突合一現象として取扱われる。

平均直径  $D$ ，単位体積中の個数が  $N$  の既成母フロックと直径  $d$ ，で単位体積中の個数が  $n$  の初期フロックとの間の単位時間に単位体積中で生ずる衝突回数は，乱流下における衝突基本式 (3-9) を変形して次式のようにならされる。

$$F = \frac{12}{\sqrt{15}} \pi \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} \left( \frac{D}{2} + \frac{d}{2} \right)^3 N n$$

----- (3-36)

さらに次のような条件を考え、式 (3-37) を実用化する。  
 (1) 既成母フロックは与攪拌条件下で成長平衡状態に達した粒度分布を有しており、既成フロック同志の衝突によつてはフロック群の粒度組成は変化しない。しかかも、既成フロック間の衝突はフロック形成に無効である。  
 (2) 初期フロック同志の衝突は衝突半径が  $d$  であり、既成フロックと初期フロックとの間の衝突半径  $\frac{1}{2}(D+d)$  に比して著しく小さいので初期フロック同志の衝突は事実上無視し得る。  
 (3) 初期フロックと既成母フロック間の衝突半径  $\frac{1}{2}(D+d)$  は既成母フロックと初期フロックの径  $d$  比が  $D/d \div 50 \sim 100$  であるから、近似的に  $\frac{1}{2}(D+d) \div \frac{1}{2}D$  となる。  
 (4)  $D \gg d$ ，よて一般に  $N D^3 \gg n d^3$  であり前章において示されたように、フロックフランセット内のフロックは単一組成から出発した場合に形成されるフロックに比して密度が高いと云った結果から、初期フロックを吸合しても既成フロックの体積の増加は無視しうると考えられる、よて  $N D^3 = \text{const}$  とすることが出来る。しかかも、式 (3-37) は式 (3-38) のように変形される。

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= - \frac{3}{2\sqrt{15}} \pi \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} N D^3 n \\ &= - \frac{9}{\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} V_f n \end{aligned}$$

----- (3-37)

ここで、 $V_f$ ：既成母フロック群の体積濃度（無次元）

既成母フロックへの初期フロックの吸合は、初期フロッ

クの個数濃度に関する1次反応として取扱われる。  
 接触フロック形成において互攪拌条件下で成長平衡に達してゐる既成母フロック群と微小な初期フロック群が衝突-あるが、最大成長粒径  $d_{max}$  にまで成長したフロックは初期フロックを吸合する能力をほとんど有してゐないはずである。しかし、実際にはフロックの形状は完全な球形ではなないので、 $d_{max}$  に達してゐるフロックでもその不整部分を埋めるような形で初期フロックの吸合を行なうことが出来る。さらに、既成母フロック群には粒度分布があり  $d_{max}$  よりも小さな粒径を持つフロックも多数存在する。以上のようになると母フロックの吸合能力は、その体積  $V_i$  にある吸合係数を掛けた  $\alpha_i D_i$  ( $0 < \alpha_i < 1$ ) と考えることが出来る。したがって、既成母フロック群には初期フロックの吸合に有効な部分と無効な部分がある比率で存在することとなる。現在の所はこの比率を明確には表示しえないので、既成フロック群全体について初期フロックの吸合係数を仮定しこれを総括吸合係数(有効衝突係数)  $\bar{P}$  と定義して式(3-38)を補正する。

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{9}{\sqrt{15}} \bar{P} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} V_f n \text{ ----- (3-38)}$$

$$K_{ci} = \frac{9}{\sqrt{15}} \bar{P} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} V_f \text{ ----- (3-39)}$$

$\bar{P}$  の値は、トルクメーターによつて測定した総エネルギー消費率  $\epsilon^*$  より  $\epsilon_0 = 0.1 \epsilon^*$  とし求めた有効エネルギー消費率  $\epsilon_0$  を用いて、 $\bar{P} = 1$  とし計算した  $K_{ci}$  と実測の  $K_{ci}$  とを比較することによつて丹保等は  $\bar{P} = 1/40 \sim 1/45$  程度であろうと推定した。

安全側の数値として  $1/45$  を用いると式(3-38)は

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{1}{5\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} V_f n \text{ ----- (3-40)}$$

$$K_{ci} = \frac{1}{5\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} V_f \text{ ----- (3-41)}$$

したがって、接触フロック形成は攪拌強度指標  $G_0$  と既成フロック体積  $V_f$  のみによつて吸合速度が支配される、初期フロック個数濃度に関する1次反応であるから式(3-42)の形で、時間  $t$  だけ母フロックと初期フロックが反応した

場合に吸収されずに残存してゐる初期フロック個数濃度を示すことが出来る。

$$\frac{n}{n_0} = \exp \left( -\bar{P} \frac{1}{\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu}} V_f t \right)$$

$$\doteq \exp \left( -\frac{1}{5\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu}} V_f t \right)$$

----- (3-42)

ここで、 $n_0$  :  $t = 0$  における初期粒子の個数濃度

### 3-7 まとめ

本章においてフロックの成長過程を表示する基礎式を Levich の乱流衝突関数を基として誘導し、基礎式の無次元化・標準化を行なった。

局所等方性乱流理論に基づき、粘性領域内のマイクロな拡散が律速となる乱流拡散によって、フロッキュレーター内でのフロックの衝突合—現象が進行すると考え次のようにしてフロック形成基本式の誘導を行なった。

急速攪拌の段階を終了してフロッキュレーターへ流入して来る粒子を初期粒子と称しその直径を  $d_1$  とする。フロック形成を論ずるに当りフロックの大きさをその中に含まれる初期粒子の数によって表示する。例えば、初期粒子を  $i$ ,  $j$ ,  $R$  個含むフロックを  $i$ ,  $j$ ,  $R$  倍粒子と呼ぶ。

衝突合—によってフロックの密度が一定に保たれる場合すなわち  $i$  倍粒子の体積が初期粒子の体積の  $i$  倍となっている場合には、 $i$  倍粒子の直径  $d_i$  とその中に含まれる初期粒子数  $i$  とは次式で示される関係にある。

$$d_i = i^{\frac{1}{3}} d_1 \text{ ----- (3-43)}$$

そこで、 $i$  倍粒子と  $j$  倍粒子が衝突する場合の衝突半径  $R_{ij}$  は式 (3-44) で与えられる。

$$R_{ij} = \frac{1}{2} (d_i + d_j) = \frac{1}{2} d_1 (i^{\frac{1}{3}} + j^{\frac{1}{3}})$$

----- (3-44)

しかしながら、フロックが成長するにつれて間隙水の量

が増加しその密度を減じて行く。その場合のフロック径  $ds$  とフロック有効密度  $\rho_e$  の関係は前章の式 (2-6) に示したフロック密度関数で示される。

$$\rho_e = \frac{a}{(ds/i)^{K_S}} \text{-----} (2-6)$$

フロックが式 (2-6) の関係を満足する程度にまで成長している場合には、 $i$  倍粒子の直径  $d_i$  とその中に含まれる初期粒子数  $i$  の関係は式 (3-26) となる。

$$d_i = i^{\frac{1}{3-K_S}} d_1 \text{-----} (3-26)$$

そこで、初期粒子と間隙水がその構造の中に取り込まれて形成されている  $i$  倍粒子と  $j$  倍粒子の衝突半径  $R_{ij}^*$  は、

$$R_{ij}^* = \frac{1}{2}(d_i + d_j) = \frac{1}{2} d_1 \left( i^{\frac{1}{3-K_S}} + j^{\frac{1}{3-K_S}} \right) \text{-----} (3-27)$$

となる。

$i$  倍粒子と  $j$  倍粒子の衝突合-によって生ずる  $R$  倍粒子 ( $R = i + j$ ) の増加と、他の粒子との衝突合-によって  $R$  倍粒子でなくなるものを統計した、 $R$  倍粒子の単位体積中の個数  $n_R$  の消長は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{dn_R}{dt} = & \frac{1}{2} A \sum_{i=1}^{R-1} \left( i^{\frac{1}{3-K_S}} + (R-i)^{\frac{1}{3-K_S}} \right)^3 n_i n_{R-i} \\ & - A n_R \sum_{i=1}^R \left( i^{\frac{1}{3-K_S}} + R^{\frac{1}{3-K_S}} \right)^3 n_i \end{aligned} \text{-----} (3-45)$$

$$A = \frac{3}{2} \pi \beta \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} d_1^3 = - \frac{3\pi}{2\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} d_1^3 \text{-----} (3-46)$$

また、一定の攪拌強度下にある実際のフロッキュレータ  
 ーではフロックがある寸法にまで達すると乱流変動による  
 破壊力がフロックの結合力よりも大きくなり、フロックは  
 一定限度以上には成長しえない。そこで、与攪拌条件下で  
 成長しうる最大フロックへの初期粒子集合数を  $S$  とし、過  
 大成長フロックの破壊が次のような条件で起こると考える。  
 1) フロックは  $S$  倍粒子に至るまでは何等の破壊も伴わず  
 に成長することかできる。

2)  $S$  倍粒子よりも大きな  $R$  倍粒子を作るような  $i$  倍粒子  
 と  $(R-i)$  倍粒子の衝突はフロックの成長には無効である。  
 すなわち、このような衝突がある場合には衝突した粒子は直  
 ちに元の  $i$  倍粒子と  $(R-i)$  倍粒子に解体してしまう。

そこで、 $R$  倍粒子の消長を示す式(3-45)に附加される過  
 大成長フロックの破壊を示す項は次式で与えられる。

$$G(n) = A n_R \sum_{i=S-R+1}^S \left( i^{\frac{1}{3-K_S}} + R^{\frac{1}{3-K_S}} \right)^3 n_i$$

----- (3-47)

したがって、単位体積中で単位時間に生ずる  $R$  倍粒子の  
 消長は式(3-45)と式(3-47)にまつ次式のようになる。

$$\frac{dn_R}{dt} = \frac{1}{2} A \sum_{i=1}^{R-1} \left( i^{\frac{1}{3-K_S}} + (R-i)^{\frac{1}{3-K_S}} \right)^3 n_i n_{R-i}$$

$$- A \sum_{i=1}^{S-R} \left( i^{\frac{1}{3-K_S}} + R^{\frac{1}{3-K_S}} \right)^3 n_i n_R$$

----- (3-48)

今、式(3-15')のようにフロック全量を1としてフロッ  
 クの組成を比率で示し、式(3-16)のような変数変換を行  
 なつて無次元攪拌継続時間  $m$  ( $m$  値)を導入して式(3-48)  
 の無次元化を行なうと、ユニバーサルなフロック形成の基  
 本式を式(3-29)のようを得ることができ。

$$N_i = \frac{n_i}{n_0} \quad \sum_{i=1}^S i N_i = 1 \quad \text{----- (3-15')}$$

$$m = \frac{3\pi}{2\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu}} d_i^3 n_0 t$$

$$\div 1.22 \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu}} d_i^3 n_0 t \text{ ----- (3-16)}$$

$$\frac{dNR}{dm} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{R-1} \left( i^{\frac{1}{3-K_S}} + (R-i)^{\frac{1}{3-K_S}} \right)^3 N_i N_{R-i}$$

$$- N_R \sum_{i=1}^{S-R} \left( i^{\frac{1}{3-K_S}} + R^{\frac{1}{3-K_S}} \right)^3 N_i$$

$$\text{----- (3-29)}$$

式(3-29)は、過大成長フロックの破壊とフロックが衝突合して大形化して行く際に間隙水を取込みその密度を減じて行くことを考え、直径 $d_i$ の初期粒子が $R$ 個集って形成されるフロックの個数比がフロック形成時間 $t$ の経過によってどの様に変化して行くかを示すユニバーサルな形のフロック形成基本式である。

式(3-29)によると、フロック形成過程は $m$ 値、 $K_S$ 値、 $S$ 値(あるいは最大成長フロックと初期粒子の体積比を示す指標である $S_m$ 値)の3つの無次元指標で一義的に表示できる。

基本式中の特性値 $m$ は無次元攪拌継続時間と称し、 $m$ の増加はフロック形成度の増大を意味し他の2つの特性値 $S$ (あるいは $S_m$ )と $K_S$ が一定の場合、すなわちフロックをどこ迄成長させたいかと云った操作上の要求と $A/L$ 比等の凝集条件が決まっている場合には、フロックの集塊状態もしくは粒度分布組成は $m$ 値のみによって決まる。

特性値 $K_S$ はフロックが衝突合して成長して行く際に間隙水を取込みその体積を増大して行く程度を示す数値であり、フロック形成速度を考える場合には、式(3-27)で示すような衝突半径の増大となり有利に作用する。通常の凝集条件では $K_S = 1.0 \sim 1.5$ の範囲の値をとる。

特性値 $S$ (あるいは $S_m$ )はフロックの結合強度によって決まる攪拌条件下での最大フロック径 $d_{max}$ と初期粒子径 $d_i$ によって決まり、式(3-34)、(3-35)を用いて算定することができる。

$$S = \left( \frac{d_{max}}{d_i} \right)^{3-K_S} = S_m^{\frac{3-K_S}{3}} \text{ ----- (3-34)}$$

$$S_m = \left( \frac{d_{max}}{d_1} \right)^3 \text{-----} (3-34)$$

接触高速沈殿池の攪拌部におけるように、与フロック形成条件下での最大成長分布に近い粒度組成を有している既成の大形フロック群に微小フロック群が吸合されて行く現象を接触フロック形成と称する。

この場合、直径  $D$  の単位体積中の個数が  $N$  の既成大形フロックと直径  $d$  の個数  $n$  の微小フロックとの間で単位時間単位体積中で生ずる衝突回数は、

$$F = \frac{12}{\sqrt{15}} \pi \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} \left( \frac{D}{2} + \frac{d}{2} \right)^3 N n \text{-----} (3-36)$$

さらに、微小フロック同志の衝突は衝突半径が著しく小さいので無視し、大形フロックは与条件下での成長平衡状態にあるので大形フロック同志が衝突してもフロック群の組成は変化しないと考える。

上述の様な仮定をおくと、接触フロック形成は大径の既成フロック群と小径の微小フロック群の間での著しく粒子径の異なる二群の粒子の衝突合—現象として取扱うことができる。この場合の微小フロックの大形フロックへの吸合による減少は、微小フロック濃度に関する均—次反応として式(3-37)で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= - \frac{3}{2\sqrt{15}} \pi \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} N D^3 n \\ &= - \frac{9}{\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} V_f n \text{-----} (3-37) \end{aligned}$$

また、既成の大形フロック群が総体として微小フロックの吸合に有効な部分と無効な部分とをある割合で有している点を考慮すると、接触フロック形成による微小フロックの既成大形フロックへの吸合速度は、

$$\frac{dn}{dt} = - \frac{9}{\sqrt{15}} \bar{P} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} V_f n \text{-----} (3-38)$$

$$K_c = \frac{9}{\sqrt{15}} \bar{P} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} V_f \text{-----} (3-39)$$

となる。

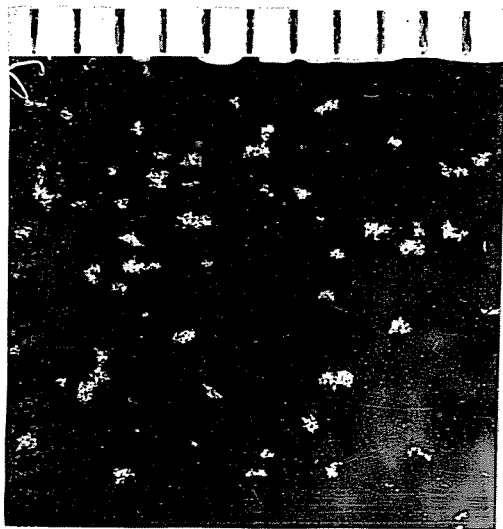
吸合に有効な部分の比率を示す  $\bar{p}$  を総括吸合係数とし、トルクメーターによって測定した総エネルギー消費率  $E_*$  より  $E_0 = 0.1 E_*$  として求めた有効エネルギー消費率  $E_0$  を用いて  $\bar{p} = 1$  として計算した  $K_c$  と実測の  $K_c$  とを比較して  $\bar{p} = 1/40 \sim 1/45$  と推定された。

そこで、安全側の数値として  $\bar{p} = 1/45$  を用いて最終的に求められた微小フロックの減少速度を与える式は、

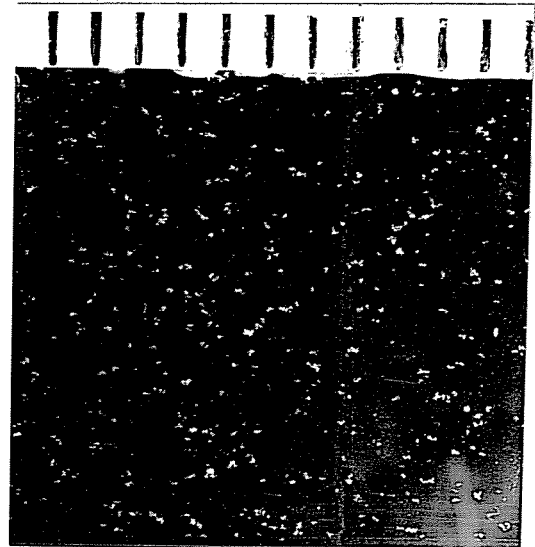
$$\frac{dn}{dt} = -\frac{1}{5\sqrt{15}} \sqrt{\frac{E_0}{\mu}} \nabla_f n \text{ ----- (3-40)}$$

$$K_c = \frac{1}{5\sqrt{15}} \sqrt{\frac{E_0}{\mu}} \nabla_f \text{ ----- (3-41)}$$

ハナうに定められる。



破壊前のフロック群



破壊後のフロック群

写真(3-1)

表(3-1) 初期粒子の粒度分布例  
(原水濁度 50 ppm, pH 7.7)

| 凝集剤<br>$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$<br>注入率 ppm | 粒度分布 (%) |          |          |          | 平均粒径<br>( $\mu$ ) |
|-----------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|-------------------|
|                                               | 10 $\mu$ | 20 $\mu$ | 30 $\mu$ | 40 $\mu$ |                   |
| 30                                            | 73.5     | 27.7     | 2.4      | 1.4      | 13.0              |
| 50                                            | 54.6     | 38.3     | 4.7      | 2.4      | 15.5              |

表(3-2) 初期粒子の粒度分布例

| 粒 径                               | 0 ~ 3 $\mu$ | 3 ~ 5 | 5 ~ 10 | 10 ~ 15 | 15 ~ 20 |
|-----------------------------------|-------------|-------|--------|---------|---------|
| カオリン                              | 83.3 %      | 8.3   | 7.0    | 0.9     | 0.5     |
| 微孔珪砂<br>( $G^* \div 19 (1/sec)$ ) | 42 %        | 26    | 24.2   | 6.5     | 1.3     |
|                                   | 47.1 %      | 23.5  | 24.8   | 3.8     | 0.8     |

### 参考文献 (第3章)

- 1) Hinze, J.O., Turbulence, McGrawhill Book Co., p.142 - 246, 1959
  - 2) Batchlor, G.K., Kolmogoroff's Theory at Locally Isotropic Turbulence, Trinity College, Cambridge, 1946.12
  - 3) Levich, V.G., Physicochemical Hydrodynamics, Prentice-Hall Inc., p.213 - 219, 1962
  - 4) Fuchs, N.A., The Mechanics of Aerosols, Pergamon Press Ltd. p.334, 1964
  - 5) 丹保憲仁・山田浩一・穂積 準, フロック強度に関する研究, 水道協会雑誌, 427号, p.4~15, 昭.45.4
  - 6) 丹保憲仁, フロック形成過程の基礎的研究(I)—Conventional型におけるフロック形成, 水道協会雑誌, 372号, p.10~19, 昭.40.7
  - 7) 丹保憲仁, フロック形成過程の基礎的研究(Ⅲ)—強制攪拌下での接触フロック形成, 水道協会雑誌, 382号, p.9~21, 昭.41.7
  - 8) Camp, T.R., Stein, P.C., Velocity Gradients and Internal Work in Fluid Motion, Jour. Boston Society of Civil Engrg., Vol.30, 1943.10
  - 9) Camp, T.R., Flocculation and Flocculation Basins, Proc. ASCE., Vol.79, No.283, p.283.1 - 283.18
- 注) この章の一部はすべて下記の論文で発表済みである。  
丹保・穂積・渡辺, フロッキュレーターの合理的設計(I), 水道協会雑誌, 431号, 昭.45.8, p.20~27

## 第4章 フロック形成理論の実験による展開

### 4-1 はじめに

前章で明らかにしたように、乱流フロッキュレーターにおけるフロック形成過程は式(3-29)によって示される。さらに、最大成長度  $S_m$  (フロックをどこ迄成長させるか)、とフロック密度関数の指数  $K_f$  (フロックの性状はどのようなか) が与えられれば、フロック形成過程は無次元指標  $m$  のみに従うことも明らかにされた。また、フロック密度関数の指数  $K_f$  が同じであれば、最大成長度  $S_m$  は攪拌強度指標  $\sqrt{E_0}/\mu$  によって決まり、 $S_m$  をどの値にとるべきかは次段の沈殿池の表面負荷率との関係で決まる。

通常のフロック形成操作における最大成長フロック径は初期粒子径の 50~100 倍にも達する。したがって、式(3-34)によれば最大初期粒子集合数は  $S = (50 \sim 100)^{1.5 \sim 2.0} = 350 \sim 10000$  (ここで  $K_f = 1.0 \sim 1.5$ ) と云った値となる。式(3-29)を用いてフロック粒度組成の変化を計算によって求めるとすれば  $3.5 \times 10^2 \sim 10^4$  元の膨大な元を持った連立微分方程式を解かなければならない。

本章ではフロック形成基本式を数学的に解く代わりに、一連の実験によって粒度分布がフロック形成の進行につれてどのように変化して行くかを実測し、理論式の指標を用いてフロック形成過程を普遍化すると云った理論式の実験的展開によって、フロック形成過程を明らかにし、実装設計のための基準を得ようとするものである。この方法では理論方程式誘導の際に用いた集塊の前後にフロック形が同じであるとする理論式誘導上の避けられぬ仮定の不備から来る、理論計算結果の実際の粒度分布からのへだたりを消去して実用的により確からしい粒度分布を示すことが出来る。

### 4-2 実験用フロッキュレーターの特長

#### 4-2-1 実験用フロッキュレーターの構成

実験は写真(4-1)に示すような角型水槽に水平パドル型攪拌機を備えた回分式フロッキュレーターによって行なわれた。水槽の寸法は縦横共に 60cm、深さ 80cm である。攪拌翼は 120° づつ腕本を 3 つに振り分けた 3 葉のタブレードで装置全体の寸法は図(4-1)に示す通りである。各々の腕本には幅 1.5cm、長さ 55cm のブレードが 6cm 間隔で各 3 枚づつ取付けられている。最も外側のブレードの中心と

回転軸の中心との距離は25cmである。フロック形成槽の直角的な2面は厚さ5mmのアクリル板でできしており、内部の観察と写真撮影が可能になっている。  
攪拌翼の駆動は1/2 HPの反捲型電動機を動力とし、多段変速機を介して70.0, 20.0, 13.0, 10.0, 8.0, 6.5, 5.1, 4.0, 3.3, 2.5, 2.0 r.p.m.の回転数を長時間正確に保ちうるように設計されている。

#### 4-2-2 有効エネルギー消費率 $\epsilon$ の推定

本論文で用いられるフロック形成理論では、フロッキュレーターの攪拌特性を一括表示する唯一の数値が有効エネルギー消費率 $\epsilon$ である。そこで、装置特性の指標化のためには与攪拌条件下におけるエネルギー消費率の大きさを第1に確定しなければならぬ。エネルギー消費率を求める方法としては、1)直接にエネルギー損失を求める方法と、2)間接的に推算する方法の2つがある。前者に属するものとしては、管路の場合のように損失水頭から求める方法と縦軸型攪拌機のようにトルクメータを用いてエネルギー損失を求める方法等がある。しかしながら、一般のフロック形成操作で用いられているような横軸型の低速攪拌機では、軸摩擦伝達損失等によって失われるエネルギー量の割合が、水流によって失われるエネルギー量に比して極めて大きく、直接測定する良い方法は今の所見当たらない。したがって、何らかの間接的方法で推定せざるを得ないのが現状である。

間接的に推算する方法としては、1)接触フロッキ形成による方法と、2)最大成長フロッキ径の比較を行なう方法の2つがある。前者は主として実験室規模で利用する方法で本実験で用いたフロッキュレーターの $\epsilon$ の測定は同法による。後者は何らかの方法で有効エネルギー消費率 $\epsilon$ が明らかになっているフロッキュレーター中で最大成長に達したフロッキ径と、測定した攪拌強度下での最大フロッキ径を比較することによって未知の攪拌強度を推算しようとするものである。測定精度は劣るが実験池における機械式フロッキュレーターの有効攪拌強度を推定するための現存する唯一の方法と考えられる。

次に、この実験で用いたフロッキュレーターの有効エネルギー消費率 $\epsilon$ を推算する方法・手順について略述する。第3章6節で述べたように、一定の母フロッキ群(既成の微小フロッキ群)の存在下で、接触フロッキ形成による微小フロッキ数の減少は式(3-40)で示された。

$$\frac{dn}{dt} \div -\frac{1}{5\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu}} V_f n \text{-----} (3-40)$$

$$\frac{n}{n_0} \div \exp\left(-\frac{1}{5\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu}} V_f t\right) \text{-----} (3-42)$$

ここで、 $n$ : 単位体積中の微フロック数 ( $1/\text{cm}^3$ ),  $n_0$ : フ  
 ロック形成を開始した瞬間 ( $t=0$ ) の単位体積中の微フロ  
 ック数 ( $1/\text{cm}^3$ ),  $V_f$ : 母フロックの体積濃度 (無次元),

$$V_f = \frac{1}{6} \pi \sum D_i^3 \text{-----} (4-1)$$

ここで、母フロックの直径 (cm)

微フロック粒子濃度  $n$  が微フロックのみの濁度  $C_T$  に比  
 例するものと考え、 $n/n_0 \div C_T/C_{T_0}$  とおくことができる。  
 式 (3-42) の両辺の対数をとると

$$\left. \begin{array}{l} \log_{10} n - \log_{10} n_0 = -k_{c1} t \\ \log_{10} C_T - \log_{10} C_{T_0} = -k_{c1} t \end{array} \right\} \text{-----} (4-2)$$

$$\text{ここで、} k_{c1} = \frac{1}{5\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu}} V_f \log_{10} e \text{-----} (4-3)$$

そこで、以下に示すような実験を行ない、個々の実験結  
 果を横軸に攪拌継続時間  $t$  をとり縦軸に残存濁度の対数を  
 とってプロットすると、理論を満たすならば実験値は1本  
 の直線上に並び、その勾配が式 (4-3) に示した  $k_{c1}$  を示す。  
 $k_{c1}$  が求められると式 (4-3) を変形した式 (4-4) によって  
 $\varepsilon_0$  が計算できる。

$$\varepsilon_0 = \frac{375 \mu k_{c1}^2}{(\log_{10} e V_f)^2} \text{-----} (4-4)$$

ここで、 $e$ : 自然対数の底  $\div 2.718$

式 (4-4) の運用に必要なフロック体積濃度  $V_f$  は本章3  
 節に述べる測定法によって求め、式 (4-1) を用いて計算し  
 たい。

微フロックの減少速度を求める実験を次に簡単に述べる

こととする。(1)フロック形成槽内に所定量(216 $\text{l}$ )の水を満す。(2)母フロックを生成するため所定量の濁質(カオリン濃度 50ppm)と凝集補助剤を注入し、20r.p.m.で3分間完全に混和する。(3)所定量の凝集剤(硫酸アルミニウム 30ppm)とpH調整剤を注入し20r.p.m.で1分間急速攪拌を続ける。(4)その後6.5~10.0 r.p.m.の範囲の所定の回転数で30~40分間フロック群の成長が止まるまでフロック形成攪拌を続ける。(5)母フロック形成のための最後の段階で母フロック径 $D_i$ を求めるためのフロックの接写撮影を行なう。(6)次いで1 $\text{l}$ ビーカーにカオリンをけん濁させ、ジャーテスターで250 r.p.m.の攪拌を加えつつ所定量の凝集剤(硫酸アルミニウム)を加え、2~3分間急速攪拌を行なった後の微フロックを含む水をフロック形成槽に注入する(微フロック形成の際のpHは母フロック形成時のpHと等しくした)。(7)注入終了時を接触時間0として以下所定の時間間隔で不攪乱採水を行なう。(8)採水された試料は30分間静置され、上澄部50mlをホウルピペットにより採水し試料をよく振ってフロックを完全に破碎した後濁度を測定する。このようにして、各攪拌継続時間ごとの非吸合(母フロックは壊れない)微フロック量を濁度として求めることができる。(9)濁度の減少が見られなくなるまで、同様の採水・測定を繰り返す。本実験では2分間隔で採水を行なった。

得られた残留濁度と攪拌時間の関係を示す片対数プロットは図(4-2)のようである。図(4-2)の直線の勾配から求められた $K_{cl}$ と接写撮影によって得られた $\nabla f$ を用いて、式(4-4)から $\varepsilon_0$ を求めることができる。実験の結果を整理すると表(4-1)のようになる。さらに、これらの結果を用いて攪拌回転数 $N_r$ と有効エネルギー消費率 $\varepsilon_0$ の関係を描くと図(4-3)のようになり、エネルギー消費率 $\varepsilon_0$ が攪拌回転数の3乗に比例する乱流条件下の特性を示している。

乱流攪拌槽の有効エネルギー消費率は一般に知られている動力関数から次のような形に変形される。

$$\varepsilon_0 = \frac{P_0 g_c}{V} = K_e \rho n_r^3 d^{5/4} \left\{ \begin{array}{l} \text{-----} (4-5) \\ \frac{d^2 n_r}{D} > 10^4 \text{ (完全乱流条件)} \end{array} \right.$$

ここで、 $P_0$ : フロック形成に有効な動力消費量( $\text{g-force cm/sec}$ )

大略攪拌槽の全動力消費量  $P$  は  $0.1 \sim 0.15$  程度を掛けられた数値， $g_c$ ：重力換算係数 ( $g\text{-mass} \cdot \text{cm} / g\text{-force sec}^2$ )， $V$ ：攪拌槽の体積 ( $\text{cm}^3$ )， $\rho$ ：水の密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )， $N_r$ ：翼の回転数 ( $\text{r.p.s} = \text{Nr}/60$ )， $d$ ：攪拌翼の直径 ( $\text{cm}$ ) 最外周部のパドルまでの回転軸からの距離が通常用いられる。 $\nu$ ：水の動粘性係数 ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )。

式(4-5)は幾何学的形状の等しい攪拌槽に対して近似的に成り立つと考えられるので，無次元係数  $K_E$  を求めておけばスケールアップの際に有用である。形状を異にするフロッキュレーターに対して各々別個に  $K_E$  を求めねばならない。本実験に用いたような形状のフロッキュレーターについては， $N_r = 0.1 \text{ r.p.s}$  で  $E_0 \div 9 \times 10^{-2} \text{ erg}/\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$ ， $\rho = 1 \text{ g}/\text{cm}^3$ ， $d = 25 \text{ cm}$ ， $V = 216 \text{ l} = 2.16 \times 10^5 \text{ cm}^3$  であるから  $K_E \div 1.90$  となる。式(4-5)のレイノルズ数  $d^2 N_r / \nu$  を実験の場合の最低回転数について計算してみると， $d = 25 \text{ cm}$ ， $N_r = 6.5/60 \div 0.1$  であるから  $d^2 N_r / \nu = 7 \times 10^3$  となった。一般に云われている完全な乱流ではない。一方，完全な層流の式は  $d^2 N_r / \nu < 10$  で定義されるので，この実験の範囲はほとんど乱流域と考えた良い遷移領域であろう。

#### 4-3 フロック粒度分布の測定と表示

前節で述べたように，攪拌エネルギー消費率  $E_0$  で特性を定義されたフロッキュレーターに粒子径  $d_1$ ，個数濃度  $n_0$  の急速混和が終了した小フロック群（これらを初期粒子と称する）が流入してまた衝突融合を繰返し，フロック形成時間の経過に伴ってその粒度分布が変化して行く。そして遂にはそのフロッキュレーターで達しうる最終的な粒度分布（最大成長平衡粒度分布）に至る。本節ではその過程を追うための測定と得られた粒度分布の表示について述べる。

##### 4-3-1 初期粒子径 $d_1$ と初期粒子数 $n_0$ の測定

理論式中の  $m$  値を構成する因子の中でフロック粒度分布の初期値を示す  $d_1, n_0$  も急速攪拌を終了した時点でのフロック群について知らねばならない。初期粒子径  $d_1$  は凝集条件，急速攪拌の強度と継続時間によって異なるが  $100 \mu$  を越える場合も稀にはある。粒子径が数十  $\mu$  を越える場合には次の(4-3-2)節で述べるような接写撮影による方法を用いれば良いが，初期粒子径は一般には数  $\mu$  程度の極めて小さな粒子であるから，この場合には顕微鏡を用いて

測定した。ここではその測定方法について説明する。

まず攪拌槽よりサイフォンで初期粒子を含む水を採取し図(4-4)に示すような枠付スライドガラスに0.5ccだけ試料をとる(この場合の試料の厚さは0.5mm)。試料中の粒子がスライドガラスの表面に沈降するのを待って、碁盤目のオキユラマイクロスコープを付した顕微鏡下で初期粒子群の撮影を行ない、そのフィルムをプロジェクターにかけ拡大し粒子寸法と個数を測定する。

写真(4-2)は20r.p.m.(急速攪拌にしては比較的弱い攪拌強度に属する)1分間の急速攪拌を行なった場合の初期粒子群の顕微鏡写真である。写真から判明するようこの場合はほとんどの粒子が $5\sim 5\mu$ mである。しかし、20r.p.m.の急速攪拌も5分、10分と延長すると数十 $\mu$ m以上にも及ぶ粒子が混存して来るようになる。表(4-2)は各々の初期粒子生成条件での $\phi$ ,  $n_0$ を示してあるが5分、10分の場合には上述のよう分布を一樣と見なすことができないうで、平均値をもつ $\phi$ ,  $n_0$ とした。

#### 4-3-2 フロック粒度分布の測定

写真(4-3), 図(4-5)に示すようなフロック撮影用セルを写真(4-1)に示したようなフロック形成槽に付し、槽の水面上15cmの位置からベルマウスを付したサイフォンで試料をフロックの破壊が生じない流速(5cm/sec位)でゆっくりと流出させる。1眼レフアサヒペンタックスカメラにベローズを付した接写撮影装置を用い、ストロボによる短時間露出( $1/1000 \sim 1/3000$ )で高コントラストフィルム(フジミニコピー)上にセル中のフロックをツヤープに撮影する。この際、セルの厚さは2mmであるからレンズの焦点深度が充分 $2\text{mm}$ となるようにしてセル内の全厚さの粒子を明瞭に写し出すようにしておく。本実験では50mmレンズの下値8~11でこの条件を満たした。撮影されたフロック群の1個が写真(4-4)である。

単位体積中のフロック数とフロック径を求めるために、現像したフィルムをプロジェクターにかけ一定倍率(本実験では50倍)に拡大し一定の撮影面積内にあるフロックの径と数を測定し、セル内のスケールと対比させてフロックの半径を求める。本研究に用いたフロック径はすべて二軸平均径であり、長径と短径の平均値を示すものであり長径と短径の比は大概1.5:1程度であるから、長径と二軸平均径の比は1.2:1程度となる。

また、各粒径のフロックの単位体積中の個数 $n$ は式(4

-6) で計算される。

$$n = \frac{\bar{n}}{A \cdot b} \text{------(4-6)}$$

ここで、 $n$ : 単位体積中の考える粒径のフロックの個数 ( $1/\text{cm}^3$ )、 $\bar{n}$ : 撮影した二次元平面内のフロック個数、 $A$ : 投影面積 ( $\text{cm}^2$ )、 $b$ : フロック撮影用セルの厚さ ( $\text{cm}$ )。

丹保らが先に用いた直接槽内のフロックを撮影し式(4-6)の  $b$  の代わりにレンズの焦点深度  $F$  を用いる方法に比べて、ここで用いたような一定の厚さのセルを用いる方法は写真撮影の結果から焦点深度内のフロックの判定を行なうと云うわずらわしさは無く、誤差を少なくしうる。この場合、フロックの取り出し管内でのフロック形成・破壊が測定値に影響を及ぼさぬことを予め確認しておくことが必要である。この点を考え、フロック化のすみやかな高濃度のフロック群には用いえない方法であろう。

#### 4-3-3 フロック群粒度分布変化(フロック群成長)の追跡

前述のフロッキュレータを用いた表(4-3)のような凝集フロック形成条件で、次のような手順でフロックを形成させその粒度組成変化を追跡した。

① フロック形成槽に自家用水道水 216 l を満たす。② 接写撮影用カメラを所定の位置に固定する。③ 急速攪拌を開始する。④ 一昼夜水になじませておいたカオリンを所定量注入する。⑤ 凝集後の pH が 8.0 となるように NaCl で pH の調整を行なう。⑥ 凝集剤として硫酸アルミニウムを所定量注入する。⑦ 硫酸アルミニウム注入後所定時間急速攪拌を継続する。⑧ 初期粒子を測定するため試料を採取する。同時に急速攪拌に切りかえる。⑨ 所定回転数で攪拌を続けながら一定時間間隔で粒度分布の測定を行なう。

フロック径が 100  $\mu$  以下のものについては写真上の一方向径をとり、100  $\mu$  以上のものについては長径と短径の平均径をフロックの寸法とした。フロック粒度分布の測定に当り、50  $\mu$  以下の粒子は無視することとした。それは、50  $\mu$  以下の粒子は非常に短時間に消滅することが知られており、たとえ存在したとしても沈殿処理の対象とはならぬと推測されるためである。

実験の例を実験 Ex-7 の急速攪拌 8 分 P. m. で 12 分継続

のものについて示すと次の通りである。  $t = 12 \text{ min} = 720 \text{ sec}$  , 表(4-2)から  $d_1 = 7.5 \times 10^{-3} \text{ cm}$  ,  $N_0 = 5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$  , 表(4-1)から  $N_p = 8 \text{ r.p.m}$  で  $E_0 = 1.9 \times 10^{-1} \text{ erg/cm}^3 \cdot \text{sec}$  , 水温  $10^\circ \text{C}$  で  $\mu = 1.31 \times 10^{-2} \text{ poise}$  であるから, これらの数値によって定められる無次元攪拌継続時間  $m$  は式(3-16)によって次のように計算される。

$$m = 1.22 \sqrt{\frac{E_0}{\mu}} d_1^3 N_0 t = 1.22 \sqrt{\frac{1.9 \times 10^{-1}}{1.31 \times 10^{-2}}} (7.5 \times 10^{-3})^3$$

$$(5 \times 10^3) (7.2 \times 10^2) \div 7.1$$

$m \div 7.1$  におけるフロック粒径と沈降速度分布を示したものが表(4-4)である。表中の第1欄はフロック径を  $50 \mu$  ごとに分級し, 第2欄に分級に所属する個数濃度を示してある。第3欄は全個数を100とした場合の各級の個数である。第4欄のフロック密度は式(2-6)のフロック密度関数を用いて, 各粒径に対応する密度を算出したもので関数中の係数  $a \cdot K_p$  の値は図(2-20)から求めた。この実験では濁質  $50 \text{ ppm}$  の硫酸アルミニウム  $30 \text{ ppm}$  を注入したもので  $A$  と  $T$  の比は  $0.06$  程度となり,  $K_p \div 1.25$ ,  $a = 4 \times 10^{-4}$  と云った値となる。第4欄のフロック密度の算定に用いた  $f_f = 1 + f_e = 1 + (4 \times 10^{-4} / d_s^{1.25})$  を  $f_e$  と  $d_s$  について両対数グラフ上にプロットすると図(4-6)のようになる。径が  $3 \mu$  程度のカオリン自体の密度は  $2.65$  程度であるが, 直線を粒径  $3 \mu$  の所で延長すると粒径  $10 \sim 15 \mu$  の所で  $f_e \div 1.6$  に達してゐる。本論では簡単のため  $12 \mu$  以下の粒子はその有効密度を  $1.65 \text{ g/cm}^3$  とし,  $12 \mu$  以上について密度関数を用いて粒径の増大に伴う密度変化を計算した(この点については第2章参照)。第5欄はフロックの級別体積で, 1・2欄の数値により粒子を球として計算した。第6欄のフロック重量は第5欄の体積  $V_i$  に第4欄のフロック密度を掛けて求められる。第7欄には第6欄のフロック重量と第2欄の個数濃度を掛けて級別重量が与えられている。その結果を百分率にして無次元表示したのが第8欄の数値である。

第1欄のフロック径  $d_f$  に対応する第8欄の級別重量比を種々の  $m$  について求めた1例として,  $m = 7.1$  における無次元フロック粒度別重量分布が図(4-7)のようになっている。  $m$  値を種々変化させて表(4-4)のようない計算を行ない粒度分布を求め, 攪拌継続時間  $m$  に伴う諸寸法粒

子  $\{ R_m \text{ 倍粒子, } R_m = (d_f/d_i)^3 \}$  の消長を一例に示すと図(4-8), (4-9) のようである。図(4-8)は最大成長度  $S_m$  が 510 と云った小さな場合, 図(4-9)は  $S_m$  が  $2.0 \times 10^6$  と云った大きな場合について示してある。

#### 4-3-4 無次元化時間沈降累積量曲線 ( $m$ -曲線)

フロック形成は主として次段階での沈降操作による固液分離を目的として行われるものであるから, フロック形成度を沈殿池での除去の推算が容易なように表示するのが便利である。存在する粒子群の沈降性を表すために, 次のように定義される無次元時間沈降累積量曲線を用いることとした。すなわち, 初期粒子が所定の水深  $h$  を沈降させるに要する時間を 100% とした無次元沈降時間  $\theta$  だけ沈降時間を採った場合に, 存在するフロック群の内何%が沈殿除去されるかを示す直線である。フロック形成度を示すパラメーターとして無次元攪拌継続時間  $m$  を用いると, 無次元化時間沈降累積量曲線 ( $m$ -曲線) は横軸に無次元沈降時間  $\theta$ , 縦軸に除去百分率  $g(\theta)$  をとり  $m$  をパラメーターとした曲線群として構成される。

ある凝集条件で無次元時間  $m$  だけフロック形成を継続して得られたフロック群を, 無次元沈降時間  $\theta$  だけ静水中で沈降させた場合の水深  $h$  に累積するフロック量は次の諸式で定義される。

$$\theta = \frac{T_s}{T_{s1}} \times 100 \quad \text{----- (4-7)}$$

$$W_\theta = \frac{h}{T_s} \times 100 \quad \text{----- (4-8)}$$

$$g(\theta) = 100 \sum_{i=\theta_{d-\min}}^{\theta_{d-\max}} \frac{W_i}{W_\theta} W_i^*, \quad \theta \leq \theta_{d-\max} \quad \text{---- (4-9)}$$

$$g(\theta) = 100 \sum_{i=\theta_i}^{\theta_{d-\max}} W_i^* + 100 \sum_{i=\theta_{d-\min}}^{\theta_{i-1}} \frac{W_i}{W_\theta} W_i^*$$

$$\theta_{d-\max} < \theta < \theta_{d-\min} \quad \text{---- (4-10)}$$

ここで,  $\theta$ : 無次元沈降時間,  $T_s$ : 実沈降時間 (min),  
 $g(\theta)$ : 無次元沈降時間  $\theta$  の間に水深  $h$  に沈殿累積したフロ

ムック量の全フロック量に対する百分率(%)， $i$ ：フロックの級分け番号， $i=1$ は最小粒子(初期粒子)， $i=\max$ は最大径の級のフロック， $w_i$ ： $i$ 番目のクラスに属するフロックの沈降速度(cm/sec)， $w_0$ ：時間 $T_0$ で水深 $h$ を沈みきるフロックの沈降速度(cm/sec)， $w_i^*$ ： $i$ 番目の級に属するフロック群の全フロック量に対する比率(%)， $\theta_{d-\max}$ ：最大径の級のフロックが水深 $h$ を沈みきるに要する沈降時間， $\theta_{d-\min}$ ：最小径のフロックが水深 $h$ を沈みきるに要する沈降時間，これを100%とする， $\theta$ ：無次元沈降時間 $\theta$ で100%沈降するフロックを示す級番号。

式(4-7)から式(4-10)に代わって実験データを整理して無次元化時間累積量曲線を描く手順は次のようである。

(i) ある攪拌継続時間 $m$ でのフロック群について， $\theta$ を0から100%まで適当な間隔でさざみ式(4-7)～式(4-10)を用いて沈降体積百分率を求める。次に，測定を行なったすべての $m$ について(i)の計算を行ない，横軸に無次元攪拌継続時間 $m$ 縦軸に累積除去百分率をとり無次元沈降時間 $\theta$ をパラメータにとった曲線群を描く。図4-7について求めた例が図(4-10)である。(ii)この様にして求めた図を用い，横軸に無次元沈降時間 $\theta$ を縦軸に累積除去百分率をとって $m$ を適当なさざみのパラメータとした図を描くと，図(4-11)～図(4-15)のようになり求める無次元化時間沈降累積量曲線が得られる。(iii)ここで描かれた無次元化時間沈降累積量曲線は， $S_m = (d_{\max}/d_i)^3$  によってその実験条件を表示してあるので，これを使用する場合には与条件下におけるフロックの最大成長度 $S_m$ を明らかにしておかなければならない。ここでは，最大成長平衡時の曲線を作成する元となったフロック写真から最大成長径を実測して求め図の見出しに $S_m$ として記した。

以上の様にして求めた無次元化時間沈降累積量曲線を必要 $S_m$ の範囲について作成しておけば，任意の無次元攪拌継続時間におけるフロック群の沈降性を容易に評価することが出来る。

#### 4-3-5 標準化自平衡 $m$ -曲線

図(4-11)～図(4-15)に示したように，過大成長フロックの破壊によって $m$ がある値まで増加して来るとフロック群の成長が止まる。このような状態を成長平衡とここでは称する。成長平衡状態が出現するような場合には，その時の粒子群の粒径分布は初期条件と独立に1つの定まった

型となることを，SwiftとFriedlanderが明らかにし，Wang, Hidy もこのような事実を確かめている。このように，成長平衡時の粒度分布形が一定形となる現象は一般に Self-preserving (自平衡) と呼ばれる。

SwiftとFriedlanderの自平衡モデルは，ある一定の大きさ以上の粒子は着目してゐる要素から沈降して消滅するといった条件に対して求められたものであるが，一定の大きさ以上の粒子の存在が許さないと云った状況は乱流下で操作されてゐるフロッキュレーター内においても適用しえるものである。したがって，成長平衡時におけるフロッキ群の粒度分布は自平衡分布となつており，初期条件と独立にフロッキ形成を表示する適当な変数についてある変数変換を行なえば，1つの定まった分布に帰一させることが可能であろうと推論される。もし1つの分布形で示すことができれば，成長平衡時の分布について種々の  $S_m$  について前節で求めた  $m$ -曲線を用意するわけがなくなる。

図(4-11)～図(4-15)の成長平衡に達した曲線はその時のフロッキ粒径分布を間接的に示すものであるから，もし分布が同一形を有してゐるならば，各々の図の横軸を適当に伸縮してやると1本の曲線に帰一させることができるはずである。この方法は誤差関数等の標準化の場合と同じである。そこで，図(4-11)～図(4-15)の横軸に適当な係数  $K^*$  を掛けて曲線を水平方向に伸縮させ，1本の標準化時間累積量曲線に帰一させる試みを次のような手順で行なつた。

1) 式(4-11)のような標準化関数を定義する。

$$\theta^* = K^* \theta \text{ ----- (4-11)}$$

ここで， $\theta^*$ : 標準化された無次元沈降時間， $K^*$ : 標準化係数， $\theta$ : 無次元沈降時間。

2) 簡単のために， $g(\theta^*) = 50\%$  で  $\theta^* = 1.0$  となるような成長平衡曲線を標準化自平衡  $m$ -曲線として指定する。

3) そこで，図(4-11)～図(4-15)の成長平衡  $m$ -曲線の  $g(\theta) = 50\%$  を示す  $\theta$  がすべて  $\theta^* = 1.0$  の所に集まるように標準化係数  $K^*$  を定める。すなわち， $g(\theta) = 50\%$  をすべて最大成長平衡曲線についてそろわせる。例えば  $S_m = 3.4 \times 10^6$  の場合は， $g(\theta) = 50\%$  で  $\theta = 0.33\%$  である

から、 $K^* (3.4 \times 10^6) = 1/0.33 = 3.00$ となる。同様にして、他の諸条件における  $g(\theta) = 50\%$  を与える  $\theta$  によって  $K^*$  を求めた結果は表(4-5)のようである。横軸に最大成長度  $S_m$  の対数をとって縦軸に  $K^*$  をとってプロットすると、図(4-16)のような直線関係が存在し任意の  $S_m$  に対する  $K^*$  を容易に推定できる。

二) 図(4-11) ~ 図(4-15)の横軸の値にそれぞれ表(4-5)の標準化係数  $K^*$  を掛けて、最大成長平衡時の曲線のプロットを行なうと図(4-17)のようになる。図から明らかなように、このような操作によって作成された成長平衡曲線は1本の標準化曲線に帰一され、予想したように成長平衡時のフロック粒度分布は自平衡性を持つてゐることが分かる。そこで、すべての成長平衡粒度分布は図(4-16)と図(4-17)を併用して一義的に示すことが可能となった。

#### 4-4 自平衡分布とフロック形成時間の関係

##### 4-4-1 フロック粒度分布の推移速度

図(4-11)から図(4-15)に見られるように、フロック形成の初期には極めてすみやかに粒子群が成長して行く。しかし、フロック粒度分布が平衡状態に近づくにつれて、一定の攪拌継続時間の増分に対するフロック群の成長率(沈降性の増大率)は急速に低下する。このことは次のような機構を考へることによって説明できる。すなわち、最初一様に分布してゐると考へられる初期粒子が衝突合一行を返し集塊化が進行して行く場合、その初期段階においては衝突して合一行確率は高い。したがって、この段階でのフロック群の成長は比較的速かに行なわれる。ここではフロック群の成長を律するものは個々のみであつて、その増加に伴うフロック形成(粒子群の成長)の進行は著しい。しかし、粒子群の一部が与へられた攪拌強度で規定される最大成長径に近づくにつれて、衝突した粒子同志が合一行でゐる確率は徐々に低くなり、個々の増分(衝突回数が増加)に対するフロック形成速度の増加率は小さくなる。フロック粒度分布がどんどん成長平衡に近づくにつれてフロック成長には無効となる衝突の回数が増加し、遂には完全な成長平衡分布に達するまでの衝突がフロックの成長に無関係となる。したがって、フロックの破壊が生じてゐる終期のフロック成長段階では、フロック形成速度(粒度分布の推移速度)は他の最大成長度  $S_m$  にも影響されるよ

うになる。

図(4-18)に例示した実験結果が示すように、 $m$ 値によつて主として支配される初期段階でのフロックの成長は極めて短時間にしかも大幅なフロック形成を伴、マ終了し、最大成長度  $S_m$  が現象に関与するようになってからの比較的少ない割合のフロック成長で大半の攪拌時間が費される。したがつて、フロック群が最大成長平衡に至るに要する無次元攪拌継続時間  $m_e$  は最大成長度  $S_m$  と何らかの関係を有するはずである。(衝突した内の合一する割合がどのようになるかについては第5章3節で詳細に述べることにする。ここでは、単に衝突合一確率が存在することを提示するにとどめる)。

#### 4-4-2 自平衡分布に至るに必要なフロック形成時間

図(4-19)は前述の関係がどのようなようになっているかを確認するため、図(4-11)～図(4-15)に示された実験での最大成長平衡に達するに要する無次元攪拌継続時間  $m_e$  と最大成長度  $S_m$  の関係を両対数グラフ上にプロットしたものである。図(4-19)から明らかなように  $m_e$  と  $S_m$  は両対数グラフ上で直線関係を持ち、式(4-12)のような関数形でその関係を示すことができる。

$$\log m_e = A \log S_m + \log B \text{-----}(4-12)$$

実験結果の示すところによると、 $A \div -0.2$  であり最大成長度  $S_m$  が大きくなる程自平衡分布に達するに要する無次元攪拌継続時間  $m_e$  が減少して行くことを示している。

同様のプロットをバイオフィロッキュレーターに於ける実験結果に於ける行なったものから図(4-20)である。図(4-20)では無次元攪拌継続時間として  $m_e$  の代わりに、 $G^* C_v T^* = \sqrt{\epsilon^*/\mu} C_v T^*$  を用いている。この場合も、式(4-12)と同様の式(4-13)が成立する。 $C_v \div C_T$  とすると、

$$\log [G^* C_T T^*] = A' \log S_m + \log B' \text{-----}(4-13)$$

図から  $A' = -0.2$  となる。

$$m_e = 1.22 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} d_i^3 n_0 t \propto G^* C_v T^* \text{-----}(4-14)$$

であるから、 $A = A'$ となるはずであり図(4-19)と図(4-20)によってこの関係が確認しえたことにより、式(4-12)の一般性が証明されたと考えられるであろう。

図(4-19)と図(4-20)は同一の現象を異なるフロック形成度指標で表わしたものであるから、指標相互の換算をしておくとお互に際してはそれぞれが測定に都合の良い図を用いければ良いこととなる。

自平衡分布に達するのに必要な  $G^*C_vT^*$  と  $m$  値をそれぞれ、 $m_e^*$   $m_e$  とすると、

$$m_e^* = G^* C_v T \div \sqrt{\frac{E_*}{\mu}} C_T T^* \text{-----}(4-15)$$

$$m_e = 1.22 \sqrt{\frac{E_0}{\mu}} d^3 n_0 T^* \text{-----}(4-16)$$

ここで、 $C_T$ :初期粒子群の光学濁度、 $T^*$ :自平衡分布に達するのに要する実攪拌継続時間(sec)。

今、実験に用いたパイプフロッキュレーターの有効エネルギー消費率  $E_0$  が総エネルギー消費率  $E_*$  の5% ( $E_0 = 0.05 E_*$ ) と考えると式(4-15)のようになる。フロッキの最大成長径  $d_{max}$  と有効エネルギー消費率  $E_0$  との関係を示す図と、パイプフロッキュレーターの総エネルギー消費率  $E_*$  とそこでフロッキ最大成長径  $d_{max}$  の関係を対比すると、パイプフロッキュレーターでは  $E_0 \div 0.05 E_*$  と云った値も考えることによって図(2-31)のようにならほぼ両者の関係が一致する。このことはパドル型攪拌装置を持つフロッキュレーターでは総エネルギー消費率の10%程度が有効であるのに対して、パイプフロッキュレーターでは5%程度有効であると云った有効さの割合に差があるためと考えられる。

$$m_e^* = 4.5 \sqrt{\frac{E_0}{\mu}} C_T T^* \text{-----}(4-15')$$

そこで、両指標の大きさの比率は、

$$\frac{m_e^*}{m_e} = \frac{4.5 C_T}{1.22 d^3 n_0} \text{-----}(4-17)$$

パイプフロッキュレーターの実験で得られた  $C_T = 100$  度の

時  $d_1 = 5 \times 10^{-4} \text{ cm}$ ,  $n_0 = 1.63 \times 10^6 \text{ 個/cm}^3$  の値を、式(4-17)に代入すると両指標の換算比は次のようになる。

$$\frac{me^*}{me} = \frac{4.5 \times 100}{1.22 \times 2.03 \times 10^{-4}} = 1.8 \times 10^6 \text{ --- (4-18)}$$

このようにして推算された換算係数を用いることによつて、図(4-19)と(4-20)に示された独立の2実験の結果が次のように定量的に一致する。すなわち、 $S_m = 10^5$  の例をとると図(4-20)では  $me^* = 3.8 \times 10^6$  となり、式(4-18)から  $me \div 2.1$  と推算される。図(4-19)において、 $S_m = 10^5$  に対する  $me$  はほぼ2であるから式(4-18)によつて推定された値が正確に実験で証明された。したがつて、この両指標は論理的に健全な換算係数を用いて変換し合えるものであり、有効エネルギー消費率  $E_0$  を用いての現象の取扱いにたいしての実用性を更に確認することかできた。

上述の関係より、初期粒子径  $d_1$  と個数  $n_0$  が与えられてゐる場合にはあるフロック最大径を持つフロック群の最大成長(自平衡)分布に至るに必要な実攪拌継続時間  $T^*$  は、有効エネルギー消費率  $E_0$  と最大成長径の関係を示す図(2-31)と最大成長度  $S_m$  と最大成長平衡分布に至るに要する無次元攪拌継続時間  $me$  の関係を示す図(4-19)を用いて次の例のように求められる。

$$T^* = \frac{me}{1.22 \sqrt{E_0/\mu} d_1^3 n_0} \text{ --- (4-19)}$$

今、1例として  $d_1 = 4 \times 10^{-4} \text{ cm}$ ,  $n_0 = 2.2 \times 10^6 \text{ 個/cm}^3$  (カオリン濃度として50ppmの実測値),  $\mu = 10^{-2} \text{ poise}$  (水温  $20^\circ \text{C}$ ),  $d_{max} = 2.5 \times 10^{-2} \text{ cm}$  の場合について考える。図(2-31)から、凝集剤として硫酸アルミニウムのみを用いた場合、 $d_{max} = 2.5 \times 10^{-2} \text{ cm}$  に対する有効攪拌エネルギー消費率  $E_0$  は  $E_0 = 2.5 \text{ erg/cm}^3 \cdot \text{sec}$  となる。図(4-19)から最大成長度  $S_m = (250/4)^3 = 2.4 \times 10^5$  に対して、 $me = 1.5$  と与えられる。したがつて、式(4-19)から  $T = 560 \text{ sec} \div 9 \text{ min}$  となる。

同様の計算を  $d_{max} = 5 \times 10^{-2} \text{ cm}$ ,  $7.5 \times 10^{-2} \text{ cm}$  について行つた結果をまとめたものが表(4-6)である。無次元攪拌継続時間  $me$  は  $S_m$  の増大に伴つて減少するが、所要実攪拌継続時間  $T$  は増加する。表(4-6)の結果は次のように説明される。

式(4-12)と式(4-19)より、

$$T^* = k_1 m_e \varepsilon_0^{-0.5} = k_2 S_m^{-0.2} \varepsilon_0^{-0.5} \text{-----} (4-20)$$

式(2-37)より,

$$S_m = k_3 (d_{max})^3 = k_4 \varepsilon_0^{-(1.13 \sim 1.05)} \text{-----} (4-21)$$

したがって, 式(4-20), (4-21)より,

$$T^* = k_5 S_m^{-0.2} S_m^{\frac{0.5}{(1.13 \sim 1.05)}} = k_6 S_m^{(0.24 \sim 0.28)} \text{-----} (4-22)$$

ここで,  $k_1 \sim k_6$ : 定数。

式(4-22)によつて, 自平衡分布に至る無次元攪拌継続時間  $m_e$  が  $S_m$  の 0.2 乗に逆比例するのに対して実攪拌継続時間  $T$  は  $S_m$  の 0.25 乗程度に比例して増加することが分かる。

#### 4-5 まとめ

本章ではフロック形成過程を示す基礎的な指標を用いて実験データを整理し, (1) 普遍化したフロック形成過程の表示を行ない, (2) 設計に必要な標準化・無次元化した諸図表を提示した。その結果, 初期フロック粒径  $d_1$ , 初期フロックの個数濃度  $n_0$  (または前二者の代りに初期濁度  $C_0$ ) と有効攪拌エネルギー消費率  $\varepsilon_0$  の3つから, ある物性を持ったフロック群の沈降性の向上 (粒度組成の変化) を理論的な道筋で求める方法が明らかにされた。

ここで用いられたフロック形成理論においては, フロックキュレーターの攪拌特性を一括表示する唯一の数値が有効エネルギー消費率  $\varepsilon_0$  である。本実験に使用したような横軸型の低速攪拌機ではトルクメータを用いる等の直接的方法によつて装置のエネルギー消費量を求める事が困難なので, ここでは接触フロック形成による間接的方法によつて攪拌翼回転数  $N_r$  と有効エネルギー消費率  $\varepsilon_0$  との関係を探求めた。その結果,  $N_r$  と  $\varepsilon_0$  は乱流下で成立する次式で関係づけられた。

$$\varepsilon_0 \propto N_r^3 \text{-----} (4-23)$$

したがって、本実験に用いたフロッキュレーター内の流  
体運動は乱流であり、フロック形成基本式(3-29)によ  
って現象を記述しうる事が確認された。

そこで攪拌特性を定義したフロッキュレーターを用いて、  
フロック形成の進行に伴うフロック粒度組成の変化をフロ  
ックを直接撮影する方法によつて追跡した。測定の結果は  
フロック形成に続く固液分離操作である沈殿池での除去率  
を直ちに求めうるように、無次元化時間沈降累積量曲線( $m$ -  
曲線)によつて表示した。 $m$ -曲線は次のように定義  
される。すなわち、初期粒子が所定の水深 $h$ を沈降しきる  
に要する時間を100%とした無次元沈降時間 $t$ だけ沈殿時  
間をとった場合に、存在するフロック群の内何%が沈殿除  
去されるかを示す曲線である。フロック形成度を示す指標  
として無次元攪拌継続時間 $m$ を用いると、無次元化時間沈  
降累積量曲線は横軸に無次元沈降時間 $t$ 、縦軸に除去百分  
率 $g(t)$ をとり $m$ をパラメーターとした曲線群で構成される。  
種々の実験条件(初期粒子径 $d_0$ 、個数 $N_0$ とフロック形成  
攪拌強度 $\varepsilon_0$ )における測定結果から次の諸点が明らかとな  
った。

先ず、図(4-8)、(4-9)に示されたように過大成長フ  
ロックの破壊によつて、 $m$ がある値にまで増加して来る  
フロック群の成長は止まる。本論でこの様な状態を成長  
平衡と称した。成長平衡に達したフロックの粒度分布は、  
そのフロック群を示す $m$ -曲線を標準化係数 $K^*$ を用いて  
各々の実験値を標準化するすると、図(4-10)のような1本の  
標準化 $m$ -曲線に帰一させることができる。したがって、  
成長平衡時のフロック群の粒度分布は一定形となり、初期  
条件と独立にフロック形成条件を表示する適当な変数につ  
いて、ある変数変換を行えば1つの分布形で表示するこ  
とができる。この様に、成長平衡状態が出現しその時の分  
布が一定形となる現象は自平衡(Self-preserving)と呼  
ばれる。

次に得られた結果は、フロック形成の初期段階では衝突  
したフロック同志が合一を維持しうる確率が高いので、 $m$   
値の増加に伴うフロック形成(フロック群の成長)の進行  
は著しい。しかし、フロック群の一部が与えられた攪拌強  
度 $\varepsilon_0$ で規定される最大成長径に近づくにつれて、衝突した  
フロック同志が合一を維持しうる確率は小さくなる。した  
がって、図(4-11)~図(4-15)に見られるように、一定  
の攪拌継続時間 $m$ の増分に対するフロック群の成長率(沈  
降性の向上)は、フロック形成が進行するにつれて急激に  
減少して来る。

そこで、フロックの粒度組成が成長平衡に近づいて来る初期のフロック形成段階のフロック形成の進行は  $m$  値の他に最大成長度  $S_m$  の影響も受けるようになる。  $m$  値によって主に支配される初期のフロック成長は、極めて短時間にしかも大幅なフロック成長を伴って終了し、最大成長度  $S_m$  が現象に関与して来るようになる。からの比較的少ないフロック成長で大半の攪拌時間が消費される。したがって、フロック群が成長平衡に至るに要する無次元攪拌継続時間  $m_e$  はフロックの最大成長度  $S_m$  にも依存するはずである。その関係は図(4-19)に示されてゐる。  $S_m$  と  $m_e$  の関係を示す関数は、

$$\log m_e = A \log S_m + \log B \text{ ----- (4-12)}$$

図(4-19)から、 $A \div -0.2$  となった。同様の結果がパイプフロッキュレーターでの実験についても得られた。パイプフロッキュレーターでの実験結果は  $m_e$  の代わりに、 $(G^* C_T T^*)$  を用いて示されこの指標を  $m_e^*$  とすると、 $m_e$  と  $m_e^*$  は次式に示す関係にある。

$$\frac{m_e^*}{m_e} = \frac{4.5 C_T}{1.22 d_i^3 n_0} \text{ ----- (4-17)}$$

最大成長度  $S_m$  が増大するにつれて  $m_e$  は減りうるが、成長平衡に至るに要する実攪拌継続時間  $T^*$  は式(4-19)で求められ、式(4-21)に示されるように  $S_m$  の増加に伴って大きくなる。

$$T^* = \frac{m_e}{1.22 \sqrt{E_0/u} d_i^3 n_0} \text{ ----- (4-19)}$$

$$T^* = K_6 S_m^{(0.24 \sim 0.28)} \text{ ----- (4-22)}$$

本章で得られた諸成果によって、 $m$  値、 $S_m$  値、 $K_6$  値の3つの無次元指標によってフロック形成過程を論じえる事を確認した。

表(4-1) 攪拌翼回転数と有効エネルギー消費率の関係

| フロッフ形成<br>攪拌回転数<br>$N_r$ [rpm] | 母フロッフ体<br>濃度<br>$V_f$ [無次元] | 吸合速度係数<br>$k_{c1}$ [1/sec] | 有効エネルギー<br>消費率<br>$\epsilon_o$ [erg/cm <sup>3</sup> ·sec] |
|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 6.5                            | $9.0 \times 10^{-3}$        | $5.2 \times 10^{-4}$       | $9.2 \times 10^{-2}$                                      |
| 8                              | $6.7 \times 10^{-3}$        | $5.7 \times 10^{-4}$       | $1.9 \times 10^{-1}$                                      |
| 10                             | $6.0 \times 10^{-3}$        | $6.0 \times 10^{-4}$       | $3.3 \times 10^{-1}$                                      |

注) 水温 8-10°C  $\mu = 1.35 \times 10^{-2}$  [poise]

表(4-2) 急速攪拌継続時間による初期粒子条件の変化

| 20 rpm の攪拌継続時間<br>[min] | $d_i$ [ $\mu$ ] | $n_o$ [1/cm <sup>3</sup> ] | $d_i^3 n_o$           |
|-------------------------|-----------------|----------------------------|-----------------------|
| 1                       | 4               | $2.2 \times 10^6$          | $2.76 \times 10^{-4}$ |
| 5                       | 75              | $5 \times 10^3$            | $3.65 \times 10^{-3}$ |
| 10                      | 150             | $2.25 \times 10^3$         | $7.60 \times 10^{-3}$ |

表(4-3) 凝集フロッフ形成条件

| 実験<br>番号 | 濁度<br>(ppm) | 硫酸アル<br>ミニウム注入<br>率 (ppm) | 急速攪拌<br>回転数<br>(rpm) | 急速攪拌<br>継続時間<br>(min) | 緩速攪拌<br>回転数<br>(rpm) | 緩速攪拌<br>継続時間<br>(min) |
|----------|-------------|---------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Ex-0     | 50          | 30                        | 20                   | 1                     | 20.0                 | 9                     |
| Ex-1     | 50          | 30                        | 20                   | 1                     | 10.0                 | 40                    |
| Ex-2     | 50          | 30                        | 20                   | 1                     | 8.0                  | 40                    |
| Ex-3     | 50          | 30                        | 20                   | 1                     | 6.5                  | 40                    |
| Ex-4     | 50          | 30                        | 20                   | 10                    | 10.0                 | 40                    |
| Ex-5     | 50          | 30                        | 20                   | 10                    | 8.0                  | 40                    |
| Ex-6     | 50          | 30                        | 20                   | 10                    | 6.5                  | 40                    |
| Ex-7     | 50          | 30                        | 20                   | 5                     | 8                    | 40                    |
| Ex-8     | 50          | 30                        | 20                   | 5                     | 6.5                  | 40                    |

表(4-4) フロッフ 粒径・沈降速度分布

実験 Ex-7  $t = 12 \text{ min}$ ,  $d_1 = 75 \mu$ ,  $n_0 = 5 \times 10^3 (\text{V/cm}^3)$ ,  $E_0 = 1.9 \times 10^{-1} (\text{erg/cm}^3 \cdot \text{sec})$ ,  $m \div 7.1$ 

| [I]                                                  | [II]*                    | [III]                            | [IV]                                      | [V]                                                | [VI]                                              | [VII]                                                            | [VIII]                                                       | [IX]                           | [X]                                                            |
|------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| フロッフ径<br>$d_{si}$<br>( $\times 10^{-3} \text{ cm}$ ) | フロッフ個数濃度<br>$n_i$<br>(個) | 級別個数比<br>$n_i / \sum n_i$<br>(%) | フロッフ密度<br>$\rho_f$<br>( $\text{g/cm}^3$ ) | フロッフ体積<br>$V_i$<br>( $\times 10^{-5} \text{ cm}$ ) | フロッフ重量<br>$W_i$<br>( $\times 10^{-5} \text{ g}$ ) | フロッフの級別総重量<br>$n_i \times W_i$<br>( $\times 10^{-5} \text{ g}$ ) | 級別重量比<br>$= W_i^*$<br>$n_i \times W_i / \sum n_i W_i$<br>(%) | 無次元沈降速度<br>$w_i / w_1 = w_i^*$ | i粒子が100沈みきるに要する時間<br>$\theta_i = T_i / T_1 = w_1 / w_i$<br>(%) |
| 10                                                   | 120                      | 60.5                             | 1.130                                     | 0.052                                              | 0.06                                              | 7.20                                                             | 2.6                                                          | 1.10                           | 90.6                                                           |
| 15                                                   | 10                       | 5.1                              | 1.087                                     | 0.176                                              | 0.19                                              | 1.90                                                             | 0.7                                                          | 1.48                           | 67.4                                                           |
| 20                                                   | 13                       | 6.6                              | 1.053                                     | 0.418                                              | 0.44                                              | 5.72                                                             | 2.1                                                          | 1.83                           | 54.7                                                           |
| 25                                                   | 6                        | 3.0                              | 1.040                                     | 0.817                                              | 0.85                                              | 5.10                                                             | 1.9                                                          | 2.10                           | 46.8                                                           |
| 30                                                   | 10                       | 5.1                              | 1.033                                     | 1.41                                               | 1.46                                              | 14.60                                                            | 5.4                                                          | 2.48                           | 40.3                                                           |
| 35                                                   | 10                       | 5.1                              | 1.027                                     | 2.24                                               | 2.30                                              | 23.00                                                            | 8.5                                                          | 2.79                           | 35.8                                                           |
| 40                                                   | 7                        | 3.5                              | 1.022                                     | 3.35                                               | 3.42                                              | 23.94                                                            | 8.9                                                          | 3.07                           | 32.6                                                           |
| 45                                                   | 6                        | 3.0                              | 1.019                                     | 4.77                                               | 4.86                                              | 29.16                                                            | 10.8                                                         | 3.38                           | 29.6                                                           |
| 50                                                   | 5                        | 2.5                              | 1.017                                     | 6.54                                               | 6.65                                              | 33.25                                                            | 12.3                                                         | 3.62                           | 27.6                                                           |
| 55                                                   | 5                        | 2.5                              | 1.016                                     | 8.71                                               | 8.85                                              | 44.25                                                            | 16.4                                                         | 3.90                           | 25.7                                                           |
| 60                                                   | 3                        | 1.5                              | 1.014                                     | 11.3                                               | 11.5                                              | 34.50                                                            | 12.8                                                         | 4.18                           | 24.6                                                           |
| 65                                                   | 2                        | 1.0                              | 1.012                                     | 14.4                                               | 14.6                                              | 29.20                                                            | 10.8                                                         | 4.42                           | 22.6                                                           |
| 70                                                   | 1                        | 0.5                              | 1.011                                     | 18.0                                               | 18.2                                              | 18.20                                                            | 6.7                                                          | 4.69 $w_{max}$                 | 21.4 $\theta_{d_{max}}$                                        |
| 75                                                   |                          |                                  | 1.010                                     | 22.1                                               | 22.3                                              |                                                                  |                                                              | 4.93                           | 20.3                                                           |
| 80                                                   |                          |                                  | 1.009                                     | 26.8                                               | 27.1                                              |                                                                  |                                                              | 5.18                           | 19.3                                                           |
| 85                                                   |                          |                                  | 1.008                                     | 32.2                                               | 32.5                                              |                                                                  |                                                              | 5.42                           | 18.5                                                           |
| $\Sigma$                                             | 198                      | 100                              |                                           |                                                    |                                                   | 270.02                                                           | 100                                                          |                                |                                                                |

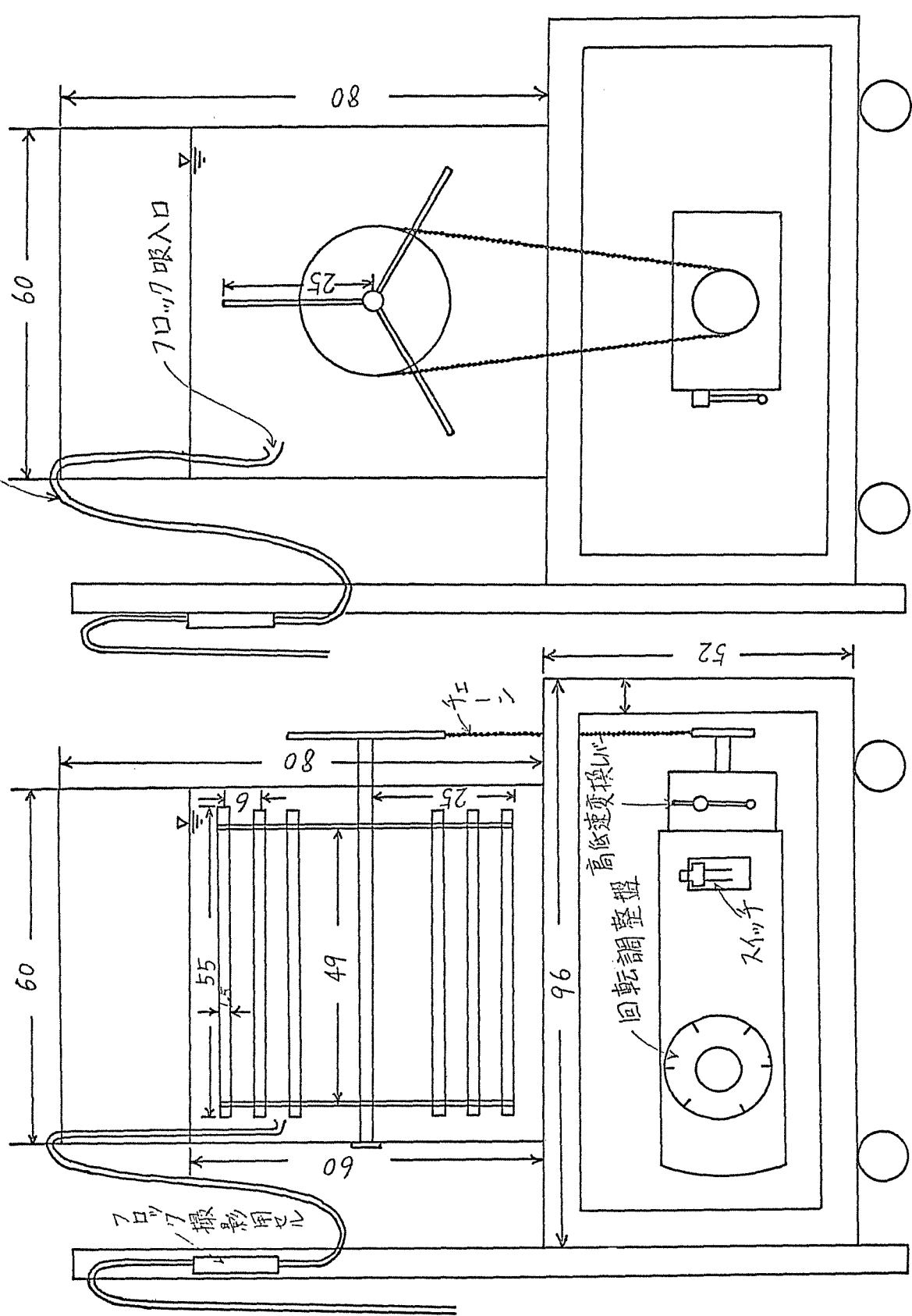
表(4-5) 標準化係数  $K^*$

| $S_m$             | $K^*$ |
|-------------------|-------|
| $3.4 \times 10^6$ | 3.00  |
| $2.0 \times 10^6$ | 2.84  |
| $2.4 \times 10^5$ | 2.00  |
| $1.2 \times 10^3$ | 0.094 |
| $5.1 \times 10^2$ | 0.084 |

表(4-6) 自平衡に至るに必要な攪拌継続時間の計算例

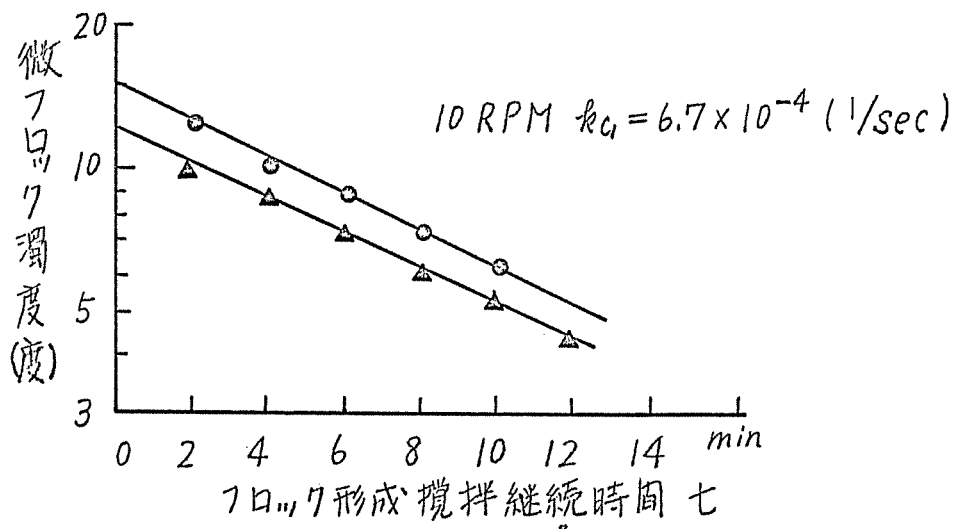
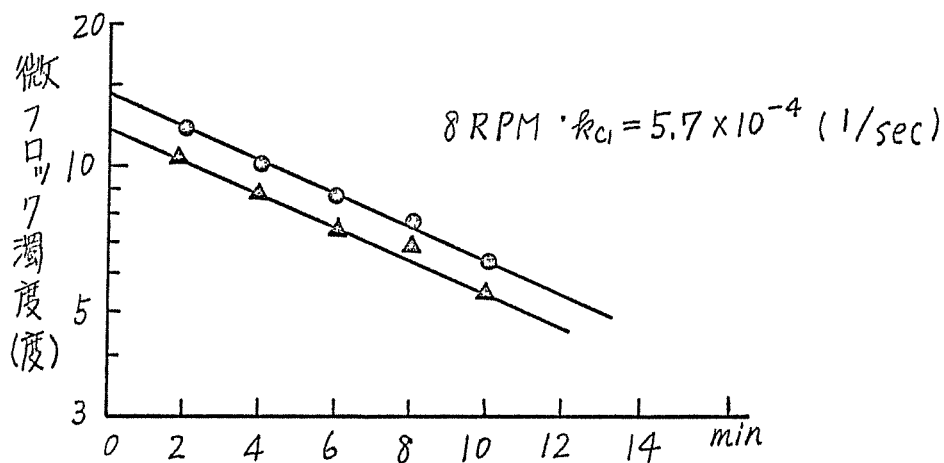
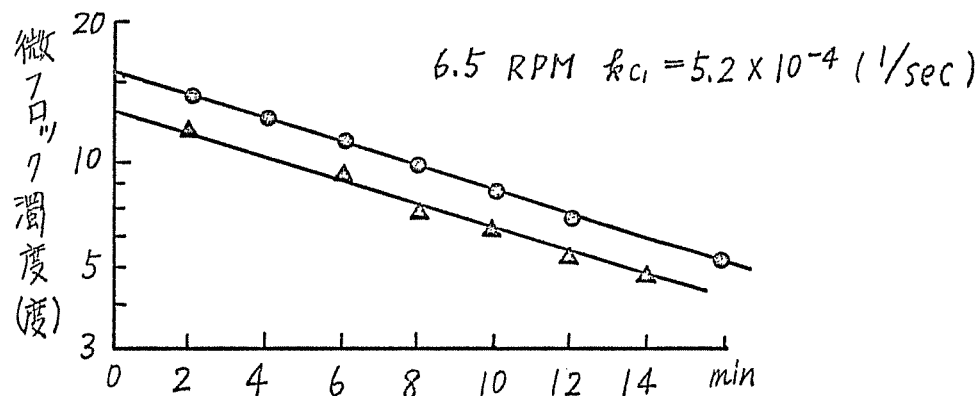
| $d_1 [\mu]$ | $d_{max} [\mu]$ | $S_m$             | $E_o [\text{erg/cm}^3 \cdot \text{sec}]$ | $m_e$ | $T [\text{min}]$ |
|-------------|-----------------|-------------------|------------------------------------------|-------|------------------|
| 4           | 250             | $2.4 \times 10^5$ | $2.5 \times 10^0$                        | 1.5   | 9                |
| 4           | 500             | $2.0 \times 10^6$ | $3.2 \times 10^{-1}$                     | 1.0   | 17               |
| 4           | 750             | $6.6 \times 10^6$ | $1 \times 10^{-1}$                       | 0.75  | 23               |

70mmサフランリン管(内径1.5)

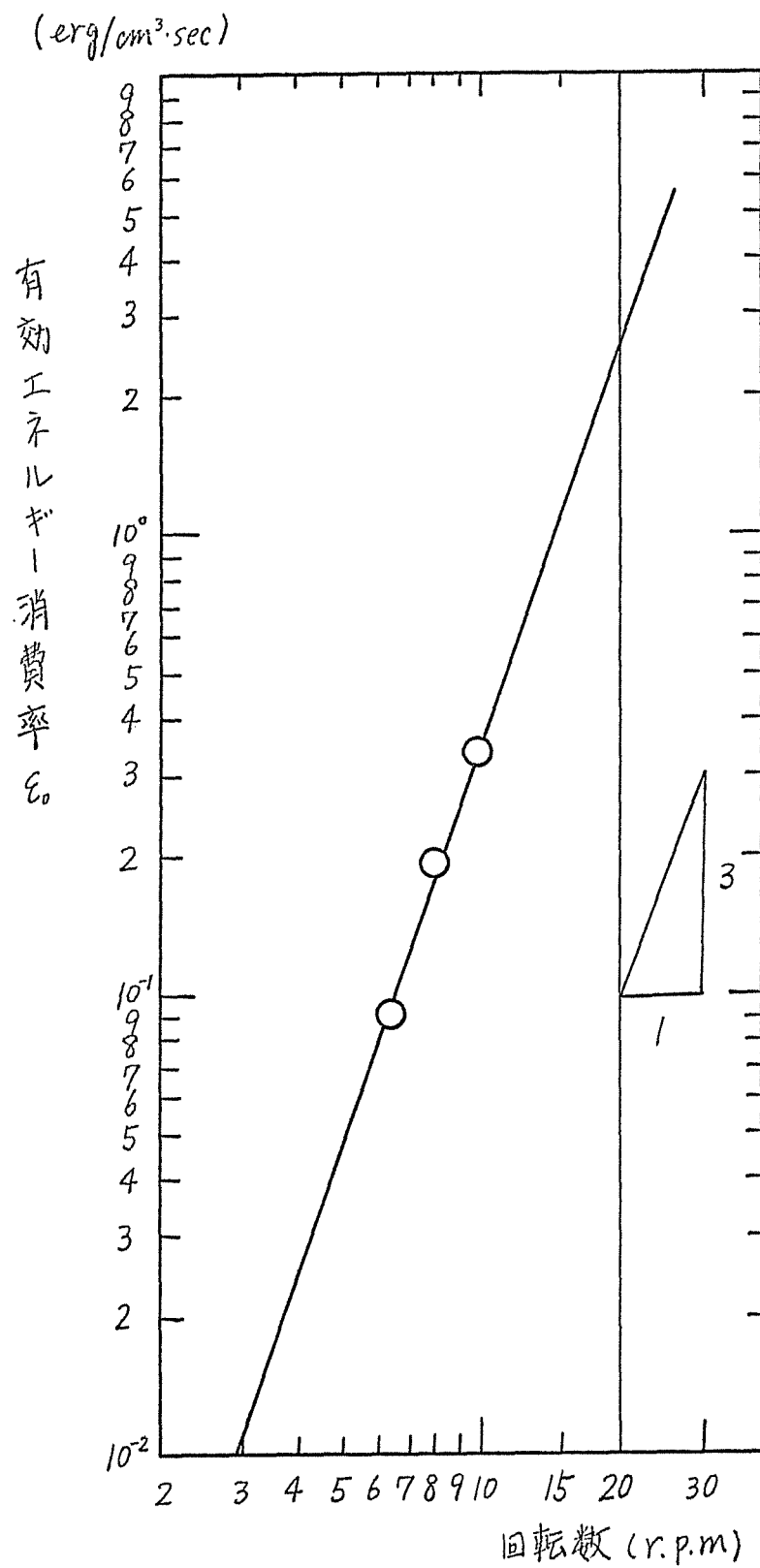


単位: cm

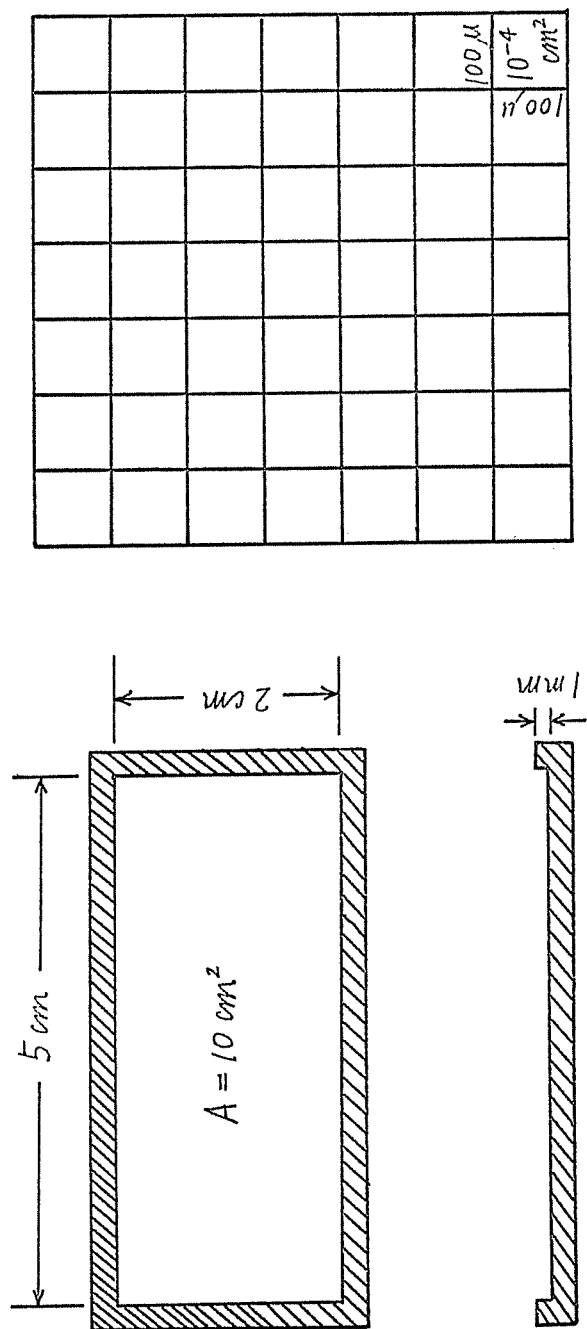
図(4-1) 回分式70mmキレター



図(4-2) 母フロックとの接触吸合による微フロック濁度の減少

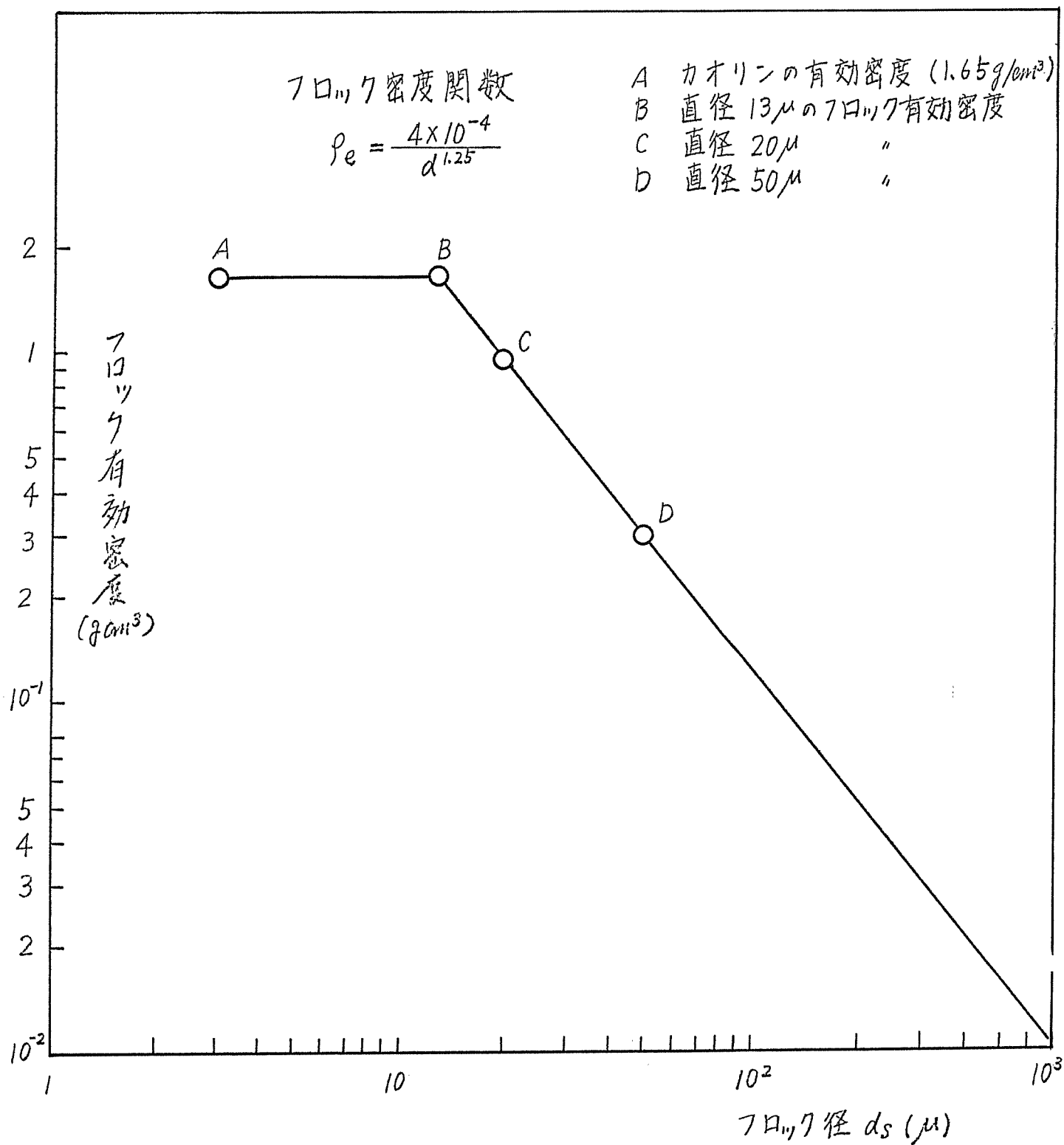


図(4-3) 攪拌翼回転数とエネルギー消費率の関係

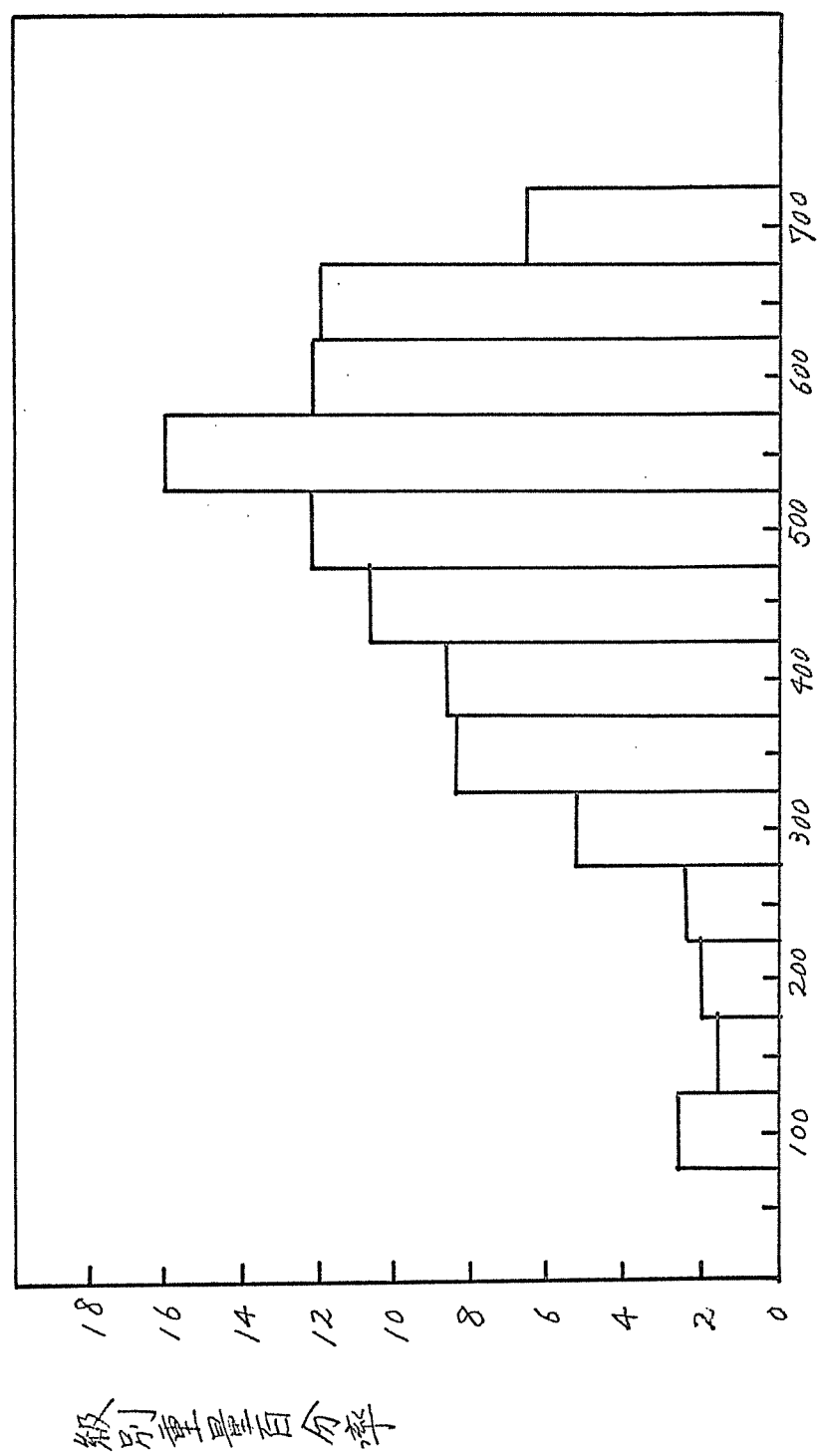


図(4-4) 微7ロツ7径，個体濃度測定用セル

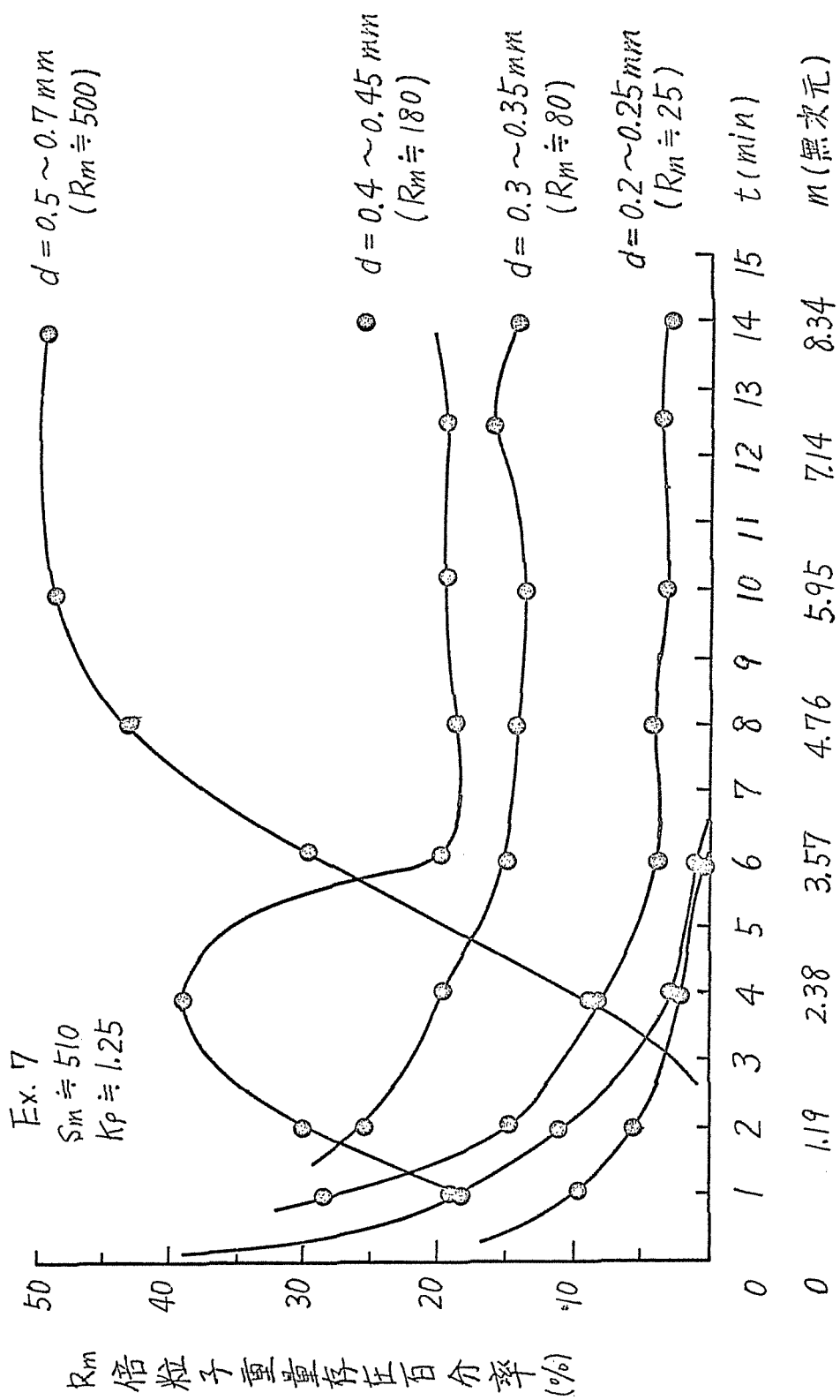




図(4-6) フロックの径と有効密度の関係



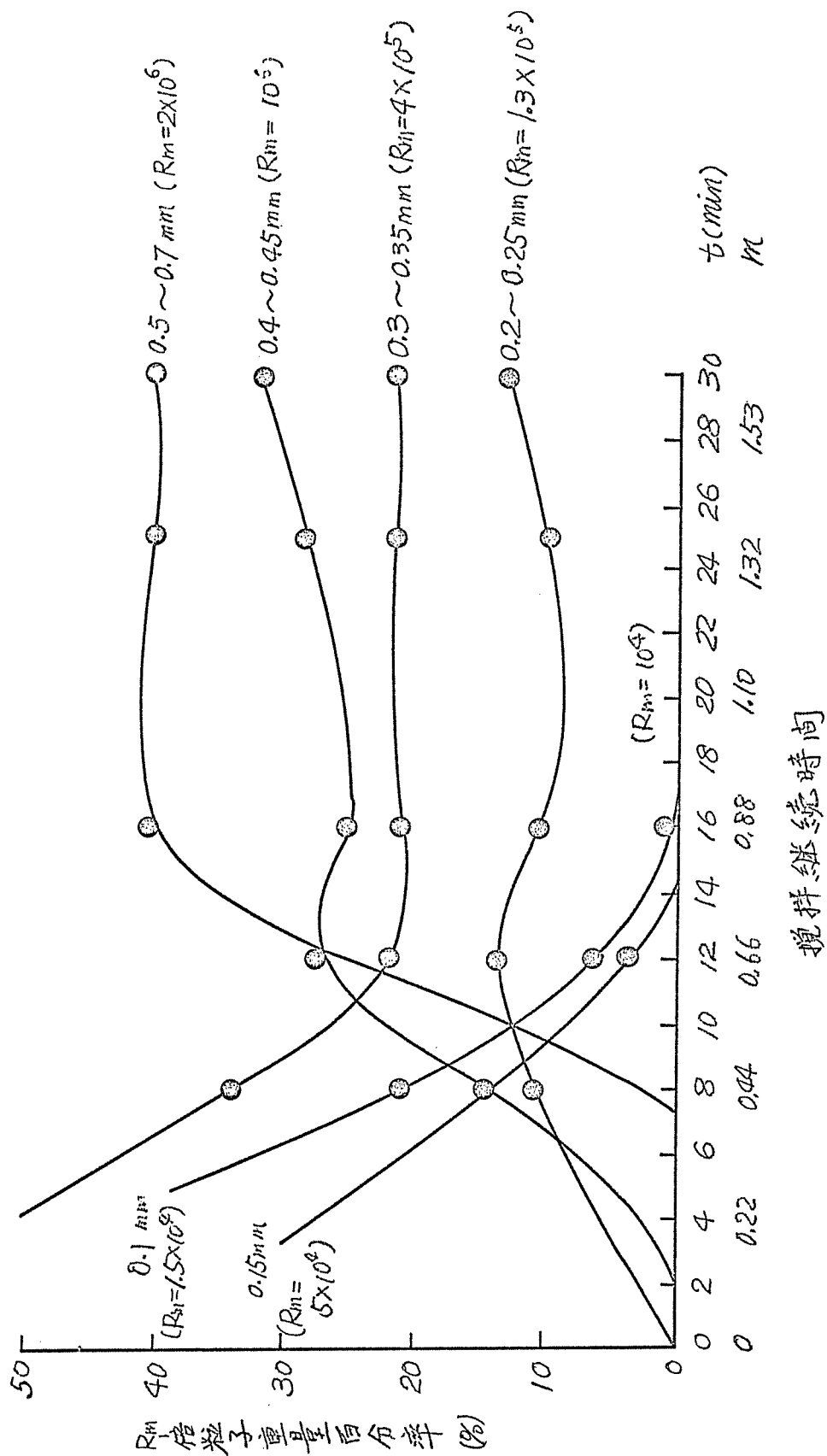
図(4-7) 粒度分布ヒストグラム



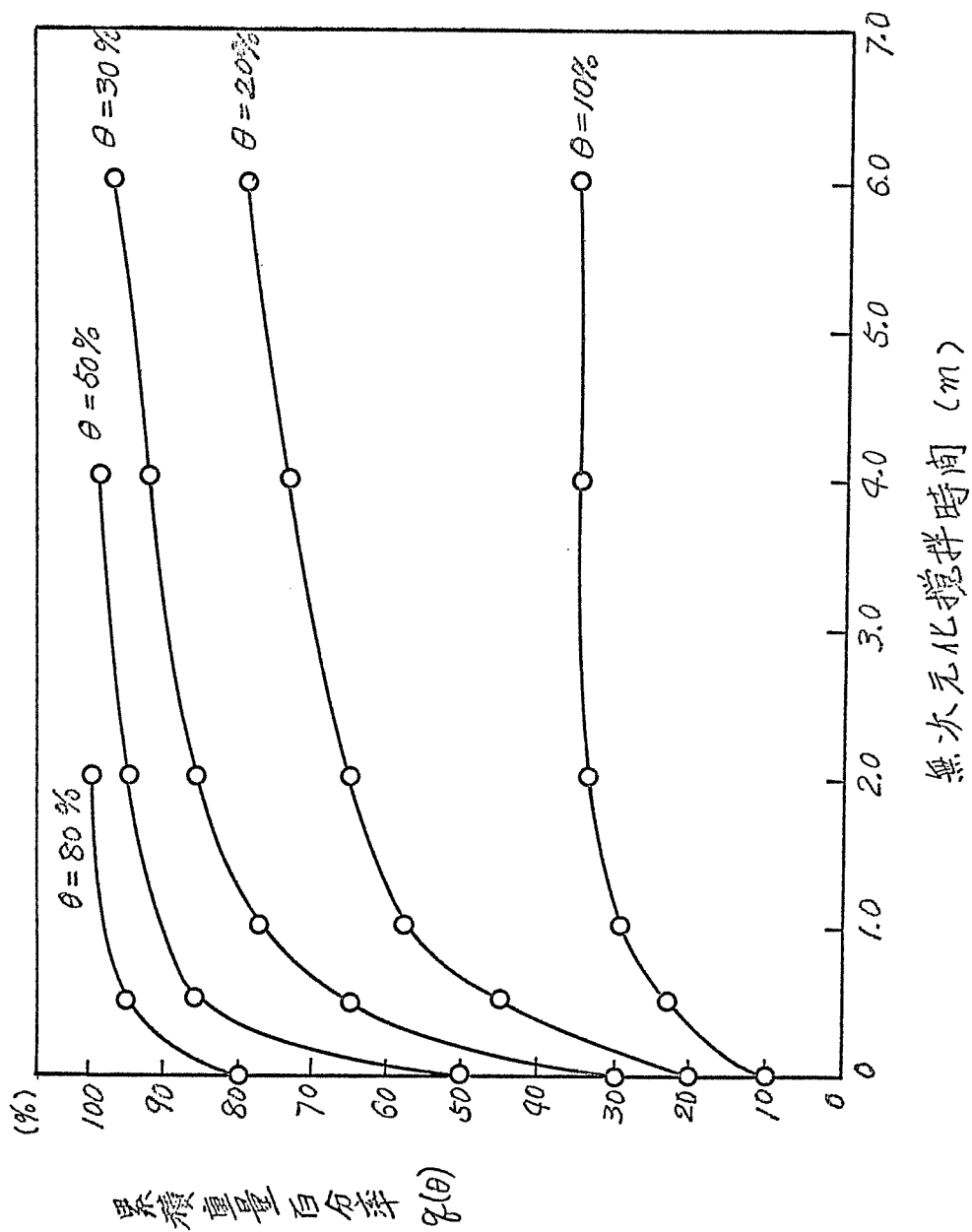
攪拌継続時間

図(4-8)  $R_m$  倍粒子の消長  $R_m = \left(\frac{d}{d_i}\right)^3$

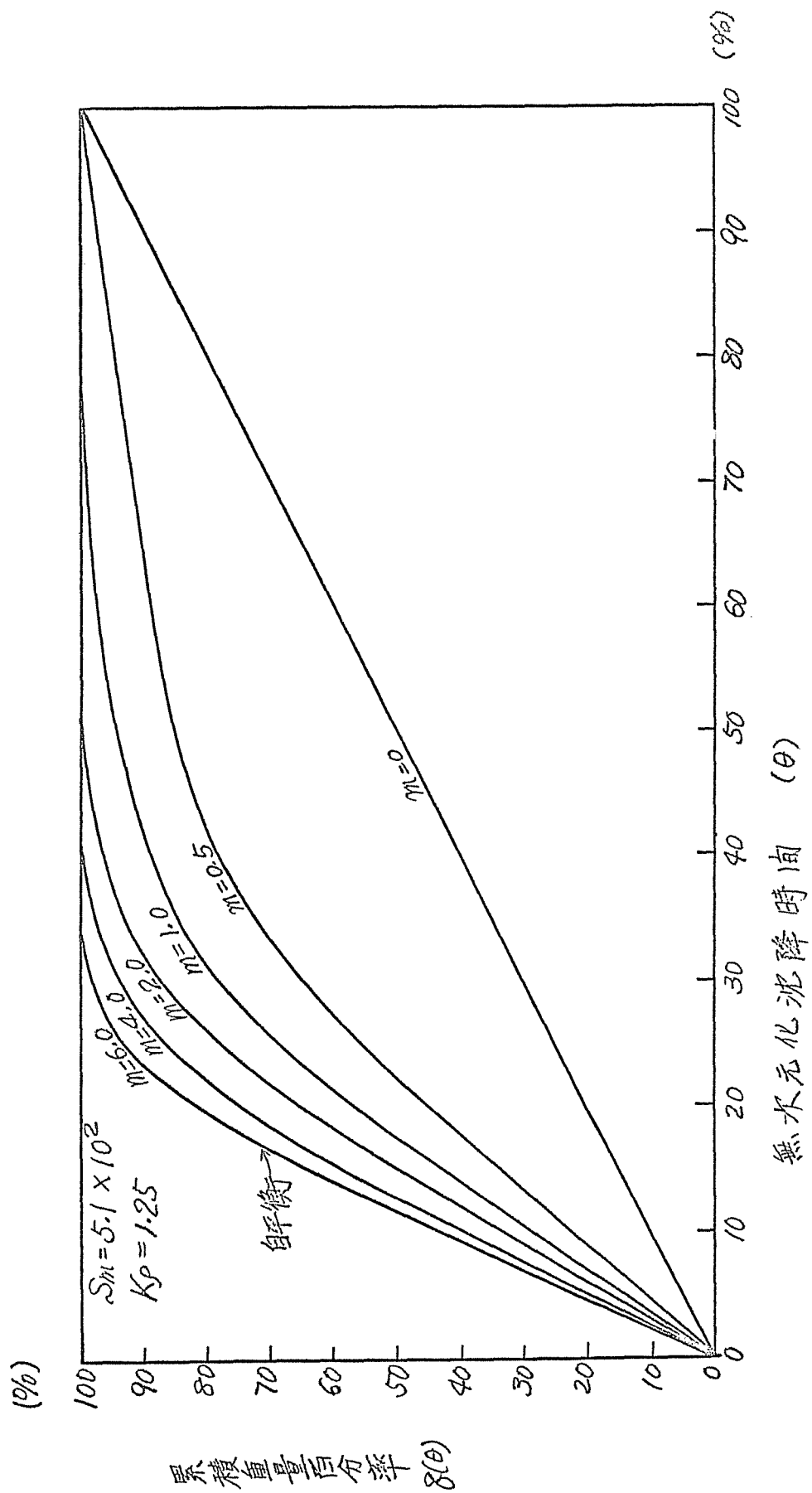
$S_m = 2.0 \times 10^6$   
 $K_p = 1.25$



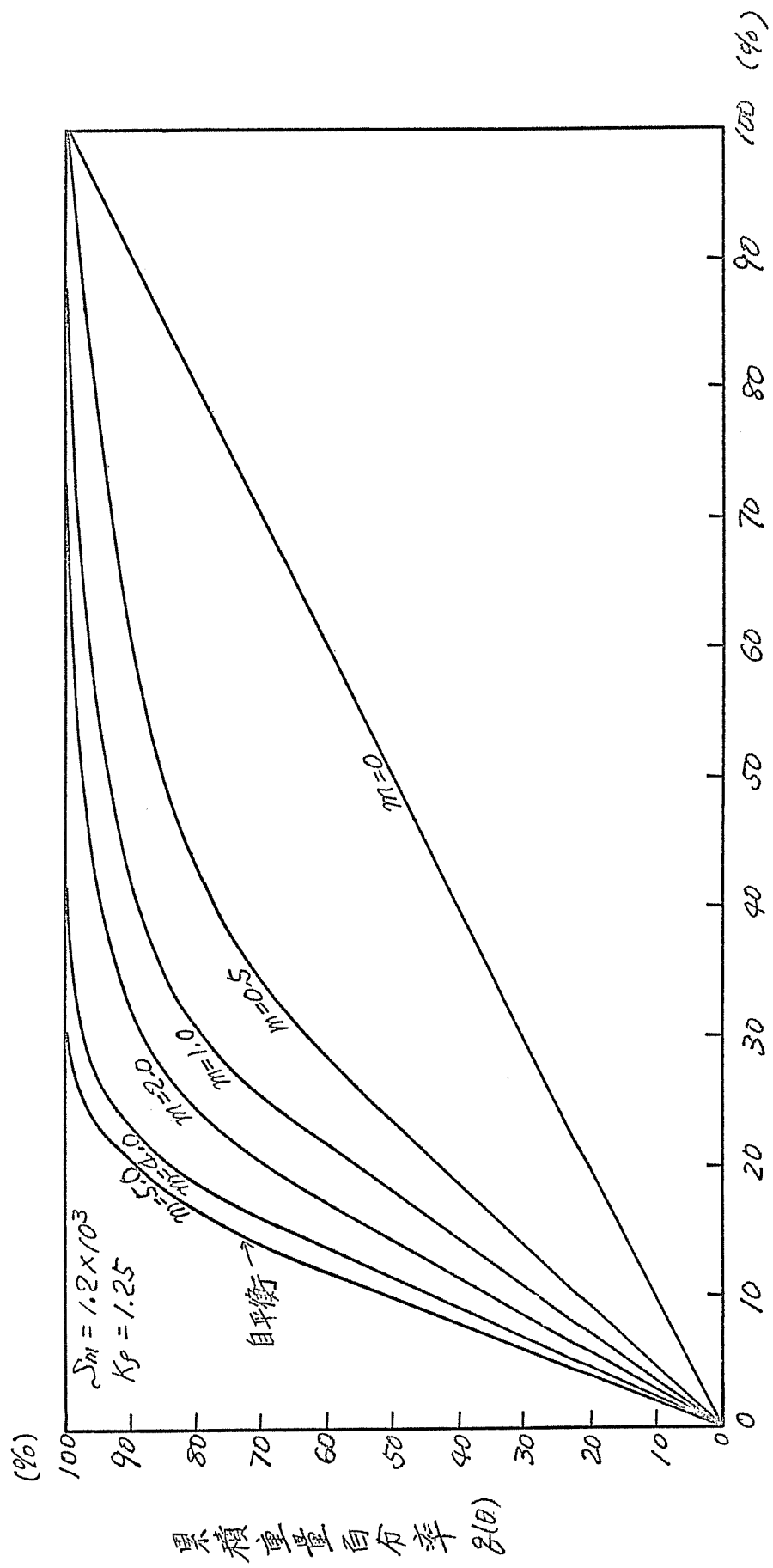
Ex 7.  $S_m = 5.1 \times 10^2$



図(4-10) 無次元化攪拌時間と累積量百分率の関係

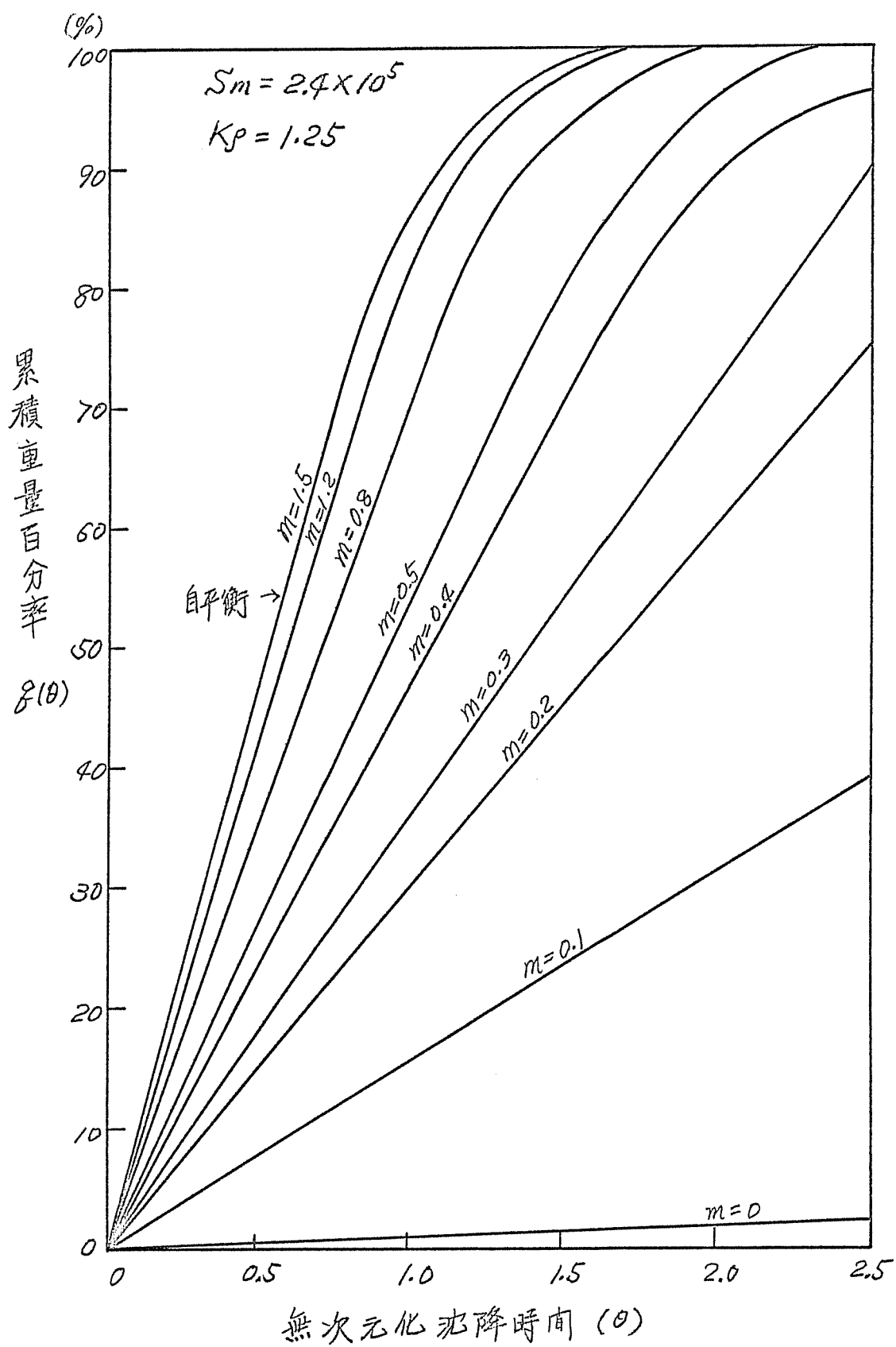


圖(4-11) 無次元化時間累積量曲線 ( $S_m = 5.1 \times 10^2$ )

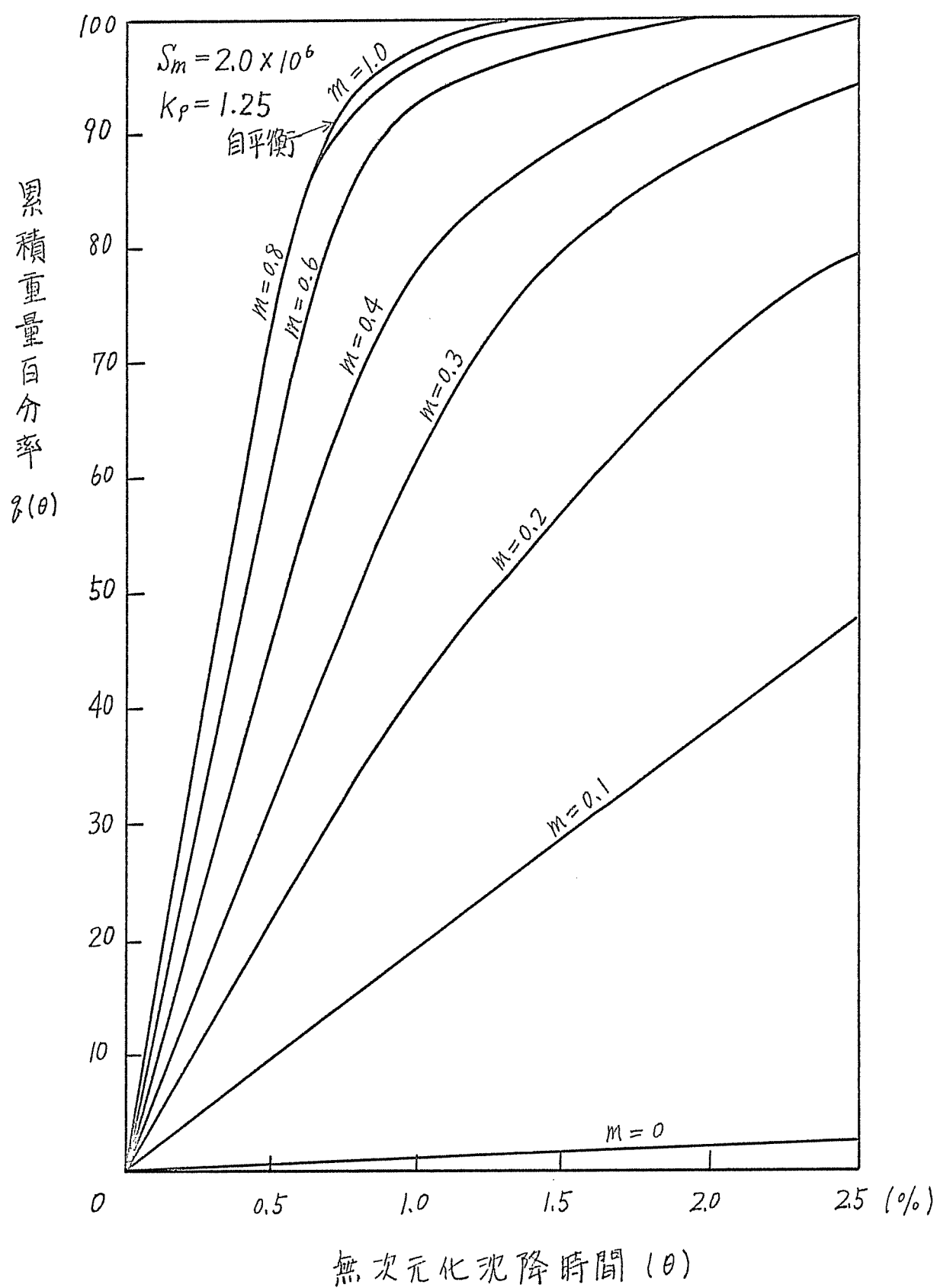


無次元化沈降時間  $(\theta)$

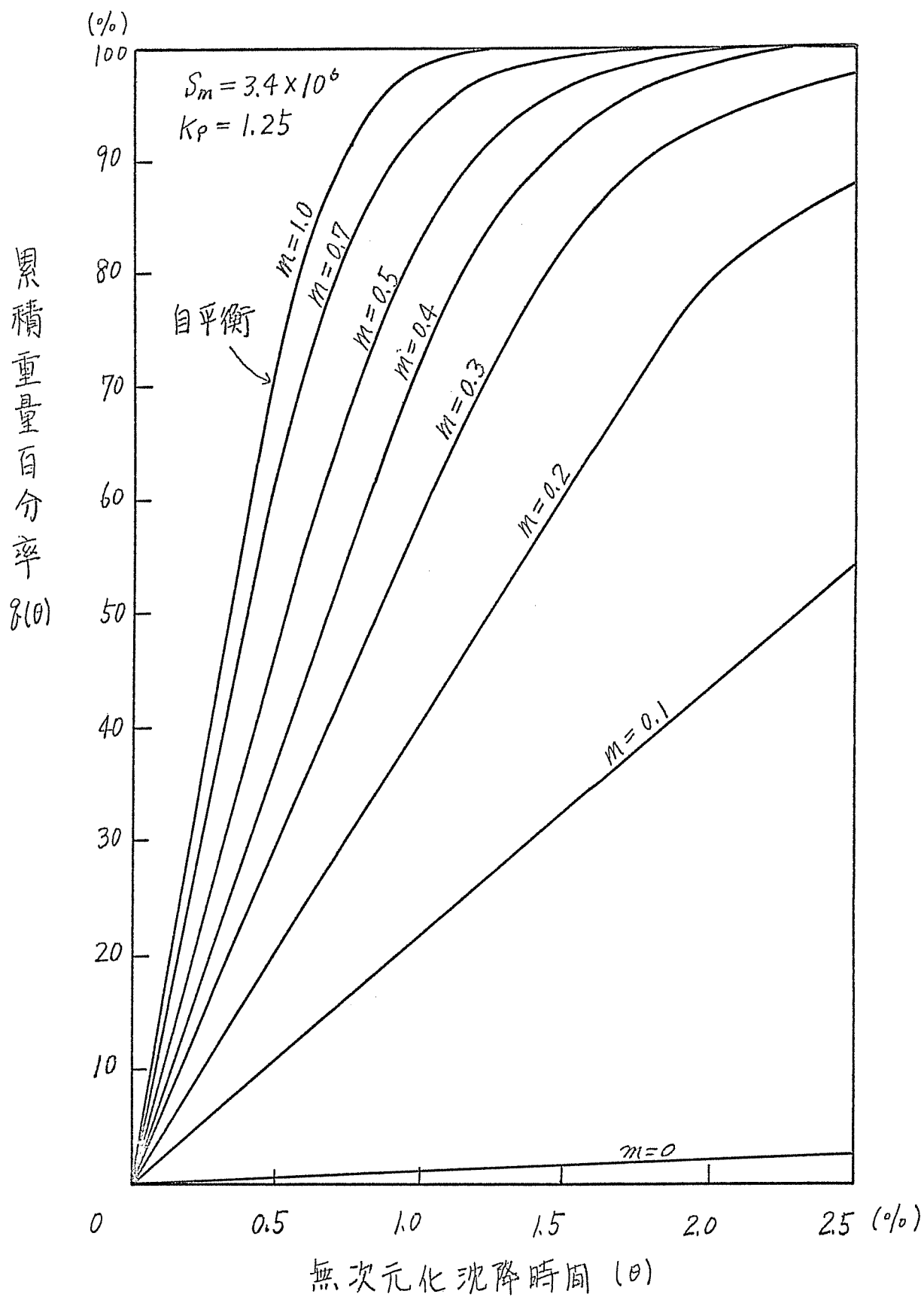
圖(4-12) 無次元化時間累積量曲線 ( $S_m = 1.2 \times 10^3$ )



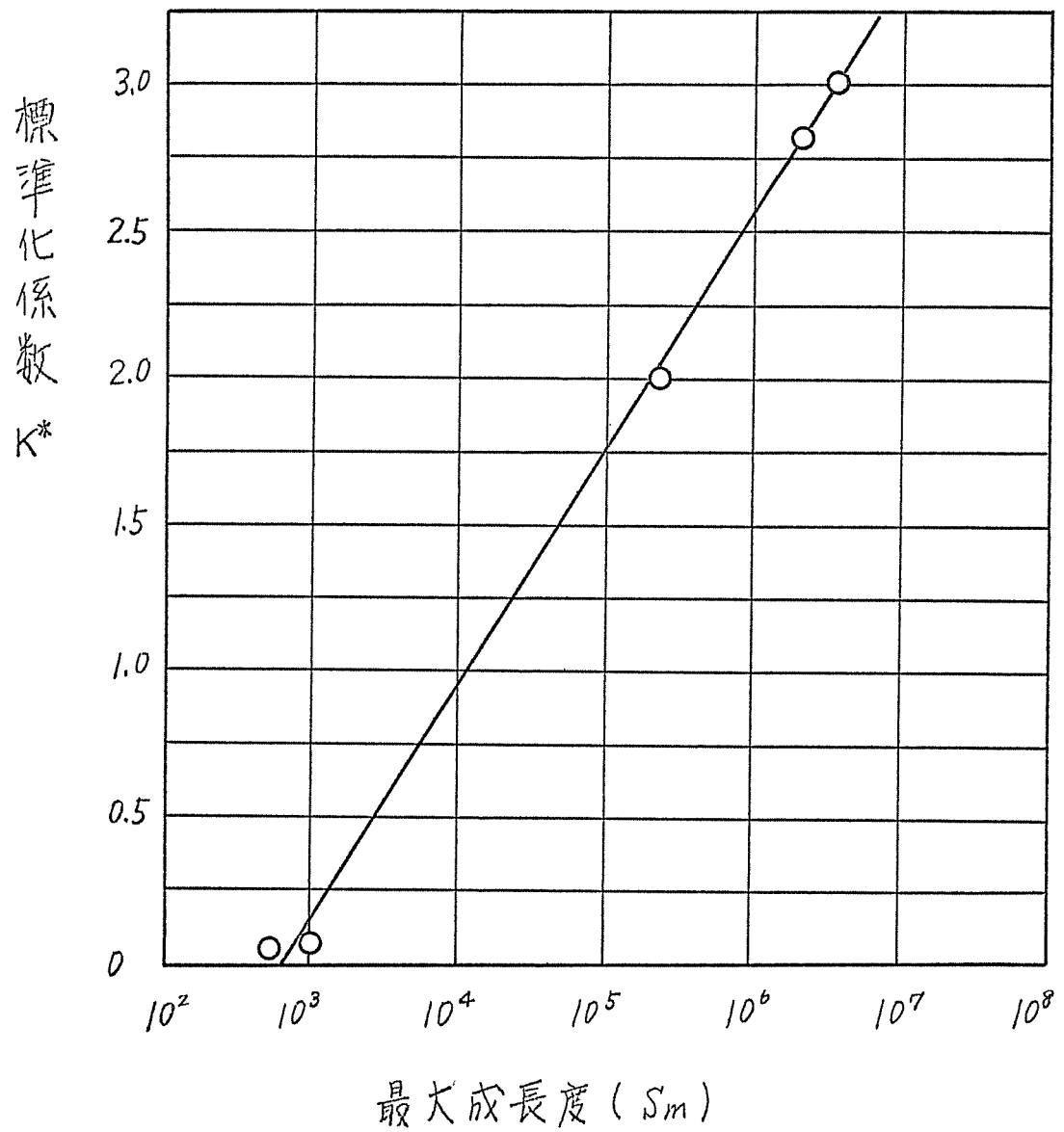
圖(4-13) 無次元化時間累積量曲線 ( $S_m = 2.4 \times 10^5$ )



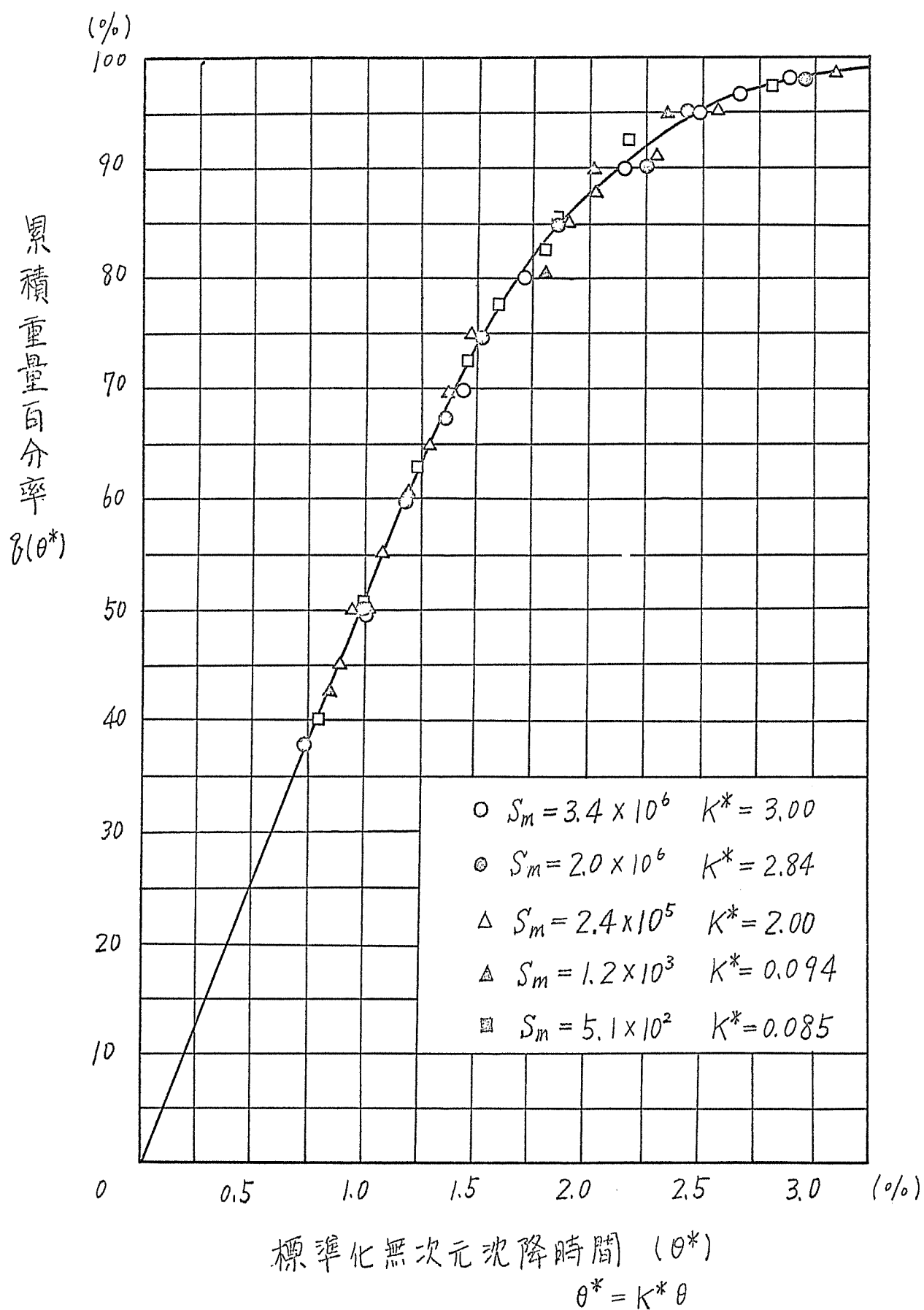
圖(4-14) 無次元化時間累積量曲線 ( $S_m = 2.0 \times 10^6$ )



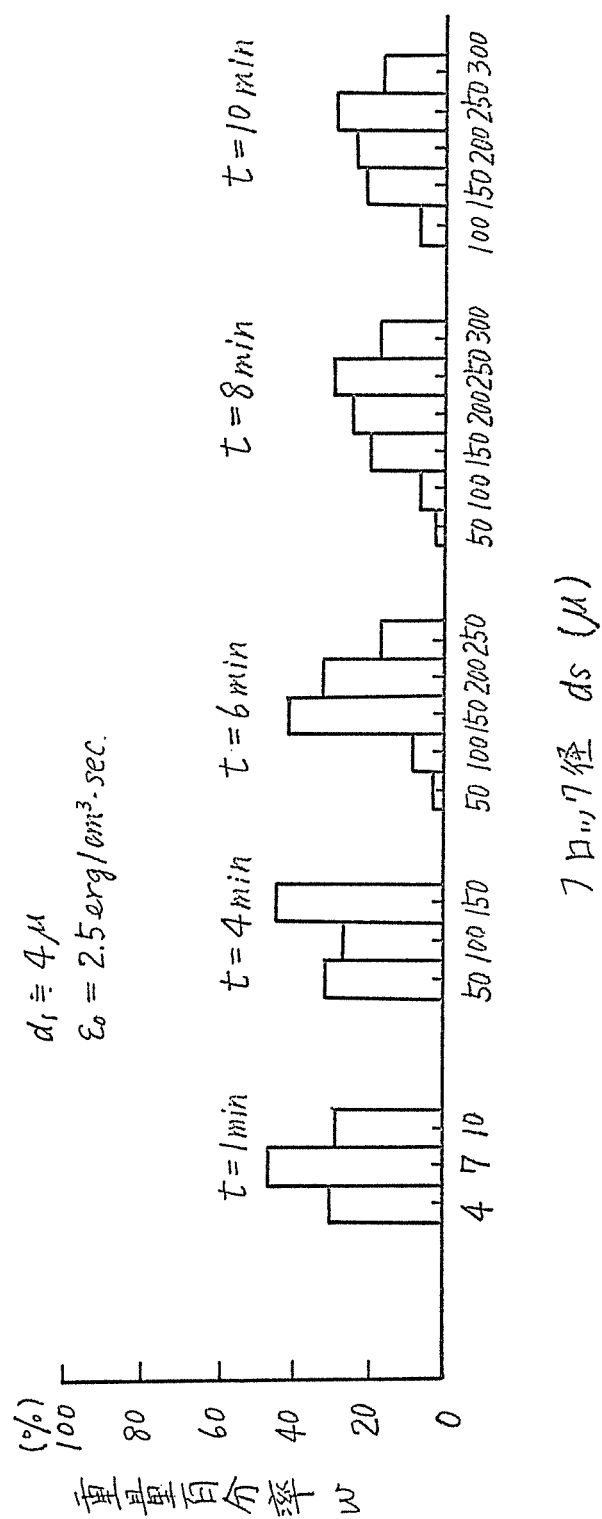
圖(4-15) 無次元化時間累積量曲線 ( $S_m = 3.40 \times 10^6$ )



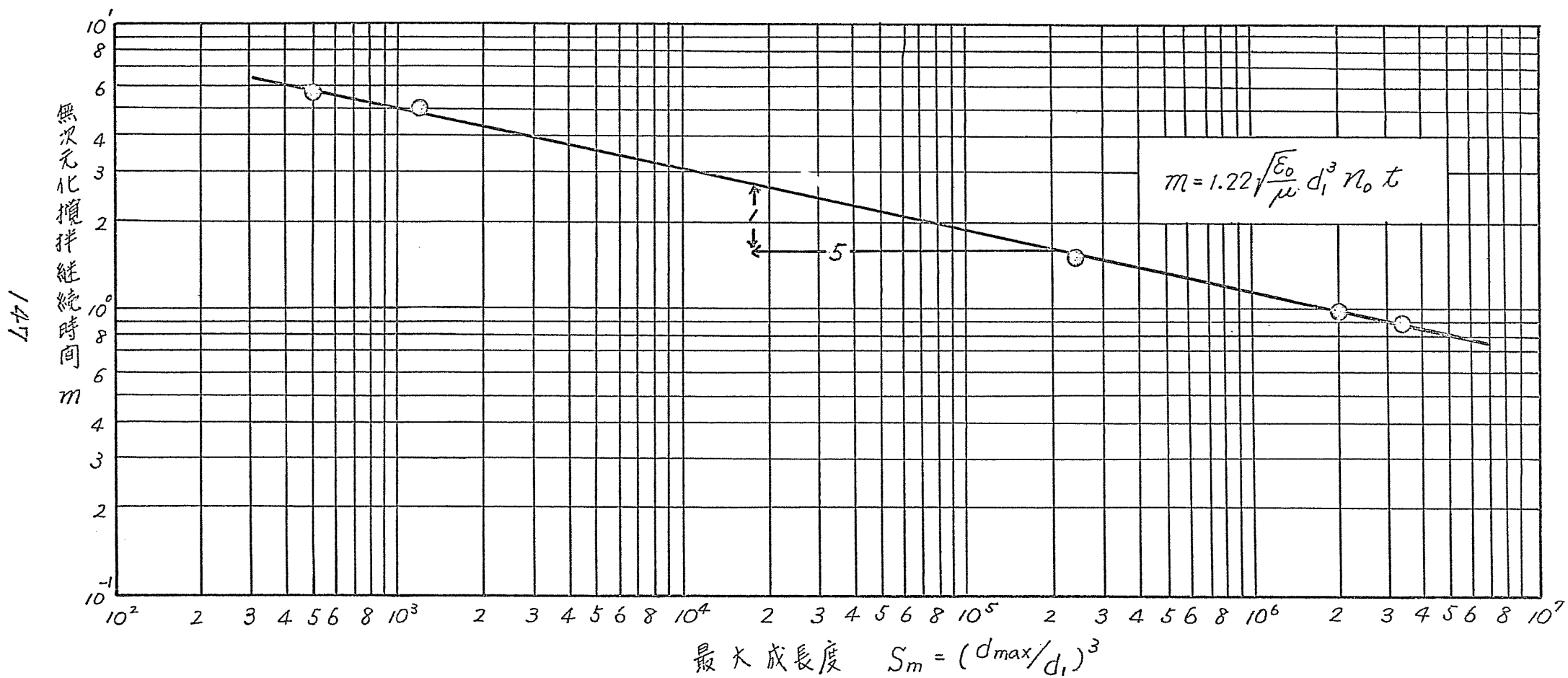
図(4-16) 無次元化時間累積曲線の標準化係数



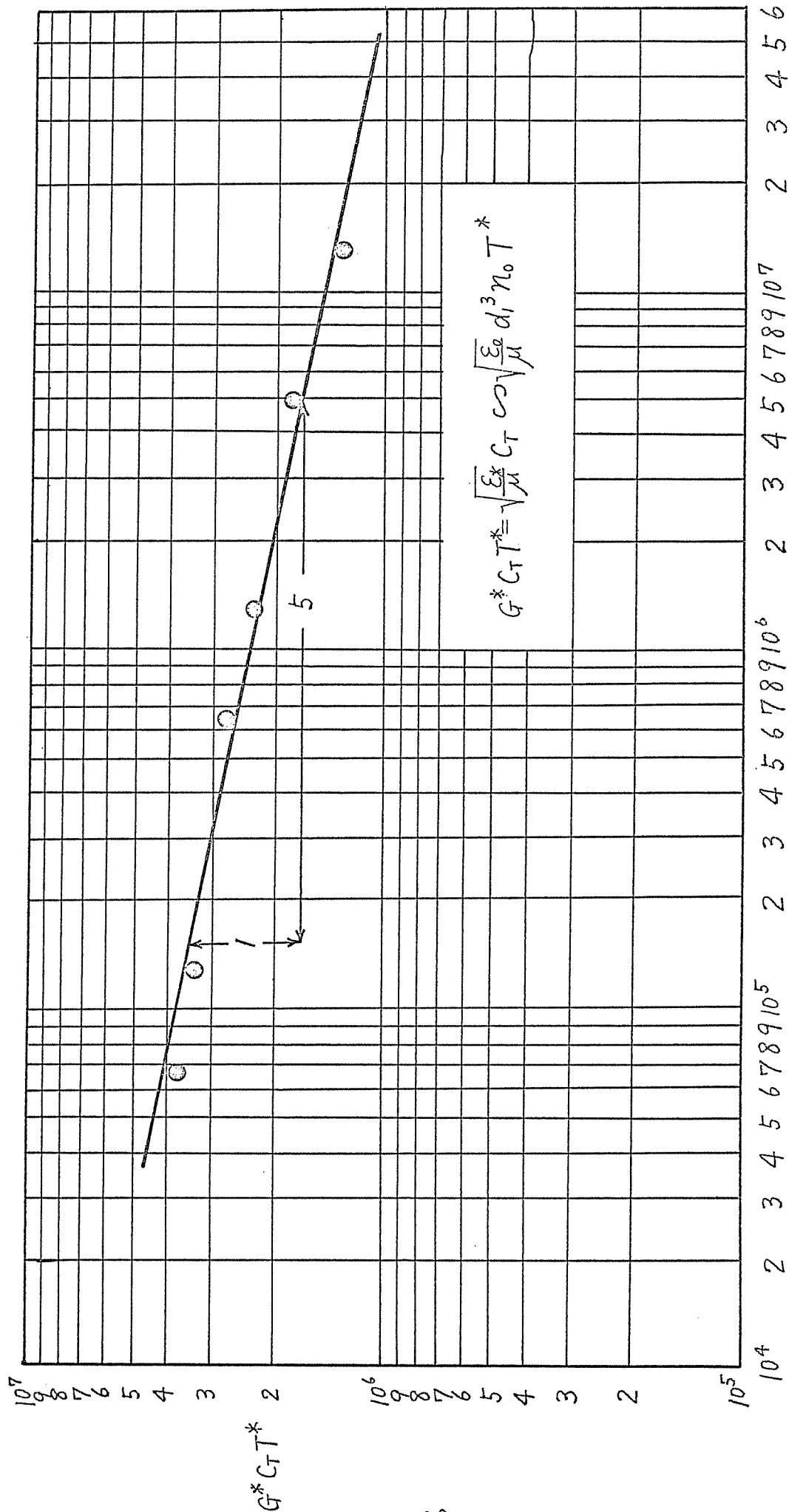
圖(4-17) 標準化無次元時間累積曲線



図(4-18) 7000 Å 形成攪拌継続時間と 7000 Å 径の分布

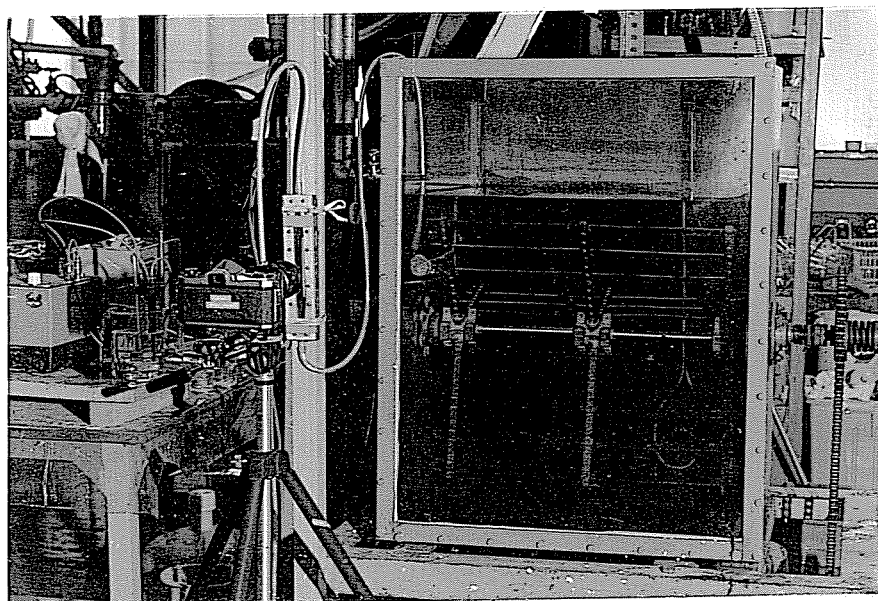


圖(4-19) 最大成長度  $S_m$  與成長平衡分布  $k$  至  $3$  無次元攪拌繼續時間  $m$  關係

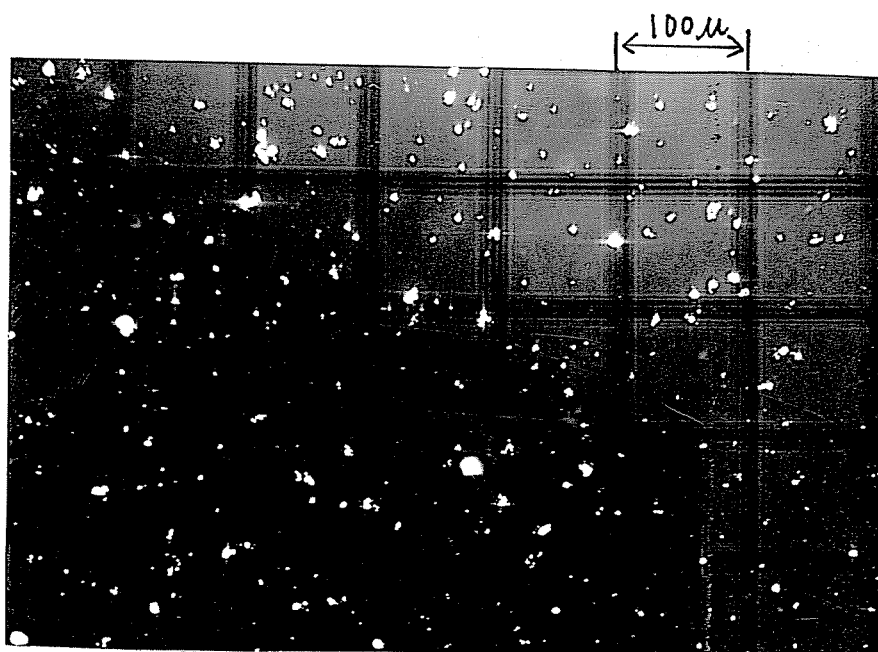


最大成長度  $S_m = (d_{\max}/d_1)$

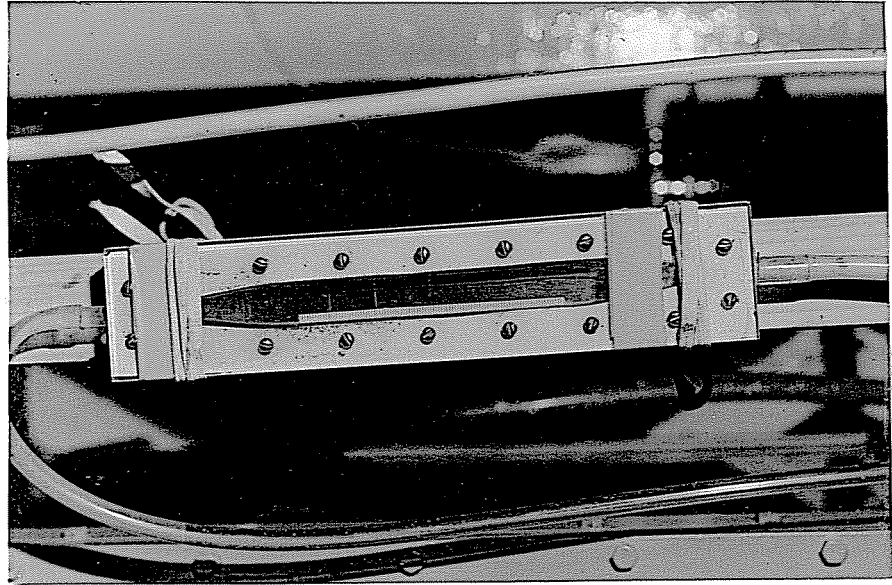
図(4-20) 最大成長度  $S_m$  と成長平衡分布に至る無次元化攪拌継続度  $G^* C_T$  の関係



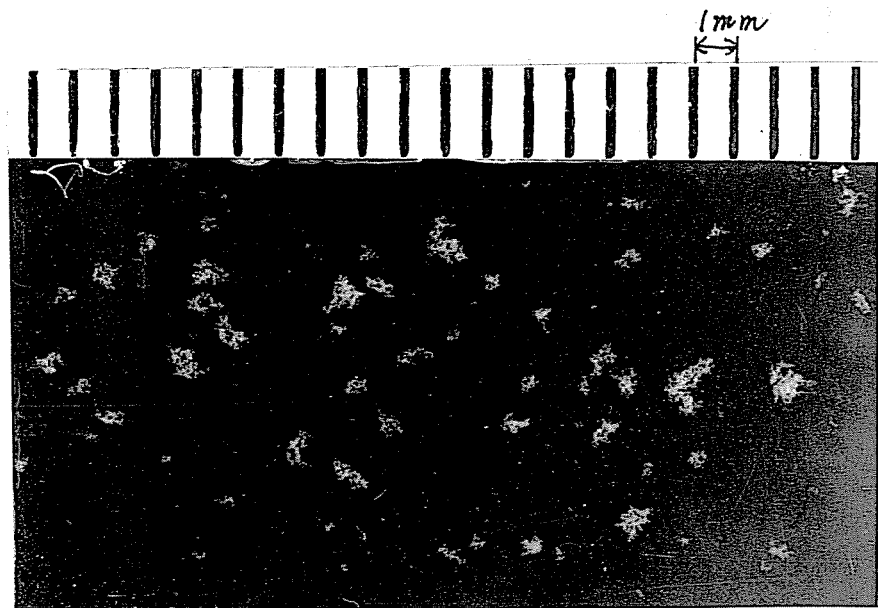
写真(4-1) 回分式フロッキュレーター



写真(4-2) 初期粒子の顕微鏡写真



写真(4-3) フロック撮影用セル



写真(4-4) フロックの接写写真

## 参考文献 (第4章)

- 1) 丹保憲仁・小笠原光彦, 管路によるフロック形成の研究, 水道協会雑誌, 426号, 昭.45.3, p.29~39
  - 2) 丹保憲仁・山田浩一・穂積 準, フロック強度に関する研究, 水道協会雑誌, 427号, 昭.45.4, p.4~15
  - 3) 角田省吾, 凝集攪拌槽の研究(I), 水道協会雑誌, 408号, 昭.43.9, p.22~30
  - 4) Swift,D.L., Friedlander,S.K., The Coagulation of Hydrosols by Brownian Motion and Laminar Shear Flow, Jour. Colloid Science, Vol.19, p.621, 1964
  - 5) Hidy,G.M., On the Theory of the Coagulation of Noninteracting particles in Brownian Motion, Jour. Colloid Science, Vol.20, p.123, 1965
- 注) この章の一部は下記の論文ですべてに発表済みである。  
丹保憲仁・渡辺義広, フロッキュレーターの合理的設計(Ⅱ), 水道協会雑誌 441号, 昭.46.6, p.2~14

## 第5章 フロック形成過程のシミュレーション (数値実験)

5-1 はじめに

第4章ではフロック形成基本式に基づいて定義されたフロック形成操作指標である $m$ 値,  $S_m$ 値,  $K_F$ 値によって多くの実験結果を整理し, 普遍的な無次元・標準化を行うことができたと云った理論の実験的展開によってフロック形成過程を定量的に明らかにしてきた。

これまでに用いてきたフロック形成の基本式は, (1)最大成長度 $S_m$ に対する以前の大さを持つフロックが形成される場合には, 衝突したフロック同士は必ず合-する, (2)フロックは成長するにつれて間隙水を取り込みその濃度を減ずる, (3)最大成長度 $S_m$ を越える大きさのフロックを形成する衝突はフロックの成長には無効であるといった諸条件(仮定)の下に, 局所等方性乱流の粘性領域での拡散輸送支配として導かれた式(3-29)である。基本式中の特性値 $m$ ,  $K_F$ ,  $S$ (または $S_m$ )はそれぞれ式(3-16), 式(2-6), 式(3-33)で定義されている。

通常、フロック形成操作におけるフロックの最大成長径 $d_{max}$ は初期粒子径 $d_1$ の100倍程度にも達する(例えば,  $d_1 = 5 \sim 10 \mu$ で $d_{max} = 500 \sim 1000 \mu$ )。したがって, 最大成長フロックへの初期粒子集合数 $S$ は式(3-33)から,  $S = (100 \sim 200)^{1.5 \sim 2.0} \div 10^3 \sim 10^5$ (ここで,  $K_F = 1.0 \sim 1.5$ )となり, フロック形成の進行を式(3-29)によって計算によって求めるためには $10^3 \sim 10^5$ 元連立微分方程式を解かねばならない。現在実用化されている大型電子計算機を用いるならば,  $10^4$ 元連立微分方程式の解を求めることも原理的には可能である。しかし, 計算時間とその費用は膨大となり, 実用に供しうる範囲をカバーできる数値解を直接求めることは実際問題として不可能に近い。

しかしながら, 前章における実験結果から明らかにされたように, 成長平衡時におけるフロックの粒度分布は自平衡分布であり最大成長度 $S_m$ に無関係に一定の分布形となる。そこで, 適当な $S$ (計算機を用いて適当な計算時間で十分な精度の解が得られる数値)に対するフロック形成基本式(3-29)の数値計算の結果を何等かの方法で標準化した分布形に変換し, その標準化分布を用いるならば $S$ の $S_m$ についての拡張した議論が可能であろうと予想されるに至った。

そこで, 本章ではフロック形成基本式(3-29)の数値解

を電子計算機により求め、フロック形成過程のシミュレーション（電算による数値実験）の結果と第4章で明らかにされたフロック形成実験の結果とを照合し、本論で導かれたフロック形成理論の妥当性を検討しより正確なフロック形成過程の定量化を行なうこととする。

## 5-2 フロック形成基本式の数値解法

成長平衡時におけるフロック粒度分布は適当な変数変換を行なえば、最大成長度  $S_m$  等のフロック形成条件に独立な一定の分布形となる自平衡分布となる事が実験によって確認された。本章では、 $S = 25, 50, 75, 100, 200$  と云った比較的小さい  $S$  についてのフロック形成基本式の数値解を求め、その標準化を行ない議論の基礎とすることとした。

計算は北海道大学大型計算機センター所属の FACOM 230-60 を用い、表(5-1)にフローチャート表(5-2)にプログラムを示すような Range-Kutta-Gill 法による数値積分によって行なった。計算に際しては、 $R$  倍粒子の無次元化個数  $N_R$  の値が  $10^{-8}$  以下となればすべて  $N_R = 0$  とした。それは、実際のフロック形成において  $n_0 = 10^6 \sim 10^7$  個/cm<sup>3</sup> であり、 $N_R = n_R/n_0 = 10^{-8}$  であれば  $n_R$  の実数値は  $10^{-1} \sim 10^{-2}$  となり、最小単位の数値にも達せず無視できるからである。また、計算に当る独立変数  $m$  のさざみ  $\Delta m$  は  $S = 25, 50, 75$  では  $\Delta m = 0.01$ 、 $S = 100, 200$  では  $\Delta m = 0.005$  とすることによって計算の全範囲で  $\sum_{i=1}^S i N_i = 1$  ( $i=1 \sim S$ ) の条件を満たすことができた。表(5-3)はさざみ  $\Delta m$  を変化させた場合の計算結果の一例を比較のために示したものである。表(5-4)は計算を行なった  $S$  と  $K_p$  の組合わせを示したものである。

式(3-29)を上述の方法で解いた結果は各々の無次元攪拌継続時間  $nt$  における、各  $R$  倍粒子 ( $R = 1 \sim S$ ) の無次元化個数  $N_R = n_R/n_0$  として得られる。表(3-5)は結果の一例について示したものである。

## 5-3 衝突合-確率関数を導入したフロック形成基本式

### 5-3-1 衝突合-確率導入の必要性

図(5-1)は  $S = 50$ 、 $K_p = 1.2$  の場合についての基本式(3-29)の計算結果を、図(5-2)は  $S_m = 2.0 \times 10^6$ 、 $K_p = 1.25$  についての実験結果について、横軸は無次元攪拌継続

続時間 $m$ を初期に $R$ 倍粒子(実験の場合には見かけ粒子倍數 $R_m$ )の存在百分率(計算の場合には体積, 実験の場合には重量)をとり, フロック粒度分布の攪拌継続に伴う推移を示したものである。図(5-1)を見ると, 組成の主要な部分を占めるものはフロック形成の初期にあつては $1 \sim 10$ 倍粒子であり, 終期では最大成長粒子である $41 \sim 50$ 倍粒子群であり $m = 0.5$ でほとんど100%の粒子が最大成長(50倍)粒子になつてゐる。一方, 図(5-2)に示されてゐる実験結果は前章で明らかにしたような成長平衡状態の分布に達し,  $m = 0.5$ 以降では $R_m = 10^5 \sim 10^6$ に及ぶ範囲の粒子が定常的に存在する。

この様に, 理論式の數値解と実験値の間に矛盾が生じたのは, 式(3-29)の衝突速度式をそのまゝ同一速度式としてその入りの形で用いる事に問題があるものと考えられる。式(3-29)はフロック形成速度が衝突する粒子の個數とそれらの粒子径の2乗の因子のみにまつて定められ, フロック化が衝突合一行く速度が衝突回数に等しいとして与えられ長ものであるから, 大きな粒子の増加・消滅の速度は小さな粒子のそれと比べて著しく有利となり, 最終的には生成するのみで消滅するものとあつて最大成長粒子のみが存続する一様分布となる。したがつて, 基本式(3-29)を解いて得られる実験で明らかにされた様な最大成長自平衡分布は得られず, 単一組成の最大成長粒子のみが最終的に生じて来るような上述の矛盾が生じる。このと同様の矛盾はFairとGemmill<sup>2)</sup>が層流条件下におけるフロック形成速度を, Smoluchowskiの式による數値解にまつて論じた場合にも生じてゐる。

そこで, フロック形成基本式を何等かの形で修正して, 実際のフロック形成過程を忠実に示しうるような工夫を行なふなければならぬ。第3章で行なつた理論の實驗的展開にもある場合には, 理論式(3-29)は $m, K, S_m$ の3つの無次元指標で實驗値を標準化するために用いたもので, この矛盾を避けることができた。

以上の点からフロック形成速度式を實用化するためにはフロックの衝突過程と共にその合一過程についても検討を加えなければならぬ事が明らかとなつた。

衝突と合一の過程を分けて考え衝突した粒子が必ずしも合一しないと云う考え方は, Smoluchowskiにまつて $rapid$  coagulationと $slow$  coagulationの2分類として論じられてゐる<sup>3)</sup>。Smoluchowskiが与えたブラウン運動による集塊現象の初期の段階における合一速度式の内で, 衝突した粒子は必ず合一すると云う $rapid$  coagulationの

場合の反応継続時間  $t$  における粒子群の単位体積中の総粒子数  $n_t$  は、式(5-1)によって与えられる

$$n_t = \frac{n_0}{1 + 4\pi D_1 R n_0 t} = \frac{n_0}{1 + t/T_c} \quad (5-1)$$

ここで、 $n_0$ ：反応開始時( $t=0$ )に存在した単位体積中の全粒子数( $1/\text{cm}^3$ )、 $D_1$ ：初期粒子の相互拡散係数( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )、 $t$ ：反応開始後の経過時間(sec)、 $R$ ：粒子の衝突半径(cm)、 $T_c$ ：凝集時間(coagulation time)と称する(sec)、式(5-2)で定義され、単位体積中の粒子数が半減するに要する反応時間である。

$$T_c = \frac{1}{4\pi D_1 R n_0} \quad (5-2)$$

衝突した粒子がすべて衝突せず、その内ある割合  $\alpha$  のみしか合-するような集塊化過程を Smoluchowski は slow coagulation と称し、その場合の凝集時間  $T_c$  は式(5-3)で与えられる。

$$T_c = \frac{1}{4\pi D_1 R n_0 \alpha} \quad (5-3)$$

Smoluchowski の rapid, slow coagulation の関係を図示すると図(5-3)のようである。図(5-3)からも明らかになるように、slow coagulation は只単に一定の衝突合-確率  $\alpha$  を導入しただけのものであるから、図(5-3)の横軸を  $t^*$  から  $t^*/\alpha$  に変換すれば rapid coagulation と slow coagulation の過程は全く同一のものとなり、同一粒度組成に達する反応時間が  $1/\alpha$  倍になることができる。

Hahn と Stumm<sup>4)</sup> は Smoluchowski と同様の見地から衝突合-確率を考え、理論による rapid coagulation の速度と実験により求めた実際の凝集(集塊)速度とを比較して、種々の凝集条件下における衝突合-確率  $\alpha$  を求めた。図(5-4)は  $\alpha$  を pH と凝集剤添加量の関数として示したものである。

Fuchs<sup>5)</sup> は rapid coagulation と slow coagulation の差を、衝突合-の際の界面土における反発エネルギー障壁の存在を考慮することによって理論的に扱った。しかし、乱流下でのフロック成長過程において衝突する粒子は直径が数十から数百  $\mu$  に達するので、丹保が先に明らかにしたよう

に<sup>6)</sup>エネルギー障壁はほとんど問題とならず、Fuchsの考え方をフロッキュレーター内のフロック成長現象に適用することはできない。

これらの見解(Hahn et al, Fuchs)はいつでもrapid coagulationとslow coagulationの差を衝突する粒子表面に残存している反撥エネルギーによるものとし、しかも $\alpha$ も一定値と考えているために、実際のフロック形成過程におけるフロックの粒度分布が攪拌継続時間の増加と共に歪んで行く現象を説明し十分に追従しうるモデルを提示できない。

そこで、次節で明らかにするもう一つのフロック形成過程での衝突合-確率がフロック粒度組成の関数となるモデルを提案し、rapid coagulationとslow coagulationの考え方を拡張・適用化して、式(3-29)にフロック形成過程における衝突合-関数 $\alpha_f$ を導入して、実際の現象を正確にシミュレートできるフロック形成式を求める工夫を試みることにする。

### 5-3-2 衝突合-確率の考え方

簡単のためにフロックを球形と仮定し、図(5-5)を参照しながらフロックの合-過程を考えることにする。

ある攪拌強度下における最大成長フロック径 $d_{max}$ の半分の直径 $1/2 d_{max}$ を持つ粒子同志の衝突合-によって生成するフロックは、体積が最大成長粒子の $1/4$ にすぎないのに合-して生じた2粒子が球形に再整形しなければ(液滴の合-現象では合-粒子は合-前の2粒子の体積の和に等しい球形になるが、固体フロックではような再整形は生じない)A方向へは成長しえず、A方向に衝突した粒子は合-することなく乱流変動による剪断破壊力によって衝突前の状態に戻される。粒子Pが衝突後合-できるのは、最大成長径内に納まる位置に衝突した場合のみである。しかも、実際に形成されるフロックはアルミニウムフロックみ密度を求めた際に仮定したような形状係数は0.8程度となり、その形状は図(2-4)の様であり球形で考えるよりもっと小さな粒子においても成長方向に制限を受けるようになる。

また、最大成長径内に納まる位置に衝突したとしても、2粒子が合-し結合を保持するためには合-状態にあるフロックの各結合点において、結合力がフロックに加えられる剪断破壊力を上廻る必要がある。剪断力は粒径の増加に比例して大きくなるので、合-状態を維持するため

に必要な結合力も粒径と共に増大しなければならぬ。そこで、増大する剪断破壊力に耐えてフロックが成長して行くためには、三次元的な補強を受けながらその粒径を増して行かねばならぬ。

一方向への配列が卓越するような成長では、その方向への連鎖の長さが  $d_{max}$  に達する以前にフロックは解体することになる。フロック寸法の各方向への増大は剪断破壊力と結合力とのバランスの上に三次元的にほぼ一様に行なわれることとなる。フロックの形状を  $0.8$  程度の形状係数で代表させよう。上述のようにフロックが合一後球形粒子に再整形しないため、剪断破壊力と結合力とのバランスを保ちうる様に一方向へののみ配列が卓越しないこととする。

今、 $(R-i)$  倍粒子と  $i$  倍粒子の衝突合一によって  $R$  倍粒子が形成される場合を考える。図(5-6)からも明らかのように、フロックへの初期粒子の集合数  $N$  が大きくなり最大成長粒子(初期粒子集合数  $S$ ) に近づけば近づく程、 $R$  倍粒子を形成する粒子の衝突の内、合一を保ち得る組合わせが減り、 $R=S$  の場合には合一の確率がほとんど 0 となるものと考えられる。この様に考えて行くと、何故現在まで用いられて来た衝突合一確率を常に 1 としたフロック形成基本式が最終的にはすべて同一寸法の最大成長粒子( $S$  または  $d_{max}$  粒子)のみを与え、実際のフロック形成では大小粒子が混在する最終の成長平衡分布を示すかが理解し得よう。

衝突合一確率を考える場合に、粒子の衝突合一の機構を微流体力学的(microhydrodynamic)に追って行くのが問題を最も明確にするための方途であろう。しかし、現在の所この方向からの着目現象へのアプローチには数多くの困難があろう。そこで、本論文においては便法のひとつとして定性的に受け入れ得る特性関数を衝突合一確率関数として導入し、実際のフロック形成プロセスと対比して用いた関数形の正当性を判定し諸係数を計算し、フロック形成基本式(3-29)を修正して直ちに実用に供し得るよう、理論の数値解による展開(フロック形成過程のシミュレーション)のための基本式を提示する方向を採ることとした。

### 5-3-3 衝突合一確率関数の定式化

前述の諸項目を総合して考えると、フロックの衝突合一確率を示す関数  $\alpha_f$  に関与する因子は次のようなものである。

すなわち、①与えられた攪拌強度下でのフロックの成長限界を示すフロックの最大成長径  $\alpha_{max}$  (この値は式(3-34)に基づいて三次元的なフロックへの初期粒子集合数  $S$  として理論式に導入される)、②着目している衝突合-によって形成されるフロックへの初期粒子集合個数  $R$ 、および③初期粒子の表面状態によって決まってくる係数  $\alpha_0$ 。この  $\alpha_0$  は前節で *rapid coagulation* と *slow coagulation* を論じた際に Hahn 等が導入した係数  $\alpha$  と同様のものであるが、平均的な反捲エネルギー障壁を考えるよりは La Mer 等の考えた架橋現象を示す、重合凝集剤の初期粒子表面への被覆度と云った初期粒子の表面状態の局所性に支配される因子であろうと解釈される。

したがって、これらの関係を示す衝突合-確率関数  $\alpha_f$  の一般式は、

$$\alpha_f = F(\alpha_0, S, R) \text{ ----- (5-4)}$$

さらに、上述のように  $\alpha_f$  は着目粒子と最大成長粒子との大きさの比によって決まると考えられるので、 $S$  と  $R$  の関係は  $R/S$  なる形に書き換えることができるから、

$$\alpha_f = F(\alpha_0, R/S) \text{ ----- (5-5)}$$

そこで、式(5-5)と  $\alpha_f$  の定性的・定量的特性を考慮すると、 $\alpha_f$  を示す関数形の1つとして式(5-6)、(5-7)が考えられる。それを用いて  $R$  倍粒子の形成に対する衝突合-確率を表現し議論を進めて行くこととする。

$$2 \leq R \leq S \text{ で, } \alpha_f = \alpha_0 \text{ ----- (5-6)}$$

$$S < R \leq S \text{ で, } \alpha_f = \alpha_0 \left(1 - \frac{R-S}{S+1-S}\right)^n \text{ ----- (5-7)}$$

式(5-6)の持つ意味は、考えるフロックへの初期粒子集合数  $R$  が  $S$  個以下である場合には結合したフロック粒子の解体を全く考える必要はないが、衝突がすべて合-ではなく架橋作用を示す凝集剤の初期粒子表面への被覆状況と残りもしくは成長した反捲エネルギー障壁によって、衝突数の内  $\alpha_0$  の割合のみが合-すると考えるものである。

初期粒子集合数  $\delta$  を越えたと上述のようにつロツクの衝突の方向にまっすは、破壊が起こりつロツクが再解体する場合が出てくる。したがって、式(5-7)の意味する所は  $R = \delta$  までは  $\alpha_f = \alpha_0$  であらうが、 $R > \delta$  となると合一確率は減じ始め  $R = S + 1$  でのになる事を示している。その中間の推移を示すのにべき級数を用いる方法等もあるが、ここでは  $R$  次のもス項式で示すこととした。

$R$  倍粒子を形成する粒子の組合わせ ( $R-i$ ) と  $i$  は種々あり厳密には各々の組合わせ毎に  $\alpha_f$  の値は異なるはずであるが、ここでは微流体力学的に問題を論じたいので、 $R$  倍粒子を形成する場合の平均値を式(5-7)にまっす一括表示するに止るうざるを得ない。

$\delta$  をいかなる値にとるか理論的に決定することがむずかしいが、つロツクを形成している初期粒子間の結合力と乱流変動による剪断破壊力の関係を考慮することによって、大略の値の推測は可能である。もし、考える条件下での最大成長粒子(直径  $d_{max}$ , 初期粒子集合数  $S$ ) 内の1方向のみ初期粒子が並ぶと云う極端な場合を想定すると、 $S \frac{\pi d^2}{4}$  個並ぶうわけであるがつロツクの最大成長径は結合力と破壊力か3次元的に考えて釣合っすうとして求められものであるから(第2章4節参照)、1方向の配列(単純な並びずつなぎ)のみでその長さが  $d_{max}$  に近成長するといえる。したがって、 $\delta = S \frac{\pi d^2}{4}$  まで  $\alpha_f = \alpha_0$  の状態は存在しえぬ。

また、最大成長粒子( $S$  倍粒子)内に一様な空隙を持つて初期粒子が配列されてる場合の初期粒子の1方向の並び数は  $S$  個である。この場合、 $S = 10^3$  (通常のつロツク形成では可成り強い攪拌条件下で形成されるつロツクであり、 $\alpha_1 = 5 \mu$ ,  $K_S = 1.2$ ,  $d_{max} = 100 \mu$  程度でこの条件が満たされる)とすると、1方向に並ぶ初期粒子の数は10個となる。しかし上述のようこの様に単列に初期粒子が並んでるつロツクは存在しえぬので、この場合の  $\delta$  は高々  $10^3$  のオーダーであるに過ぎない。

したがって、式(5-7)中の  $R$  と  $S$  は通常問題となるつロツク形成の範囲では、 $\delta$  に比して著しく大きい場合がほとんどである。そこで、 $R, S \gg \delta$  として式(5-6), (5-7)を実用に際しては次のような形の、衝突合一確率を表わす一本化した式として用いても良いであらう。

$$\alpha_f = \alpha_0 \left(1 - \frac{R}{S+1}\right)^n \text{-----} (5-8)$$

式中の初期衝突合-確率 $\alpha_0$ ，指数 $n$ を理論的に求めることは困難であるが，これらの値は次節のような方法で試行錯誤的に数値解の結果と実験結果とを対比することによって確定できる。

式(5-8)によって衝突合-確率が与えられたので，これをフロック形成基本式(3-29)に導入することによってフロック形成速度を与える実用基本式が式(5-9)のようになると。

$$\frac{dN_R}{dm} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{R-1} \alpha_0 \left(1 - \frac{R}{S+1}\right)^n \left[ i^{\frac{1}{3-K_S}} + (R-i)^{\frac{1}{3-K_S}} \right]^3$$

$$N_i N_{R-i} - N_R \sum_{i=1}^{S-R} \alpha_0 \left(1 - \frac{R}{S+1}\right)^n \left[ i^{\frac{1}{3-K_S}} + R^{\frac{1}{3-K_S}} \right]^3 N_i$$

----- (5-9)

ここで， $\alpha_0$ ：初期衝突合-確率， $n$ ：衝突合-確率関数の指数，他の記号は式(3-29)と同じ

#### 5-4 衝突合-確率関数を導入したフロック形成基本式による数値実験(シミュレーション)

##### 5-4-1 衝突合-確率関数の指数 $n$ の決定方法

新たに衝突合-確率関数を導入して，数値計算のためのフロック形成の実用基本式(5-9)のようになるとは，実際の計算を行なうためにはその指数 $n$ と係数 $\alpha_0$ を知らなければならぬ。フロックの集塊化と解体の機序はどのような場合にもほとんど同じと考えられるので，この二つの数値の内 $n$ は凝集フロック形成条件と無関係の一定値と考えられて可であろう。そこで， $n$ は一度決定すれば一般的な値として汎用することが可能であろう。また，無次元攪拌継続時間 $\mu$ が $\mu$ となつて分布が成長平衡状態となつた場合を考えると，この時の分布形が自平衡性を持つていれば $n$ は無関係に $n$ を決めることが可能である。この場合，式(5-9)の両辺を $\alpha_0$ で除しておけば独立変数 $\mu$ の代わりに $\alpha_0 \mu$ に伴う分布を考え，しかも自平衡時の分布形は $n$ に無関係であるから， $\alpha_0 \mu$ しかつて $\alpha_0$ と独立に $n$ の値をまず決めることができる。

そこで，衝突合-確率関数中の指数 $n$ を決定するため式(5-9)の $n$ を適当な範囲で変化させて，成長平衡時の粒度分布を数値解によって求め，前章で得られた実験の成長

平衡分布に最も良く適合する分布を与える  $n$  の値を探索することとした。

計算は  $S = 50$ ,  $K_p = 1.2$  の場合に  $n = 1$  とし、(前述したように、成長平衡時の粒度分布形は  $n$  を考えなくとも変化する)  $n$  を 1, 2, 4, 6, 8 と変化させて行なった。実用上の成長平衡に達したと考えられる分布に至るに要する無次元攪拌継続時間  $m_e$  の値を知るために、計算結果を図(5-7)のよう横軸に  $m$  を縦軸に標準化フロック体積  $V^*$  (1倍粒子のみが存在した時の全フロック体積を1としたもの) をとり、フロック体積の  $m$  の増加に伴う増分を調べた。フロック体積の増加がほとんど無くなつて来る時の  $m$  を便宜的に成長平衡に達した無次元攪拌継続時間  $m_e$  とし、その時の粒度分布を実測の自平衡分布と対比して指数  $n$  の適値を検索した。

$n$  を 1 から 8 まで変化させて得られた各  $m - V^*$  曲線の各々の成長平衡到達時  $m_e$  におけるフロック群の粒度分布を、横軸に粒子倍数  $R$  縦軸に  $R$  倍粒子の体積がその時の全体積中に占める割合をとって描いたものが図(5-8)である。図(5-8)の粒度分布を横軸に無次元沈降時間  $\theta$ 、縦軸に除去重量百分率  $F(\theta)$  をとって第4章3-4節で示した  $m$  曲線で表わし、さらにそれを標準化し第4章3-5節で明らかとした標準化成長平衡  $m$  曲線(図(4-17))と対比したところ  $n = 6 \sim 8$  で最も良く適合を示した。 $n = 6$  を用いて得られた数値解を後で詳述するような方法で標準化してプロットしたものが、図(5-21)に見られるように実測で得られた成長平衡曲線(自平衡分布曲線)と良く一致している。その場合の標準化係数  $K^*$  は 0.08 となり、前章の図(4-16)から推測される値に近い数値となった。

これらの結果から、衝突合-関数の指数として  $n = 6$  と云った値をここでは採用することとした。

#### 5-4-2 数値実験(シミュレーション)の結果

上述のようにして推算された衝突合-確率関数の指数  $n$  を 6 とし、表(5-3)のよう組合せにまつて粒度分布の推移状態を式(5-9)の数値解によつて求めた。この場合、衝突合-確率関数  $\alpha_f$  の係数  $\alpha_0$  の値が未知であるから式(5-9)の両辺を  $\alpha_0$  で除し、独立変数を  $m$  の代わりに  $\alpha_0 m$  として計算を行なった。したが、衝突合-確率関数の形としては、

$$\alpha_f' = \left(1 - \frac{R}{S+1}\right)^6 \text{-----} (5-10)$$

が用いられることになる。  $K_p = 1.2$  で  $S = 50, 75$  の例について計算結果を横軸に無次元攪拌時間  $\alpha m$ 、縦軸に  $R$  倍粒子の存在百分率をとって粒度組成の推移を示すと、図(5-2)に示した実験の粒度分布推移のパターンを示し成長平衡状態が出現した。それを図(5-9), (5-10)に示した。

計算結果を横軸に粒子倍数  $R$ 、縦軸に累加粒子体積率  $\phi$  ととり無次元攪拌継続時間  $\alpha m$  をパラメーターとして粒度分布の推移を  $S = 50, K_p = 1.2$  および  $S = 100, K_p = 1.2$  について示すと図(5-11), 図(5-12)のようである。

この様にして計算を行なった  $S = 50 \sim 200, K_p = 1.2 \sim 1.4$  の範囲の粒度分布推移の結果を、さらに標準化しよるべきフロック形成過程に適用できる標準化された粒度分布の推移と成長平衡を示す曲線を次節以下において工夫する。

## 5-5 成長平衡時における標準化されたフロック粒度分布

### 5-5-1 凝集条件の等しい成長平衡分布の標準化

前章において成長平衡時の標準化無次元時間沈降累積量曲線(標準化  $m$  曲線)の存在を実験によって明らかにした。したがって、前節の諸計算の結果についても同様の成長平衡標準化分布が存在するはずである。

そこで、凝集条件の等しい  $K_p$  の等しい  $S = 50, 75, 100, 200$  の  $K_p = 1.2$  の諸計算の結果を用いて、粒度分布曲線の標準化の第1段階を前章に示したと同様の考え方で実行した。例に図(5-12)に示した分布を用いてその標準化の方法について述べることにする。

成長平衡に達してると考えられる累加フロック体積百分率曲線の、累加体積が50%となる粒子倍数 ( $R_{50-ult}$ ) を示す横軸の値を1(単位)として図(5-12)の横軸の下段のように数値  $R^*$  を目盛る。すなわち、横軸の目盛を  $R$  から  $R^* = R / R_{50-ult}$  に変換することになる。同様の操作を  $S = 50, 75, 200$  の場合についても行ない、横軸に  $R^*$ 、縦軸に累加体積百分率をとって計算結果をプロットしたところ図(5-13)に見られるように、最大成長度を異にしてもすべし成長平衡時の粒度分布は完全に1本の標準化された分布で示されることが確認され、前章の実験結果と併用して自平衡分布の存在を明確に示すことができた。

これらの関係から、  $K_p = 1.2$  では  $R_{50-ult}$  の値はいづれの場合も最大成長粒子への初期粒子集合数  $S$  の42%の値であり、  $R_{50-ult} \div 0.42 S$  として標準化分布を所定の  $S$

の粒度分布に変換することができるとする。

与条件で形成しうる最大フロックの体積を  $V_{max}$ ，成長平衡分布において累加フロック体積が 50 % を占めるフロックの体積を  $V_{50-ult}$  とすると，一般に， $V_{50-ult}/V_{max} = \text{一定}$  であるから，

$$\frac{V_{50-ult}}{V_{max}} = \left( \frac{R_{50-ult}}{S} \right)^{\frac{3}{3-K_g}} = \text{const.} \quad \text{---(5-10)}$$

したがって，ある  $K_g$  についての  $S$  と  $R_{50-ult}$  の関係が分かれば，いれはすべての  $K_g$  についてのそれらの関係を知ることができるとする。  $K_g = 1.0$  については，

$$(0.42)^{\frac{3}{3-1.2}} = \left( \frac{R_{50-ult}}{S} \right)^{\frac{3}{3-1.0}} \quad \text{---(5-11)}$$

式 (5-10) より，  $K_g = 1.0$  ならば  $R_{50-ult} = 0.39 S$   
同様にして，

$$K_g = 1.4 \text{ ならば } R_{50-ult} = 0.48 S$$

よって，上述の結果より凝集条件が異なる  $K_g$  が与えられれば種々のフロック形成条件における成長平衡時の粒度分布は図 (5-13) から求められることとなる。他の  $K_g$  の値についても同一の手順で成長平衡時の分布は標準化分布として示すことができる。

### 5-5-2 凝集条件の異なる成長平衡分布の標準化

第4章においても，また前節での粒度分布の標準化においても凝集条件の等しい（具体的にハフロック密度関数の指数  $K_g$  が同一値を持つ）フロック群の成長平衡分布が標準化フロック指数  $R^* = R/R_{50-ult}$  とか，標準化無次元沈降時間  $\theta^* = K^* \theta$  などによって一本の自平衡分布曲線に帰着することが明らかとされた。本節では凝集条件を異にする（ $K_g$  が異なる）場合についての分布の標準化を，第2段階として考えてみる。

最大成長度も等しくし（ $S = 50$ ），フロック密度関数の指数  $K_g$  を大幅に変化させた（ $K_g = 1.0, 1.2, 1.4$  とした。実際のフロック形成では  $K_g$  は  $1.0 \sim 1.5$  の範囲にある）場合の計算によって得られた成長平衡分布の累加曲線（例えば図 (5-11) の  $\alpha_m = 3.0$  の曲線）の横軸の粒子指数  $R$  を標準化フロック指数  $R^*$  に変換し，さらに  $R^{*3/3-K_g}$  に変換

あると図(5-14)のようになる。図に示されるように、 $K_p$ が異なっても横軸を  $R^{*3/2-K_p}$  にとっておけば、成長平衡分布は常に1本の標準化汎用累積粒度分布曲線で示されることとなる。図(5-14)のような横軸の汎用化が可能となる理由は、フロック形成基本式(5-9)中のフロックの衝突半径を示す項が  $R^{1/2-K_p}$  なる密度補正を受けた無次元項として定義されてゐる事からも容易に理解しえる。したがって、フロック体積も空隙を含めた密度補正を行なった無次元直径  $R^{3/2-K_p}$  から直ちに求められることになる。

その故に、図(5-14)に示した累加体積百分率曲線は、最大成長度  $S_m(S^{3/2-K_p})$  とフロック密度特性の個々に関係することなくフロック群の成長平衡時の粒度分布を示す曲線と考えられる。

このような自平衡分布に達してゐると見なせる無次元攪拌継続時間  $m_c$  は、最大成長度  $S_m = (\alpha_{\max}/\alpha_1)^3$  にまつて累なり  $\log S_m$  と  $\log m_c$  の間に直線関係が成立することが第4章4-2節で実験値を用いて明らかとされた。本章において、この関係をも含めて成長平衡に達する間の過渡状態にも上述の標準化の議論を拡張して行なつてみた。

## 5-6 フロック群の成長過程における標準化された粒度分布

### 5-6-1 標準化の手順

フロック群の成長平衡時における粒度分布は、図(5-14)のような標準化汎用粒度分布曲線(自平衡分布曲線)で一義的に示しうることも明らかとなつた。しかし、そこに至る迄の粒度分布の推移の標準化もまたフロック形成池の設計には必要欠くべからざるものである。

フロック形成攪拌時間の経過に伴うフロック粒度組成の変化は  $S$ ,  $K_p$ ,  $m$  の3つの無次元指標によつて(他に  $\alpha$  が  $m$  の補正指標として入るが、これについては後で論ずる)示す事ができる。この内、自平衡分布によつては  $S \cdot K_p$  のみが生じる分布形決定の因子であつたが、過渡状態を考えなくては行かぬ場合にはさらに  $m$  値によつての検討も必要となる。

実際のフロック形成池の設計・運転を考えしてみると、 $m$  値を構成する諸因(式(3-16)参照)のうち設計段階で固定されてしまふものは実攪拌継続時間(フロック形成池の平均滞留時間)もであり、運転中に変化させうるのは攪拌強度因子  $\varepsilon$  である。また、原水条件によつて定まつてくるものは  $\alpha$ ,  $n_0$  (凝集条件をも加味して)すなわち原水濁

度である。運転中に操作しうる品にしまも式(2-11)の関係から最大成長粒子径に影響するので、後続する沈殿池の除去特性が固定されてゐる以上は大幅に変化させることはできない。

しかし、つ、低濁原水がフロック形成池に流入して来る場合には  $\alpha_m$  の  $C$  (濁度) が小であるために、実滞留時間  $t$  ではその条件での成長平衡に達するのに必要な無次元攪拌継続時間  $m_c$  に至ることができないで ( $m < m_c$ )、成長過程の途中で次段の沈殿池へ流出して行く。

また、フロック形成池—沈殿池—ろ過池と云った急速ろ過システムの最適な負荷配分を行なうための不可欠な資料として、成長過程におけるフロック群の粒度分布を知る必要がある。

そこで、フロック群の成長過程にある分布を汎用できる分布形に標準化しうるかを次のようにして検討することとした。標準化は先に成長平衡時の粒度分布(自平衡粒度分布)を作成したと同様に、累加粒度分布曲線[例之は図(5-12)]を用いて次のように計算結果を処理して行なつた。

1) まず最初に、 $S$  と  $m$  を異にする個々の累加粒度分布曲線の累加フロック体積率 50% を与える標準化粒子倍数  $R_{50}^*$   $= R_{50} / R_{50-4t}$  を求める ( $R^*$  の定義にしたがつて、実用上の成長平衡分布では  $R_{50}^* = 1$  であり、それ以前の分布では  $R_{50}^* < 1$  である)。

2) 次に、 $S$  を異にする各々の粒度分布変化曲線について攪拌継続時間  $\alpha_m$  を横軸にとり、各々の時間  $\alpha_m$  における標準化 50% 累加粒子倍数を縦軸にとつて ( $\alpha_m$ ) —  $R_{50}^*$  の関係を描くと図(5-15)のようになる。ここでは  $K_F = 1.2$  の  $S = 50, 75, 100, 200$  の計算結果を用いた。

3) 図(5-15)から、 $S$  の異なる場合にある特定の  $R_{50}^*$  値に達するまでに必要な無次元攪拌継続時間  $\alpha_m$  を読みとつて整理すると表(5-5)の第2~5欄のようである。

4) このようにして得られた  $R_{50}^*$  値の等しいフロック粒度分布は、横軸に  $R^*$  をとり縦軸に累加体積百分率をとりプロットすると、図(5-16)のように  $S$  および  $\alpha_m$  に関係なく同一分布曲線に帰する。

したがって、50% 累加体積を示す標準化粒子倍数  $R_{50}^*$  の等しいフロック群はすべて1本の標準化分布曲線で示さ

れる事が明らかとなった。

図(5-17)はさらにフロック物性(フロック密度関数の指数 $K_g$ )の異なる場合に、自平衡時の汎用標準化粒度分布曲線を求めたと同様の方法で図(5-16)の横軸を $R^*$ から $R^*_{\text{終}} - K_g$ に変換して、 $S \cdot m \cdot K_g$ のフロック形成の主要因子のすべての変化に対応する汎用標準化フロック粒度分布を求めたのである。すなわち、この変換によって間隙水をも含めた見かけ上のフロック体積で問題を扱うことが可能となり、実際のフロック粒度分布は1本の汎用標準化累加粒度曲線にまとめられるようになった。

### 5-6-2 標準化粒度分布に達するに要する無次元攪拌継続時間

次に、最大成長度 $S_m$ を異にする個々のフロック形成操作の場合考えている分布に達するに要する無次元攪拌継続時間 $m$ を知りたいければ、図(5-17)の汎用粒度分布図を実験設計に用いることはできない。そこで、図(5-15)を作成したと同じ方法で、横軸に最大成長度 $S_m$ (あるいは $S$ )をとって縦軸に攪拌継続時間 $\alpha_m$ ( $\alpha$ が確定してはいないため、 $\alpha$ をも含めた変数とする)をとって、図(5-17)の汎用標準化累加粒度曲線の各々の $R^*$ 値に至るに必要な攪拌継続時間をプロットすると、図(5-18)のように $\log(\alpha_m m) - \log S_m$ 座標上で式(5-11)に示される直線関係が得られる。前章の式(4-12)で与えられた実験による自平衡分布に至る $m_e$ と $S_m$ と同様の関係が、ここでも再確認された。

$$m \propto S_m^{-\gamma} \text{-----}(5-11)$$

ここで、 $\gamma$ :  $\log(\alpha_m m) - \log S_m$ 直線の勾配を示す指数で、0.15~0.2程度の範囲の数値である。

式(5-11)の指数 $\gamma$ は図(5-18)から分かるように $R^*$ が大きくなるにつれて徐々にではあるが増加する。この事実は次の様に説明される。すなわち、分布が成長平衡に近づいてくると( $R^*$ が1に近づく)等しい分布形を与える無次元攪拌継続時間 $m$ の最大成長度 $S_m$ に対する依存度が高くなることによる。

図(5-18)を用いることによって、ある最大成長度 $S_m$ のフロック形成条件で攪拌を $\alpha_m m$ だけ継続した時の分布を示す標準化指数値 $R^*$ を知り、図(5-17)の曲線群に対応

するパラメーター  $R_0$  を用いればその時のフロック群の粒度分布を知ることが出来る。

なお、図(5-18)の横軸  $S_m$  は数値計算に用いた  $S$  を直接用いて計算したものでなく、 $0.6S$  から求めたものである。何故ならば、図(5-12)からも分かるように実際に形成されるフロック群中の最大フロックは本章3節のようない理由から、理論上成長しうる  $S$  倍粒子とはなうすは  $0.6S$  倍粒子であるからであり、実測値との対比のためにもその家設計への応用の上からこの様な考慮が必要である。

## 5-7 汎用標準化無次元時間沈降累積量曲線

### 5-7-1 作成手順

前節での議論によつて成長平衡分布に至る過程のフロック群の粒度分布を標準化することが可能となつた。そこで、本節ではこれらの成果を用いて第4章で明らかにした成長平衡分布に対する標準化曲線とそれに至る過程のフロック群の示す曲線を標準化し、フロッキユレーターの操作条件と次第の処理プロセスである沈殿池での除去率の相互関係を一見して評価できるような工夫を行なうこととする。第4章で示した実測値に基づいて、無次元沈降時間  $\theta$  と累積除去百分率  $g(\theta)$  の関係を無次元攪拌時間をパラメーターとして描いた曲線の標準化も前節で行なつたと同様に、成長平衡時の自平衡分布を基準として次のように行なうことが出来る。ここでは  $S_m = 1.2 \times 10^3$ ,  $S_m = 3.4 \times 10^6$  (共に  $K_g = 1.25$ ) の場合を例にとつて説明を行なうこととする。

第4章に示された  $g(\theta) - \theta$  の関係を後述の理由によりパラメーター  $m$  の選定を若干変えて再録したのが、図(5-19)と図(5-20)である。これらの図を用いて標準化曲線を求める手順は次の通りである。

いまず、最大成長度  $S_m$  を累にする成長平衡曲線を標準化したと同様に、図の横軸を無次元沈降時間に標準化係数  $K^*$  を掛けて、標準化無次元沈降時間  $\theta^* = K^* \theta$  に変換する。先に明らかにされた様に、 $\theta^*$  を用いると成長平衡時の曲線は1本の曲線に標準化される。

ロ) 前章での標準化の定義により、成長平衡時の標準化曲線の  $g(\theta^*)$  が 50% に達する標準化沈降時間  $\theta^*$  は  $\theta^* = 1.0$  % であるから、ここでは自平衡曲線を  $g^* = 1.0$  の曲線と

名付ける。50%除去に達する標準化無次元沈降時間 $\theta^*$ が1.0%であることを、 $g^*=1.0$ は意味している。

ハ)成長平衡分布に達するまでの諸攪拌継続時間 $m$ における各々の標準化沈降曲線の $g(\theta^*)=50\%$ を得る標準化無次元沈降時間 $\theta_{50}^*$ を求め、その値をその曲線を同定する指標値 $g^*$ とする。図(5-19)、(5-20)には $g(\theta^*)=50\%$ に達する $\theta^*$ が $\theta_{50}^*=1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ となるような $m$ 曲線を描いてある。したがって、各 $m$ 曲線を指数 $g^*$ で示すと $g^*=1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ の曲線となる。 $\theta_{50}^*$ すなわちパラメーター $g^*$ が大きくなる程、フロック群の粒度分布が小粒子側にある。

ニ)横軸に $\theta^*$ をとり縦軸に $g(\theta^*)$ をとって $g^*$ をパラメーターとして図(5-19)と図(5-20)を描き直すと、図(5-21)のように最大成長度 $S_m$ に関係なく $g^*$ を等しくする曲線はすべて同一の $g^*$ 曲線(標準化 $m$ 曲線)に帰着することが示される。

ホ)その他の実験値についても、同様の操作を行なうと図(5-21)に加える。

さらに、基本式(5-9)を数値積分で解いた結果を図(5-22)のように標準化 $m$ 曲線で書き表わし、その結果を図(5-21)上にプロットすると $g^*$ 曲線上の諸点のようになり、実験結果と実用基本式(5-9)の計算が非常に良く一致し式(5-9)の有用性が証明された。

実際の設計にこの汎用標準化無次元沈降曲線(図(5-21))を用いるためには、あるパラメーター $g^*$ を持つフロック群分布にどれだけの無次元攪拌継続時間 $m$ で達するかを知る必要がある。そこで、前節の図(5-18)の作成の場合と同様に実測された $m$ 曲線、例えば図(5-19)、(5-20)からある汎用化標準 $m$ 曲線(パラメーター $g^*$ )に達するに要する $m$ を求め、最大成長度 $S_m$ との関係を図示したのが図(5-23)である。

図から明らかのように、ある粒度分布 $g^*$ に達するのに必要な無次元攪拌継続時間 $m$ と最大成長度 $S_m$ の間には前節で求めた式(5-11)の関係が成立することかここでも確認され、 $S_m \div 10^7$ (実測)から $S_m \div 10^2$ (計算)と云った広範囲にわたる式(5-11)の有用性が明確となった。

## 5-7-2 衝突合-確率関数の係数 $\alpha$ の推定とその特性

図(5-18)を作成する際に、縦軸は衝突合-確率関数 $\alpha$ の係数 $\alpha_0$ が未知であったので $\alpha_0 m$ を採用した。そこで、実験から得られた $\log m - \log S_m$ の関係と数値解で得られた $\log \alpha_0 m - \log S_m$ の関係が同一であるべきことから $\alpha_0 m$ を推定してみることとする。

すなわち、図(5-18)と図(5-23)で $S_m = 10^3$ の場合の $\alpha_0 m$ と $m$ はそれぞれ約2.0と5.0であるから、両指標が一致するには $\alpha_0 \div 0.4$ となるはずである。また、図(5-22)に示すような $S_m = 300$ 、 $K_p = 1.2$ の数値計算の結果を、標準化曲線で表示したものと、図(5-23)と対比してみる。と表(5-6)のようになる。

これらの結果から、衝突合-確率関数の係数 $\alpha_0$ は $\alpha_0 \div 0.35$ 程度の値をとるであろうことが推測される。しかし、自平衡に達する付近の粒度分布の急激な推移が $m$ の増分に対して極めてゆるやかな部分の実験値からの推定では、粒度分布の推移が $m$ の増分に対して大きな値をとる $g^* > 1$ の場合に比して、ある分布に対応する $m$ 値を確定する精度は低下するであろう。

したがって、 $g^* = 1.0$  すなわち $R^* = 1.0$ の場合を除外して $\alpha_0$ を推定する方が確からしい値を推算しようと思われ、こので、最終的には $g^* = 1.5 \sim 2.5$ の場合を用いて $\alpha_0 \div 1/3$ 程度の値を推定した。

次に、 $\alpha_0$ の持つ凝集・フロック形成上の意義を若干考えてみることにする。

凝集の初期におりマけん濁してゐる素粘土粒子表面へ加水分解重合した凝集剤(または高分子凝集剤)等が吸着され、水でその一部を覆ったとする<sup>8)</sup>。しかも、表面電位が充分に小さいとか吸着ポリマーチェーンの長さが反撥エネルギーの丘と粒子表面との距離に比して充分長いような場合には、反撥ポテンシャルが無視しうる界面状態となつてゐるので粘土表面に吸着された凝集剤粒子(ポリマー)の自由端が接近して来る他の粘土粒子に吸着すればこの二つの粘土粒子は結合する。この場合、Van der Waals力のみでは充分な結合力を発揮しえないうことは、凝集剤が単純なイオンである場合には等電点付近でも良好なフロックが生じないといふことが事実で説明される<sup>9)</sup>。

この時の粘土粒子表面の高分子化した凝集剤の被覆度が異なると、凝集剤粒子の自由端が接近して来る他の粒子に共吸着される機会が異なってくる。この場合、凝集剤が被覆されてゐる部分同志または裸の粘土の表面同志が衝突しても結合は起こらないと考える。

今、高分子化した凝集剤による表面の被覆度の割合を $\theta$ 。

3とすると、2粒子が衝突しても合一でさない確率は裸の表面同志が衝突した場合の $0.7 \times 0.7 = 0.49$ と被覆された部分同志が衝突した場合の $0.3 \times 0.3 = 0.09$ で、統計して0.58が衝突しても合一でさない割合となる。したがって衝突しても合一でさる確率は裸の表面と凝集剤で被覆された表面とが衝突した場合の $2(0.3 \times 0.7) = 2 \times 0.21 = 0.42$ となる。

この様な単純な機構を仮定することによって $\alpha_0$ を推算すること表(5-6)のようになり、 $\alpha_0$ は0~0.5の間で変化するることとなる。勿論、凝集剤による粘土粒子表面の被覆度がある範囲外にある時には、表面の反撥電位が過大となって粘土粒子相互の接近が不可能となりフロック形成は進行しえない。

図(5-24)は丹保がかって報告した図であるが、前章での実験に用いた凝集条件であるカオリン50ppm、硫酸アルミニウム30ppm、pH 8.0と云った値と対比してみると、次のように上述の $\alpha_0$ の値の妥当性が理解できる。すなわち、硫酸アルミニウム100ppmでゼータ電位が飽和に達していることから凝集剤の被覆度が100%の値はほぼ100ppmとなる。この場合、硫酸アルミニウムの添加量による状態変化が無視しうるとすると、30ppm添加量は被覆度0.3程度と考えられる。したがって、表(5-6)から $\alpha_0$ は約0.4となるはずである。

勿論、本実験条件と引用した図(5-24)は厳密に同一条件にっって行なった測定ではないので、表(5-6)で得られた $\alpha_0 \div 1/3$ なる値と表(5-7)と図(5-24)による極めて単純な仮定に基づく推定値 $\alpha_0 \div 0.4$ は一応の一致を見たいものとして満足しなればならぬであろう。

この様に考えると、硫酸アルミニウム添加量が更に少ない15ppmで凝集を進めた場合には、 $\alpha_0$ は0.2程度の値に低下するものと考えられる。したがって、飽和ゼータ電位に達するに必要な凝集剤添加量と実添加凝集剤量の比が $\alpha_0$ の値を左右する有用な指標となる。

凝集剤添加量、pH等の凝集条件が $\alpha_0$ に影響する一例として、接触フロック形成による微小粒子の減少速度を示したものが図(5-25)、(5-26)、(5-27)である。

図(5-25)は最通凝集条件(残留濁度最少条件)で形成させた母フロッ群に最通凝集条件で生成させた微小フロッ群を吸合させた場合であり、図(5-26)は同一の母フロッ群に最適値よりもはるかに低いpHで凝集させた微小フロッ群を吸合させた場合である。また、図(5-27)は同じ母フロッ群に凝集剤を加えないカオリンのみで吸合

させた場合について示したものである。  
 これらの図から、凝集剤の存在状態（加水分解の進行度  
 合）およびその添加量が衝突合—過程を支配する主因子で  
 あることが明らかであろう。

唯、通常の凝集条件では上述の諸事項から考えて、 $\alpha = 0.3 \sim 0.4$  として良いであろう。したがって、実用的には  
 図(5-23)を用いて設計を行なっても差し支えないと考え  
 られる。

$\alpha$  の値を飽和ゼータ—電位等を指標として推算した場合  
 あるいは諸実験の場合から逆に  $\alpha$  を求める場合等のために、  
 前述の実測した衝突合—確率が  $\alpha \div 1/3$  とした図(5-23)  
 から、いかなる  $\alpha$  にも適応しえるように横軸に  $S_m$  縦軸に  
 $\alpha_m$  をとって書き換えたものが図(5-28)である。

図(5-21)と図(5-23)を用いることによって、ある最  
 大成長度  $S_m$  を持つフロック群がある無次元攪拌継続時間  
 $m$  だけフロック形成池に滞留した場合に達成される沈殿除  
 去特性を知ることが可能となった。したがって、両図を用  
 いてフロック形成プロセスと次段の沈殿プロセスとの連環  
 を明確にすることができよう。

## 5-8 まとめ

本章においては電子計算機を用いてフロック形成基本式  
 の数値解を求めるフロック形成過程のシミュレーション（  
 数値実験）を行なった。

得られた数値解と第4章で行なったフロック形成過程の  
 実験結果とを比較して、第3章で誘導した諸理論・諸指標  
 の妥当性と有用性を検討し、従来のフロック形成理論に対  
 する修正を行なった。

すなわち、Smoluchowski の slow coagulation を考  
 え方を拡張して、新たなフロック形成反応における衝突  
 合—確率関数を式(5-8')の形で提示した。

$$\alpha_f = \alpha \cdot \left(1 - \frac{R}{S+1}\right)^6 \text{-----} (5-8')$$

式(5-8)が誘導された過程は次のようである。すなわち、  
 フロックの衝突合—確率を示す関数  $\alpha_f$  に関する因子とし  
 て次の3つを考えた。①の与えられた攪拌条件下でのフロッ  
 クの成長限界を示すフロックの最大成長径  $d_{max}$ （この値  
 は三次元的なフロックへの初期粒子集合数  $S$  として理論式  
 に導入される）、②着目している衝突合—によって形成さ  
 れるフロックへの初期粒子集合数、および③初期粒子の表

面状態によって決まる係数 $\alpha_0$ 。

次に、 $\alpha_f$  が数値として  $\alpha_0 \leq \alpha_f \leq 0$  の範囲にあり、定性的には大形フロックが形成される場合程小さく  $S$  倍粒子を越えるフロックを形成する粒子の衝突割合がさなりと云った特性を有している点を考慮し、式(5-8)のようない次の多項式で衝突合一確率関数を式化した。

さらに、その指数 $n$ を $\alpha_f$ を導入して修正したフロック形成基本式(5-9)の解と実測のフロック粒度分布を比較して  $n=6$  とした。

以上の様にして表示された衝突合一確率関数 $\alpha_f$ を導入して求められた、実用フロック形成基本式は式(5-9')で示される。

$$\frac{dNr}{dm} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{R-1} \alpha_0 \left(1 - \frac{R}{S+1}\right)^6 \left[ i^{\frac{1}{3-K_S}} + (R-i)^{\frac{1}{3-K_S}} \right]^3$$

$$N_i N_{R-i} = \sum_{i=1}^{S-R} \alpha_0 \left(1 - \frac{R+i}{S+1}\right)^6 \left( i^{\frac{1}{3-K_S}} + R^{\frac{1}{3-K_S}} \right)^3 N_i N_R$$

----- (5-9')

修正されたフロック形成基本式(5-9')による数値実験の結果は、実測のフロック形成過程を十分に追随しうるものであり、シミュレーションの結果次の諸点を新うたにあらわし再び確認した。

$K_S=1.2$  の  $S=50, 75, 100, 200$  での数値計算によって得られた成長平衡分布、横軸に標準化粒子倍数  $R^* = R/R_{50-ult}$  をとり縦軸に累加フロック体積をとった標準化分布に変換すると同一分布形となった。標準化のために用いた  $R_{50-ult}$  は成長平衡時の分布の累加フロック体積 50% 値を示す粒子倍数であり、最大成長粒子への初期粒子集合数  $S$  と次のような関係にある。

|                |                       |
|----------------|-----------------------|
| $K_S = 1.0$ では | $R_{50-ult} = 0.39 S$ |
| $K_S = 1.2$ では | $R_{50-ult} = 0.42 S$ |
| $K_S = 1.4$ では | $R_{50-ult} = 0.48 S$ |

さらに、凝集条件の指標である  $K_S$  が異なっても、横軸を標準化フロック体積  $R^* = R/R_{50-ult}$  に変換することによってすべての  $S$ 、 $K_S$  を異にする粒度分布は同一分布形となった。したがって、式(5-9')の数値解から得られたフロック粒度分布そのものを用いて、直接成長平衡時のフロック粒度分布の自平衡性が証明された。(図(5-13), (5-14))

成長平衡分布に至る以前の過渡状態での粒度分布についても、累加フロック体積が50%となる標準化粒子倍数 $R_{50}^*$ の等しい分布は $S$ に無関係に一定の分布形となり、 $R_{50}^*$ の等しい分布は $S$ 、 $K_S$ と独立の汎用標準化粒度分布で表すことができることかぎれた。(図(5-16), (5-17))

しかし、等しい標準化分布に達するに要する無次元攪拌継続時間 $m$ は最大成長度 $S_m$ が増加するにつれて減少し、成長平衡分布に付いて得られると同様に $m$ と $S_m$ の関係は次式で示される。(図(5-18))

$$m \propto S_m^{-\delta} \text{-----}(5-11)$$

粒度分布が成長平衡に近づくにつれて $\delta$ は大きくなり、 $\delta$ の値は0.15~0.20の範囲にある。

計算値と第4章の実験値を用いて、フロック形成過程のすべての段階に適用しえる形の汎用標準化無次元時間累積量曲線(汎用標準化 $m$ 曲線)を作成した。(図(5-21))。作成方法は次の通りである。各 $S_m$ における $m$ 曲線の横軸を先に成長平衡分布を標準化した際に用いた標準化係数 $K^*$ によって $\theta$ から $\theta^*(=K^*\theta)$ に変換すると、除去率50%を得るに要する標準化無次元沈降時間 $\theta_{50}^*$ の等しい $m$ 曲線は $S_m$ と独立にすべて同一の汎用標準化 $m$ 曲線に帰一した。

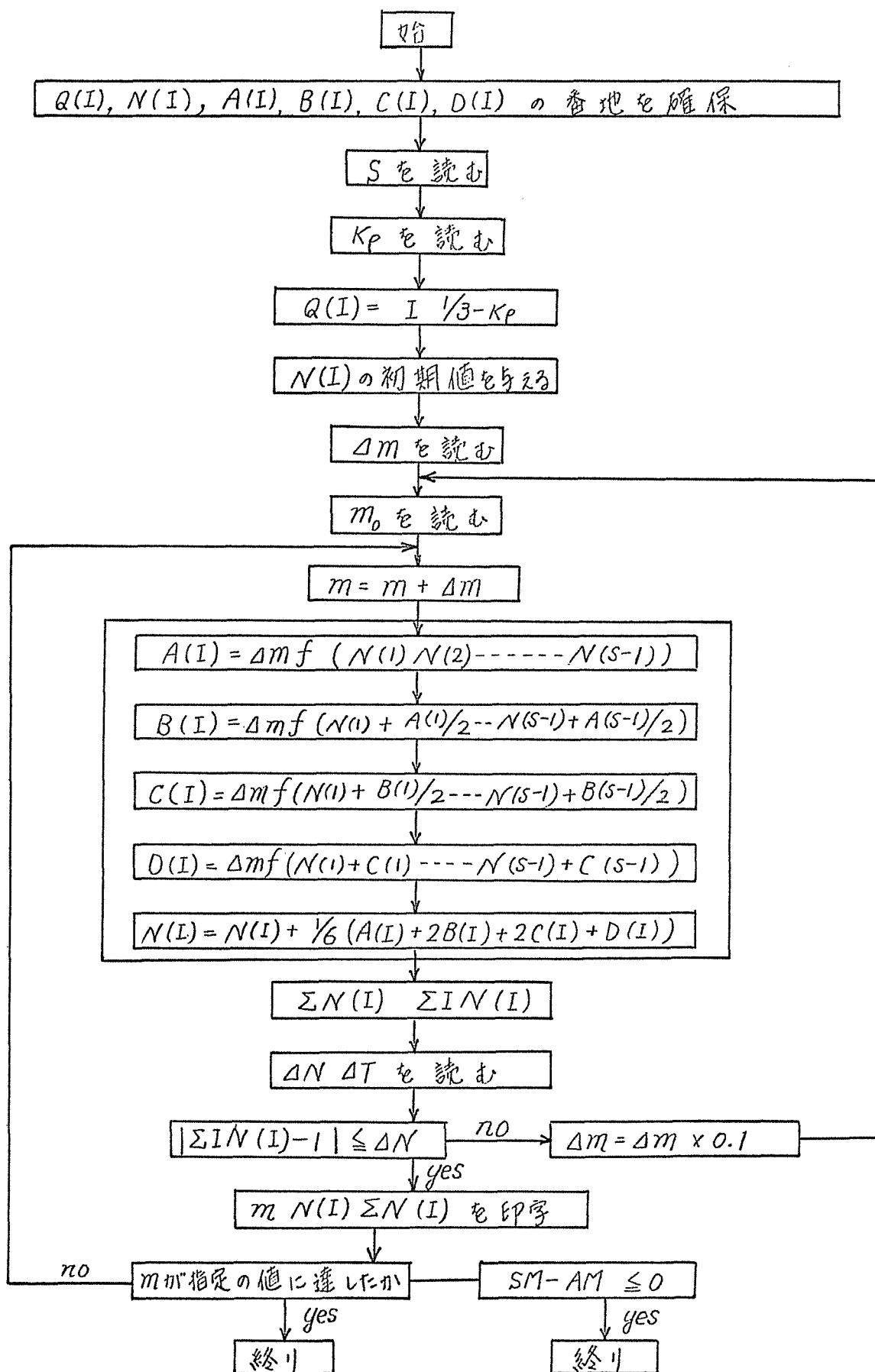
成長平衡時の汎用標準化 $m$ 曲線は除去率50%を得るに要する $\theta_{50}^*$ が $\theta_{50}^*=1.0\%$ となるように定義されている。したがって、それ以前の過渡状態においては $\theta_{50}^*$ は1.0%以上の値となる。ここでは $\theta_{50}^*=1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0\%$ についての汎用標準化 $m$ 曲線を、パラメーター $g^*$ によって $g^*=1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ の曲線と名付けた。

任意のフロック形成時におけるフロック群の沈降性状を汎用標準化 $m$ 曲線によって算定するためには、あるパラメーター $g^*$ をもつフロック分布にどれだけの攪拌時間で達するかを知らなければならぬ。 $g^*$ で示されるある粒度分布に達するに必要な無次元攪拌継続時間 $m$ と最大成長度 $S_m$ の関係は図(5-23)で示され、 $S_m=10^6$ (実測)から $S_m=10^2$ (計算)と云った広い範囲にわたって式(5-11)の関係が成立することが明らかとされた。

フロック形成速度に關与する衝突合-確率関数の係数 $\alpha_0$ は、素粘土表面の凝集剤被覆度によって決まってくる数値であり飽和ゼータ電位を基準としてその大略の値を推算しうる。また、実測のフロック形成速度と $\alpha_0=1$ として数

値計算によって求めたフロック形成速度を比較することによって、もその値を推定することができ、通常の凝集条件下では、この両者によって推定された値はほぼ  $1/3$  となった。

表(5-1) Runge-Kutter 法によるフロッド形成式の解法のフローチャート



表(5-2) フロッグ形成基本式の数値積分プログラム

```

C      SOLUTION OF FLOC FORMATION FUNCTION
      DIMENSION Z(5000),A(5000),AN(5000),Q(5000),F(5000)
      READ(5,8) IS,T,DM,SM
8      FORMAT(I5,3F12.5)
      P=1./(3.-T)
      DO 10 I=1,IS
      Y=1
      Z(I)=Y**P
10     CONTINUE
      DO 15 I=1,IS
      Q(I)=0.
      AN(I)=1.
15     CONTINUE
      AN(I)=1
      AM=0.0
      SP=IS+1
      KI=2
      N=0
      NN=10
20     M=0
25     AM=AM+DM
30     DO 80 I=1,IS
      II=I-1
      IJ=IS-1
      B=0
      IF(I-1) 60,60,40
40     DO 50 J=1,II
      JJ=I-J
      IF(J-KI) 41,60,60
41     IF(JJ-KI) 42,60,60
42     ZZ=(Z(J)+Z(JJ))**3
      B=B+ZZ*AN(J)*AN(JJ)
50     CONTINUE
60     C=0.
      IF(I-IS) 65,75,75
65     DO 70 J=1,IJ
      IF(J-KI) 66,75,75
66     IF(I-KI) 67,75,75
67     E=I+J
      ZZ=(Z(J)+Z(I))**3
      G=E/SP
      GG=(1.-G)**6
      ZZ=GG*ZZ
69     C=C+ZZ*AN(J)*AN(I)
70     CONTINUE
75     R=I
      G=R/SP
      GG=(1.-G)**6
      B=GG*B
77     A(I)=(0.5*B-C)*DM
80     CONTINUE
      M=M+1
      GO TO (90,110,130,150),M
90     DO 100 I=1,IS
      R=0.5*(A(I)-2.*Q(I))
94     AN(I)=AN(I)+R
      IF(AN(I)-1.E-8) 91,91,93
91     DO 92 L=I,IS
      AN(L)=0.

```

```

92 CONTINUE
   KI=I
   GO TO 30
93 Q(I)=Q(I)+3.*R-0.5*A(I)
100 CONTINUE
   GO TO 30
110 DO 120 I=1,IS
   R=0.292893*(A(I)-Q(I))
114 AN(I)=AN(I)+R
   IF(AN(I)-1.E-8) 111,111,113
111 DO 112 L=I,IS
   AN(L)=0.
112 CONTINUE
   KI=I
   GO TO 30
113 Q(I)=Q(I)+3.*R-0.292893*A(I)
120 CONTINUE
   GO TO 30
130 DO 140 I=1,IS
   R=1.70711*(A(I)-Q(I))
134 AN(I)=AN(I)+R
   IF(AN(I)-1.E-8) 131,131,133
131 DO 132 L=I,IS
   AN(L)=0.
132 CONTINUE
   KI=I
   GO TO 30
133 Q(I)=Q(I)+3.*R-1.70711*A(I)
140 CONTINUE
   GO TO 30
150 DO 160 I=1,IS
   R=0.16667*(A(I)-2.*Q(I))
154 AN(I)=AN(I)+R
   IF(AN(I)-1.E-8) 151,151,153
151 DO 152 L=I,IS
   AN(L)=0.
152 CONTINUE
   KI=I
   GO TO 161
153 Q(I)=Q(I)+3.*R-0.5*A(I)
160 CONTINUE
161 CN=0.
   BN=0.
   DO 179 I=1,IS
   Y=I
   BN=BN+AN(I)
   CN=CN+Y*AN(I)
170 CONTINUE
   WRITE(6,180) AM,BN,CN,(AN(I),I=1,IS)
180 FORMAT(///,F10.5/,E13.6/F13.8/,(10E13.6))
190 IF(N-NN) 199,191,191
191 B=0
   DO 192 I=1,IS
   Y=1
   C=Y*1.667
   F(I)=C*AN(I)
   B=B+F(I)
192 CONTINUE
   D=100./B
   DO 193 I=1,IS
   A(I)=D*F(I)
193 CONTINUE
   WRITE(6,194)B,(F(I),I=1,IS)

```

```
      WRITE(6,195)(A(I),I=1,IS)
194  FORMAT(1H0//,F10.5/, (10E13.6))
195  FORMAT(1H0/, (10F8.2))
      NN=NN+10
199  IF(AM-SM) 20,200,200
200  STOP
      END
```

表(5-2) のプログラムによる計算結果の1例

|              |              |              |              |              |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1.20000      |              |              |              |              |
| 0.106407E 00 |              |              |              |              |
| 0.99983592   |              |              |              |              |
| 0.267861E-01 | 0.807016E-02 | 0.459997E-02 | 0.342463E-02 | 0.295063E-02 |
| 0.278039E-02 | 0.277447E-02 | 0.287069E-02 | 0.303342E-02 | 0.323546E-02 |
| 0.345071E-02 | 0.365179E-02 | 0.381065E-02 | 0.390145E-02 | 0.390442E-02 |
| 0.380956E-02 | 0.361866E-02 | 0.334487E-02 | 0.300987E-02 | 0.263949E-02 |
| 0.225919E-02 | 0.189060E-02 | 0.154953E-02 | 0.124568E-02 | 0.983374E-03 |
| 0.762863E-03 | 0.581637E-03 | 0.435825E-03 | 0.320724E-03 | 0.231543E-03 |
| 0.163766E-03 | 0.113173E-03 | 0.764215E-04 | 0.502643E-04 | 0.319107E-04 |
| 0.197497E-04 | 0.117989E-04 | 0.648035E-05 | 0.355967E-05 | 0.832927E-06 |
| 0.406720E-06 | 0.0          | 0.0          | 0.0          | 0.0          |

|              |              |              |              |              |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 6.19681      |              |              |              |              |
| 0.267861E-01 | 0.256271E-01 | 0.287155E-01 | 0.345340E-01 | 0.431617E-01 |
| 0.551168E-01 | 0.711145E-01 | 0.919256E-01 | 0.118210E-00 | 0.150292E 00 |
| 0.187893E 00 | 0.229880E 00 | 0.274121E 00 | 0.317557E 00 | 0.356534E 00 |
| 0.387385E 00 | 0.407105E 00 | 0.413922E 00 | 0.407596E 00 | 0.389347E 00 |
| 0.361487E 00 | 0.326903E 00 | 0.288536E 00 | 0.249011E 00 | 0.210419E 00 |
| 0.174264E 00 | 0.141493E 00 | 0.112648E 00 | 0.878919E-01 | 0.671419E-01 |
| 0.501561E-01 | 0.365451E-01 | 0.259763E-01 | 0.179571E-01 | 0.119646E-01 |
| 0.776097E-02 | 0.485327E-02 | 0.278675E-02 | 0.159851E-02 | 0.390159E-03 |
| 0.198521E-03 | 0.0          | 0.0          | 0.0          | 0.0          |

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0.43 | 0.41 | 0.46 | 0.56 | 0.70 | 0.89 | 1.15 | 1.48 | 1.91 | 2.43 | 3.03 | 3.71 |
| 4.42 | 5.12 | 5.75 | 6.25 | 6.57 | 6.68 | 6.58 | 6.28 | 5.83 | 5.28 | 4.66 | 4.02 |
| 3.40 | 2.81 | 2.28 | 1.82 | 1.42 | 1.08 | 0.81 | 0.59 | 0.42 | 0.29 | 0.19 | 0.13 |
| 0.08 | 0.04 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

凡例

|                            |                   |                 |
|----------------------------|-------------------|-----------------|
| $m$                        | →                 | 無次元攪拌時間         |
| $\sum N_i$                 | →                 | 無次元化粒子個数総数      |
| $\sum_i N_i$               | →                 | 初期粒子総数 (=1)     |
| $N_i = \frac{n_i}{n_0}$    | ( $i=1 \sim 50$ ) | → 無次元化粒子個数      |
| $\sum V_i^*$               | →                 | 標準化フロック総体積比     |
| $V_i^* = \frac{V_i}{V_1}$  | ( $i=1 \sim 50$ ) | → 標準化粒子体積       |
| $\frac{V_i^*}{\sum V_i^*}$ | ( $i=1 \sim 50$ ) | → 無次元化粒子体積率 (%) |

表(5-3)  $\Delta m$  の違いによる解の差について $S=50$ ,  $K_P=1.0$  の場合

| $m$  | $\Sigma N$               |                          | $N_{10}$                 |                          | $N_{30}$                 |                          | $N_{50}$                 |                          |
|------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|      | $\Delta m = 0.01$        | $\Delta m = 0.002$       | $\Delta m = 0.01$        | $\Delta m = 0.002$       | $\Delta m = 0.01$        | $\Delta m = 0.002$       | $\Delta m = 0.01$        | $\Delta m = 0.002$       |
| 0.01 | 0.96039                  | 0.96039                  | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        |
| 0.05 | 0.80958                  | 0.80958                  | $0.42391 \times 10^{-4}$ | $0.42341 \times 10^{-4}$ | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        |
| 0.1  | 0.63793                  | 0.63794                  | $0.89785 \times 10^{-3}$ | $0.89789 \times 10^{-3}$ | $0.34061 \times 10^{-5}$ | $0.33962 \times 10^{-5}$ | $0.16863 \times 10^{-6}$ | $0.48626 \times 10^{-7}$ |
| 0.5  | $0.94511 \times 10^{-1}$ | $0.94550 \times 10^{-1}$ | $0.55704 \times 10^{-3}$ | $0.55704 \times 10^{-3}$ | $0.14683 \times 10^{-3}$ | $0.14683 \times 10^{-3}$ | $0.12173 \times 10^{-1}$ | $0.12173 \times 10^{-1}$ |
| 1.0  | $0.44862 \times 10^{-1}$ | $0.44862 \times 10^{-1}$ | $0.19820 \times 10^{-3}$ | $0.19820 \times 10^{-3}$ | $0.67291 \times 10^{-4}$ | $0.67291 \times 10^{-4}$ | $0.16513 \times 10^{-1}$ | $0.16513 \times 10^{-1}$ |
| 1.46 | $0.34075 \times 10^{-1}$ | $0.34075 \times 10^{-1}$ | $0.11678 \times 10^{-3}$ | $0.11678 \times 10^{-3}$ | $0.44655 \times 10^{-4}$ | $0.44655 \times 10^{-4}$ | $0.17682 \times 10^{-1}$ | $0.17682 \times 10^{-1}$ |
| 2.19 | $0.39111 \times 10^{-1}$ | $0.39111 \times 10^{-1}$ | $0.15506 \times 10^{-3}$ | $0.15506 \times 10^{-3}$ | $0.55611 \times 10^{-4}$ | $0.55611 \times 10^{-4}$ | $0.17119 \times 10^{-1}$ | $0.17119 \times 10^{-1}$ |

表(5-4) 計算の組合せ

| $S$ | $K\rho$ |
|-----|---------|
| 25  | 1.2     |
| 50  | 1.0     |
| 50  | 1.2     |
| 50  | 1.4     |
| 75  | 1.2     |
| 100 | 1.2     |
| 200 | 1.2     |

表(5-5) 等しい  $R_{50}^*$  に至る攪拌継続時間  
 $\alpha_0 m$  と最大成長粒子径数  $S$  の関係

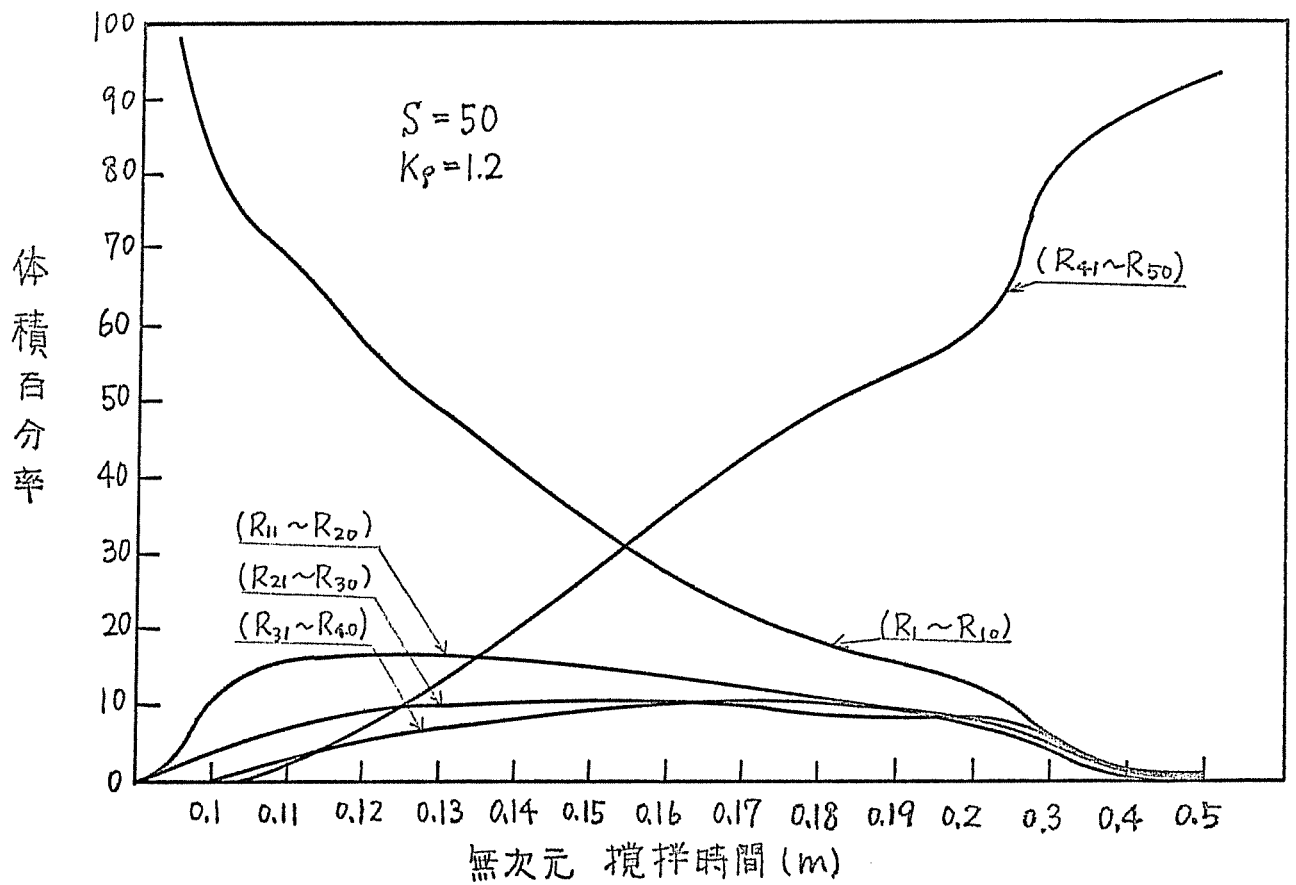
| $R_{50}^* \backslash S$ | 50                     | 75                     | 100                    | 200                    |
|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 0.3                     | $\alpha_0 m \div 0.28$ | $\alpha_0 m \div 0.26$ | $\alpha_0 m \div 0.24$ | $\alpha_0 m \div 0.23$ |
| 0.4                     | 0.35                   | 0.32                   | 0.30                   | 0.27                   |
| 0.5                     | 0.43                   | 0.39                   | 0.35                   | 0.30                   |
| 0.6                     | 0.56                   | 0.50                   | 0.45                   | 0.35                   |
| 0.7                     | 0.73                   | 0.64                   | 0.55                   | 0.42                   |
| 0.8                     | 1.00                   | 0.85                   | 0.74                   | 0.56                   |
| 0.9                     | 1.55                   | 1.25                   | 1.03                   | 0.80                   |
| 1.0                     | 2.9                    | 2.5                    | 2.0                    | 1.5                    |

表(5-6) フロック形成速度の比較による $\alpha_0$ の推定

| $\delta^*$                  | $S_m = 300$ の時の値 |                          | $\alpha_0 = \frac{\alpha_0 m}{m}$ |
|-----------------------------|------------------|--------------------------|-----------------------------------|
|                             | 図(5-23) からの $m$  | 図(5-18) からの $\alpha_0 m$ |                                   |
| 1.0                         | 7.0              | 2.8 程度                   | 0.40                              |
| 1.5                         | 1.5              | 0.45 "                   | 0.30                              |
| 2.0                         | 0.64             | 0.22 "                   | 0.34                              |
| 2.5                         | 0.44             | 0.13 "                   | 0.30                              |
| $\alpha_0$ の平均値 $\div 0.35$ |                  |                          |                                   |

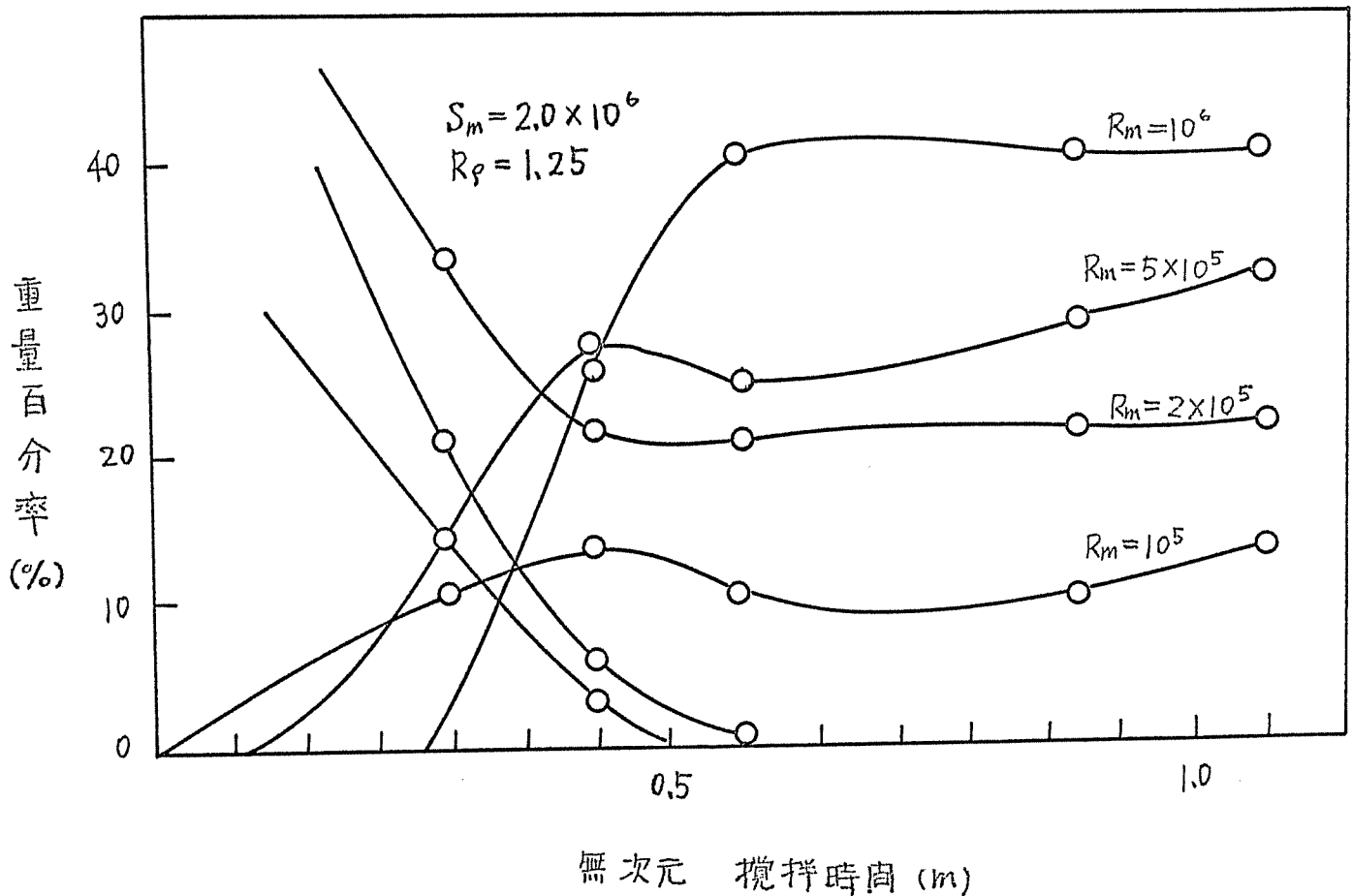
表(5-7)  $\alpha_0$  の仮説による推算値

| 凝集剤の被覆度 | 衝突合一の初期確率 $\alpha_0$ |
|---------|----------------------|
| 0.1     | 0.18                 |
| 0.2     | 0.32                 |
| 0.3     | 0.42                 |
| 0.4     | 0.48                 |
| 0.5     | 0.50                 |
| 0.6     | 0.48                 |
| 0.7     | 0.42                 |
| 0.8     | 0.32                 |
| 0.9     | 0.18                 |

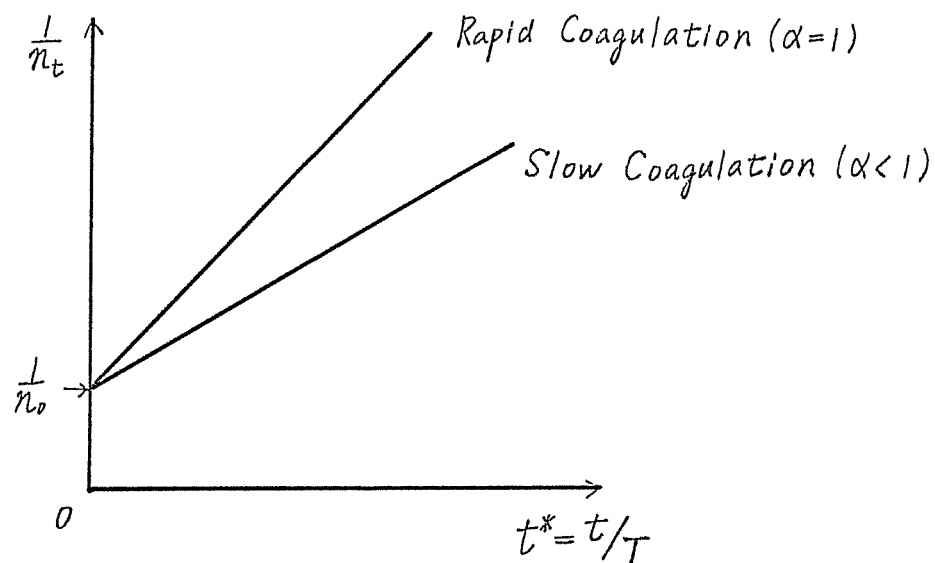


図(5-1)

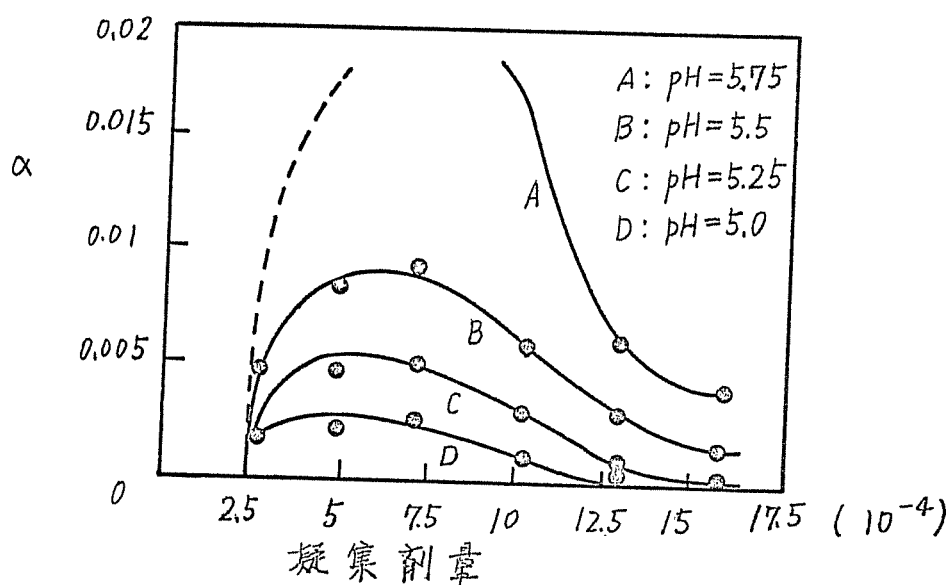
無次元攪拌時間の経過に伴う  
粒度組成変化(数値計算による)



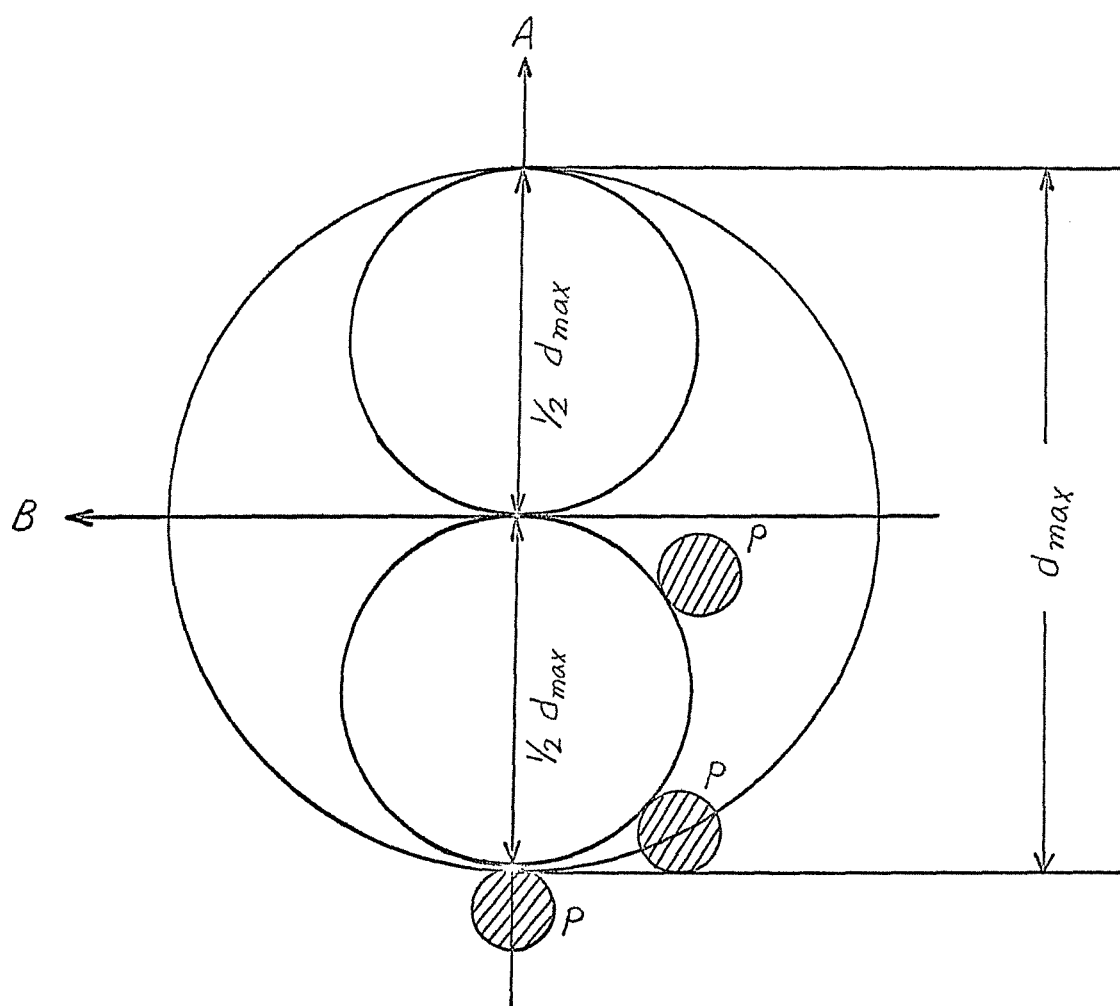
図(5-2) 無次元攪拌時間の経過に伴う粒度組成変化(実験による)



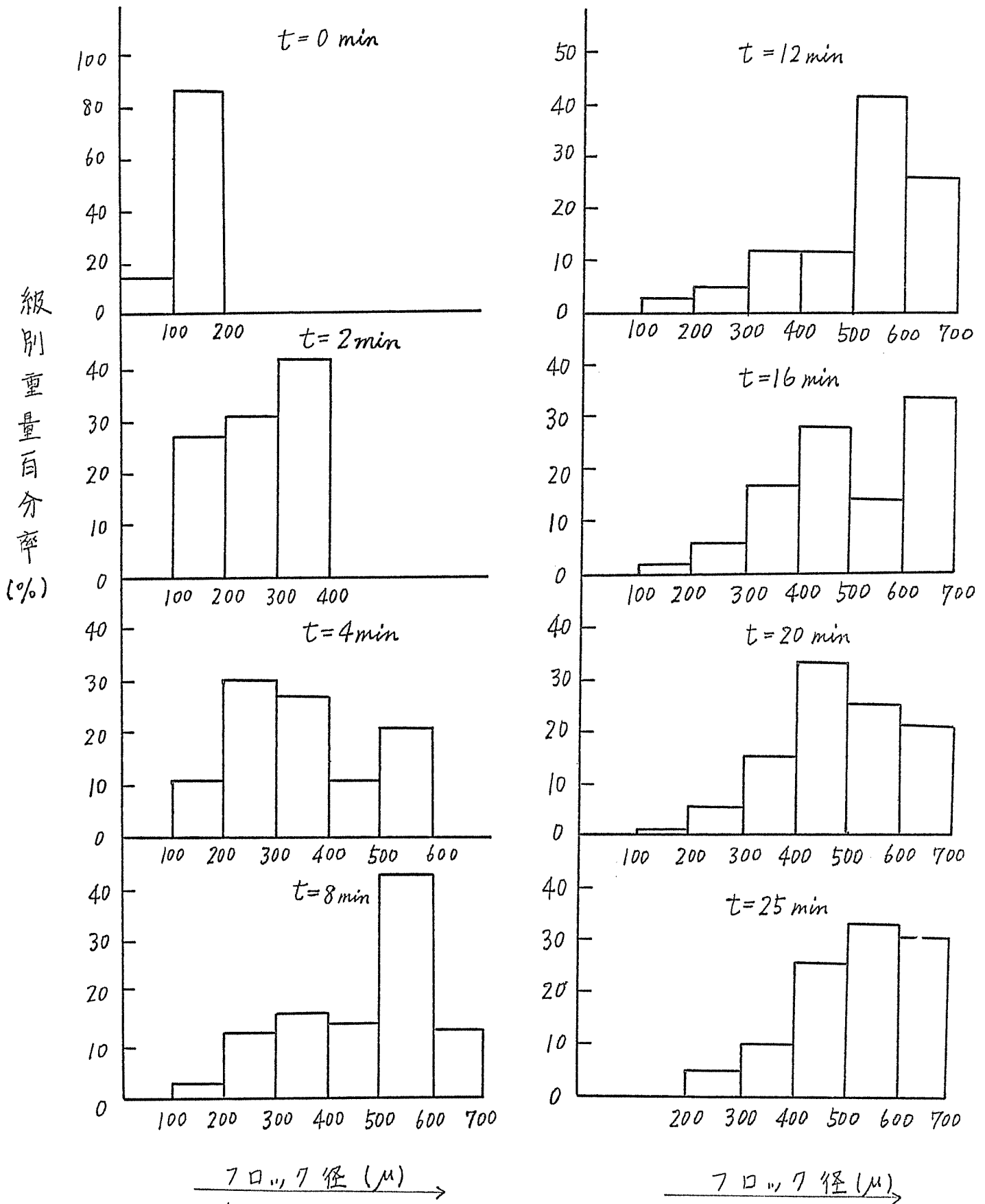
図(5-3) Slow Coagulation & Rapid Coagulation



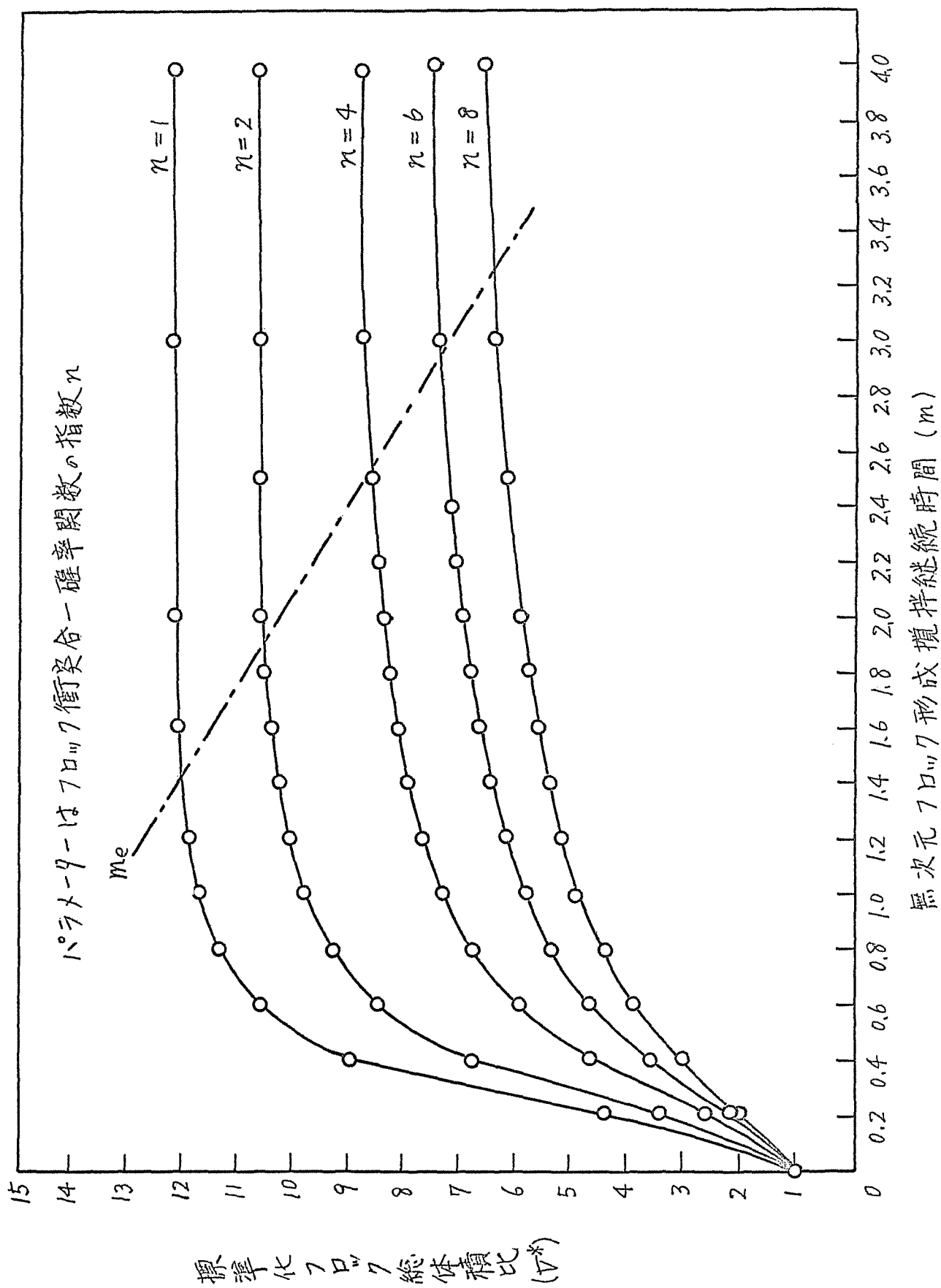
図(5-4) 凝集条件の違いによるフロック形成のおくれ



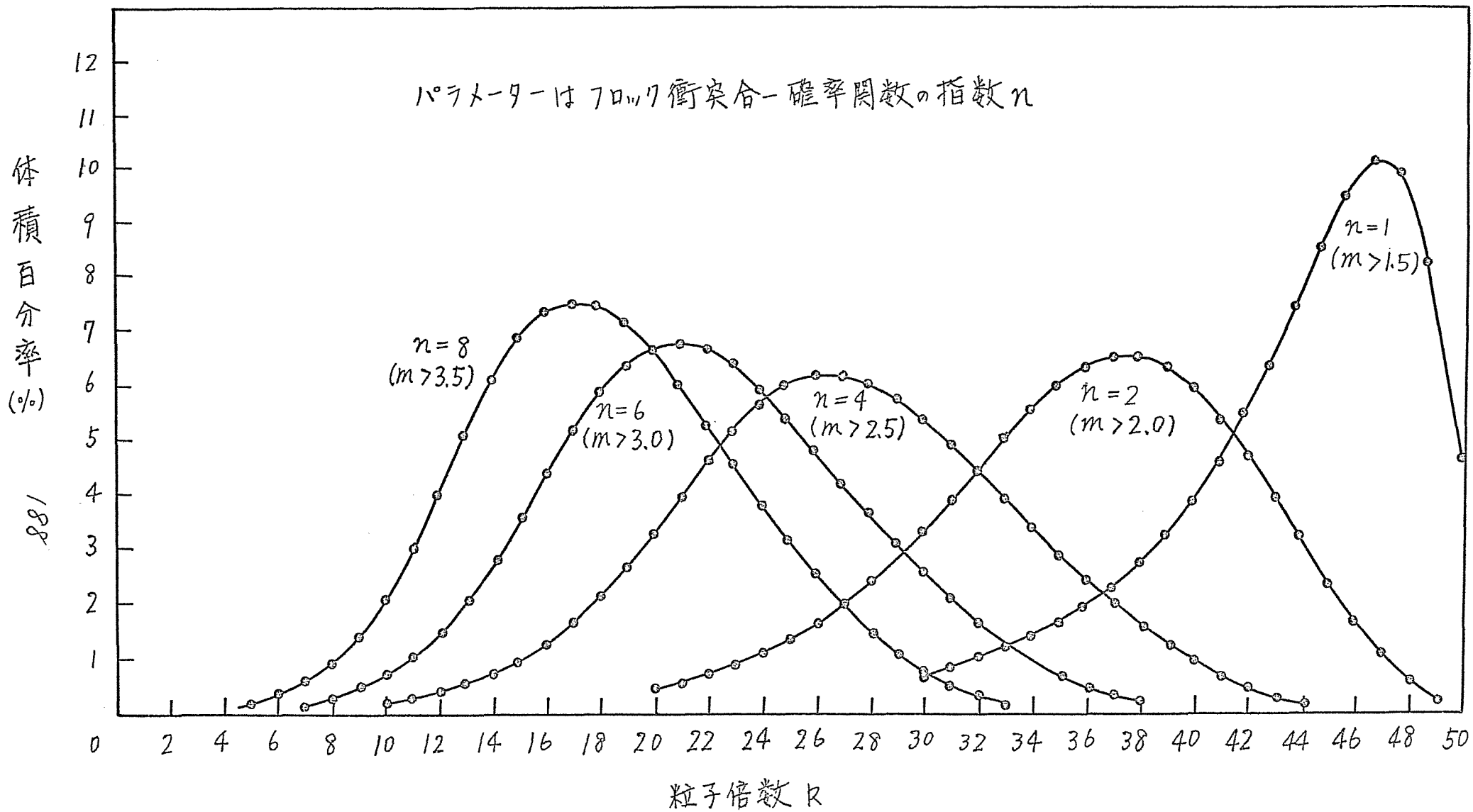
図(5-5) 合モデル



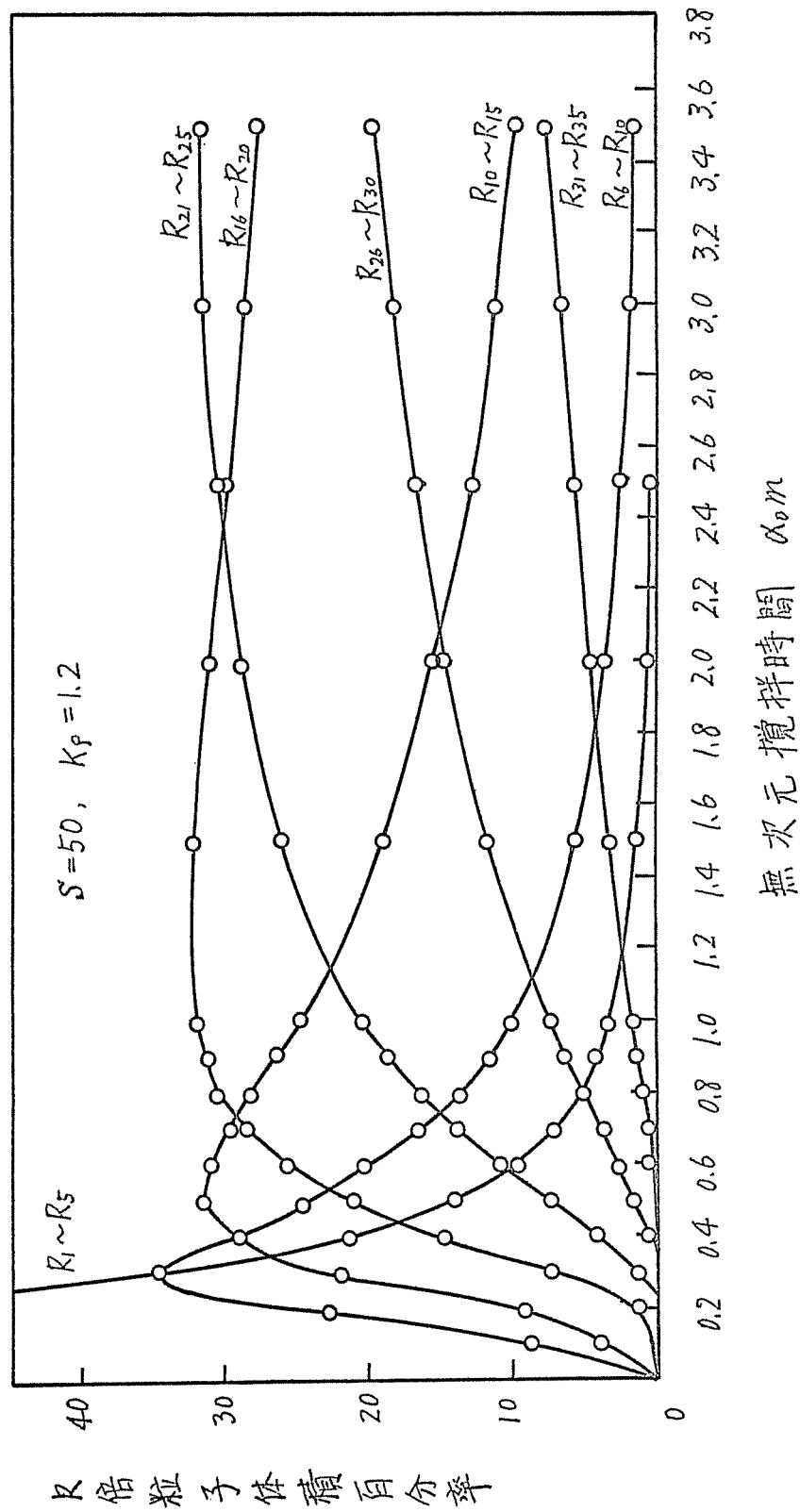
図(5-6) 攪拌時間 $t$ の経過に伴うフロック径分布の推移(実験による)



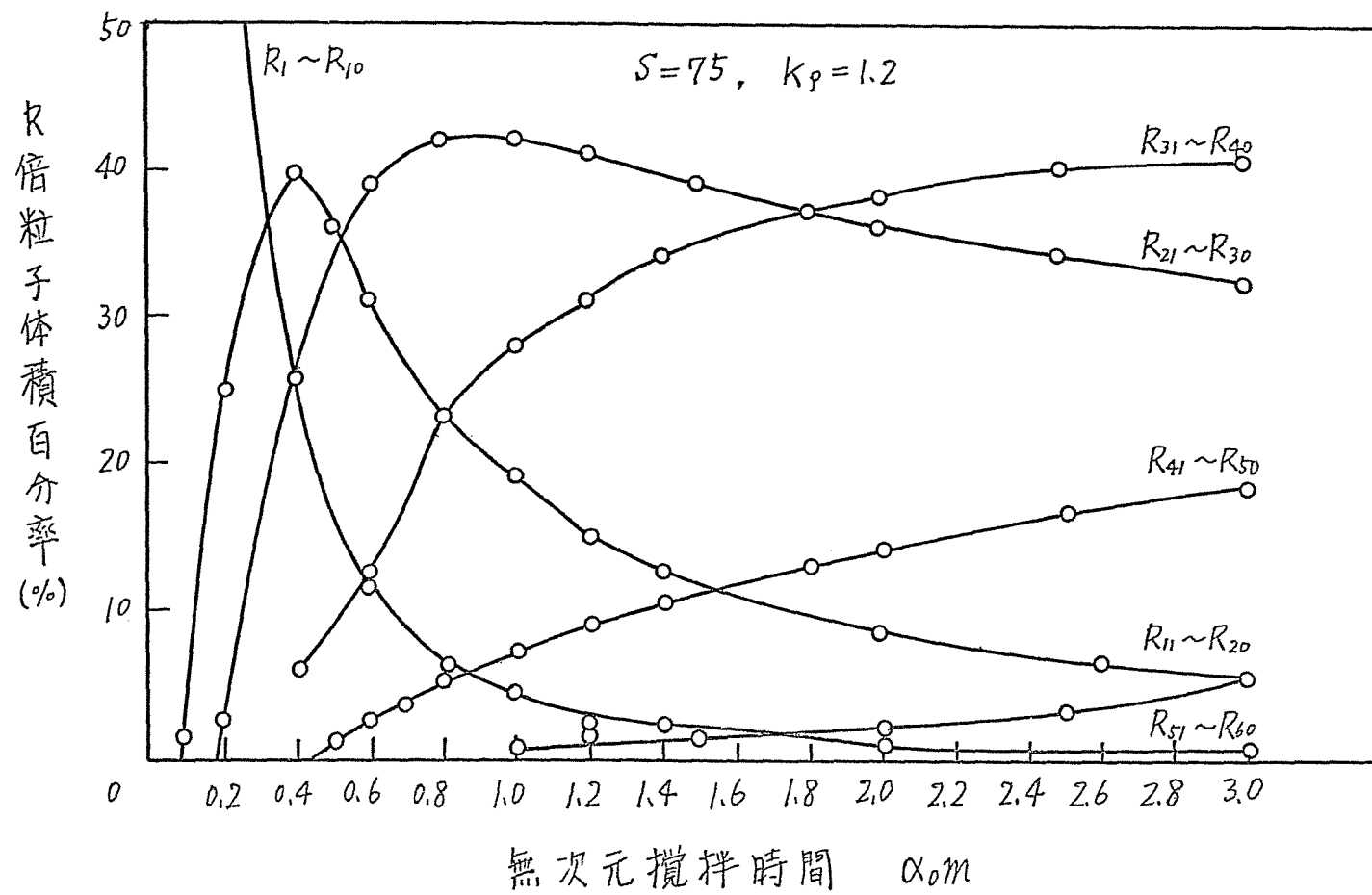
図(5-7) 攪拌継続時間の経過に伴うフロウ体積の変化



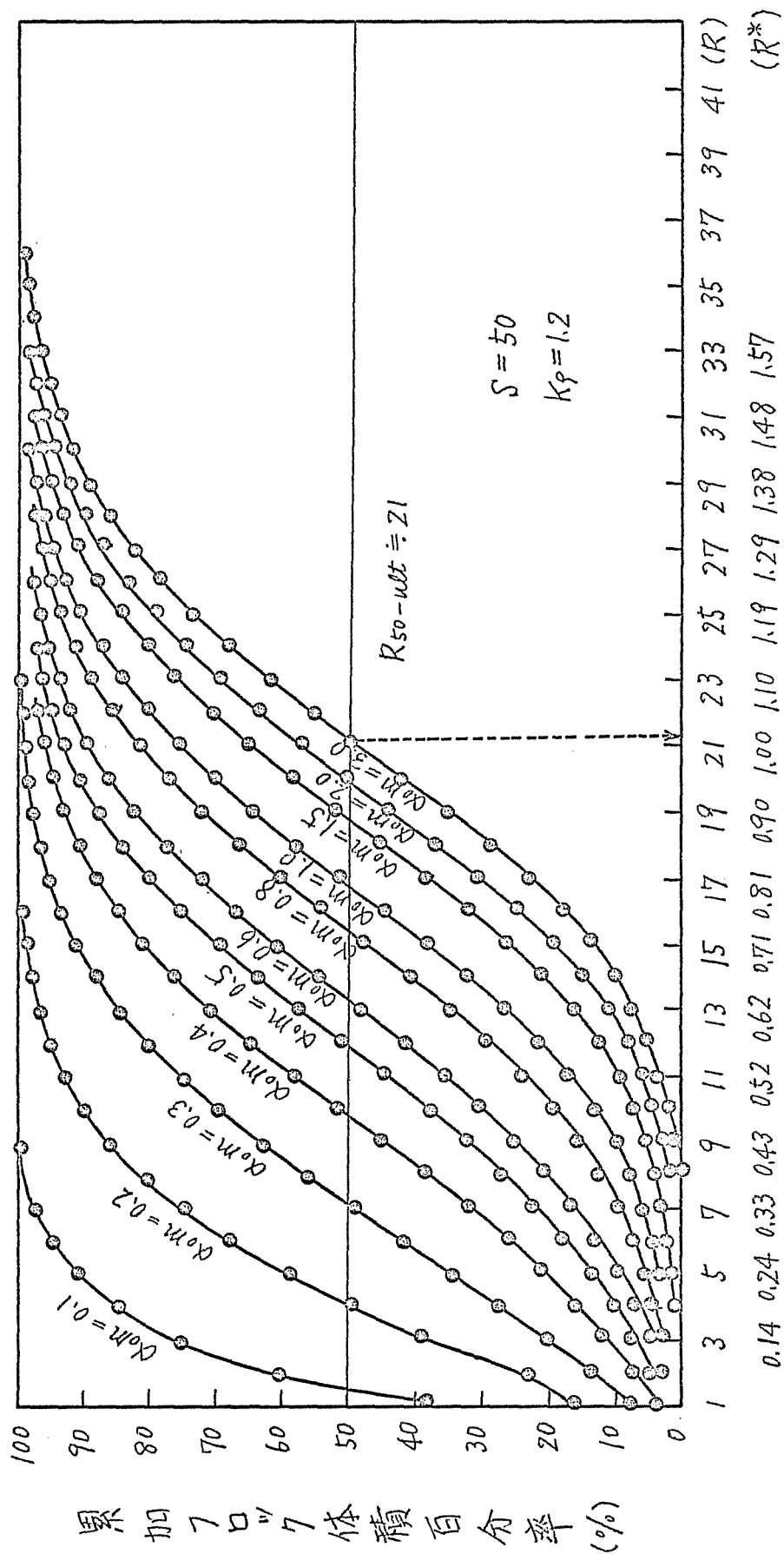
図(5-8) 成長平衡時におけるフロッグ粒度分布.



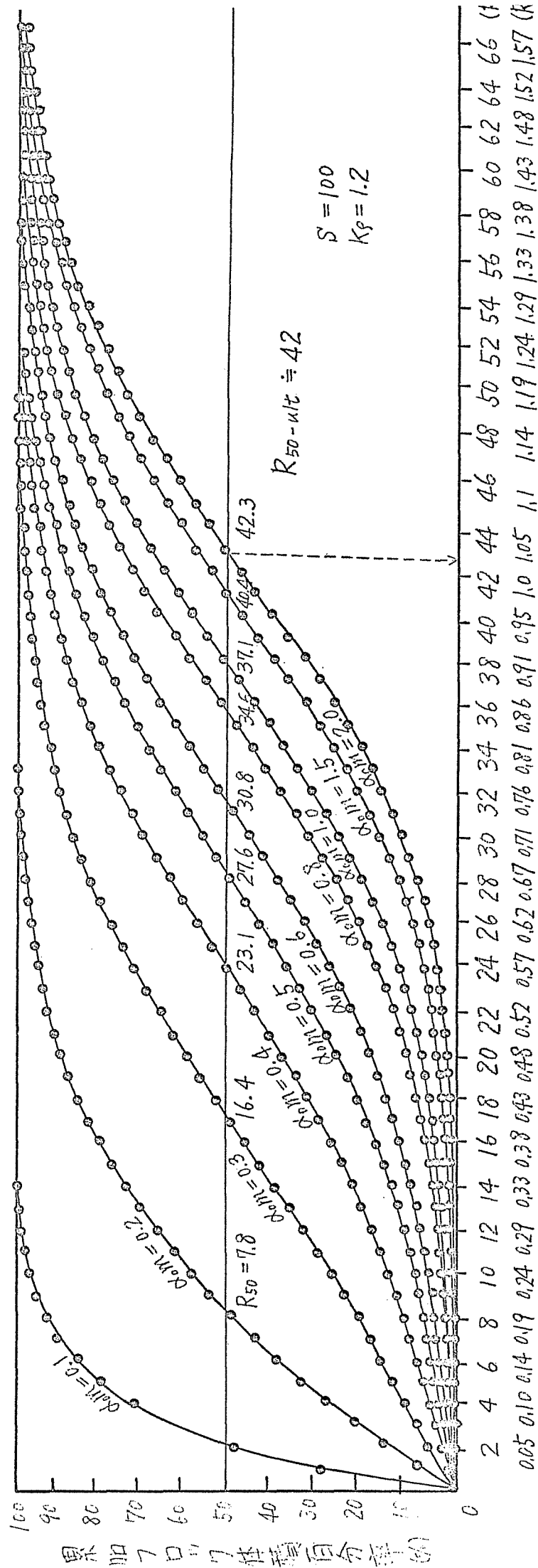
図(5-9) 無次元攪拌時間の経過に伴う粒度組成変化(数値計算による)



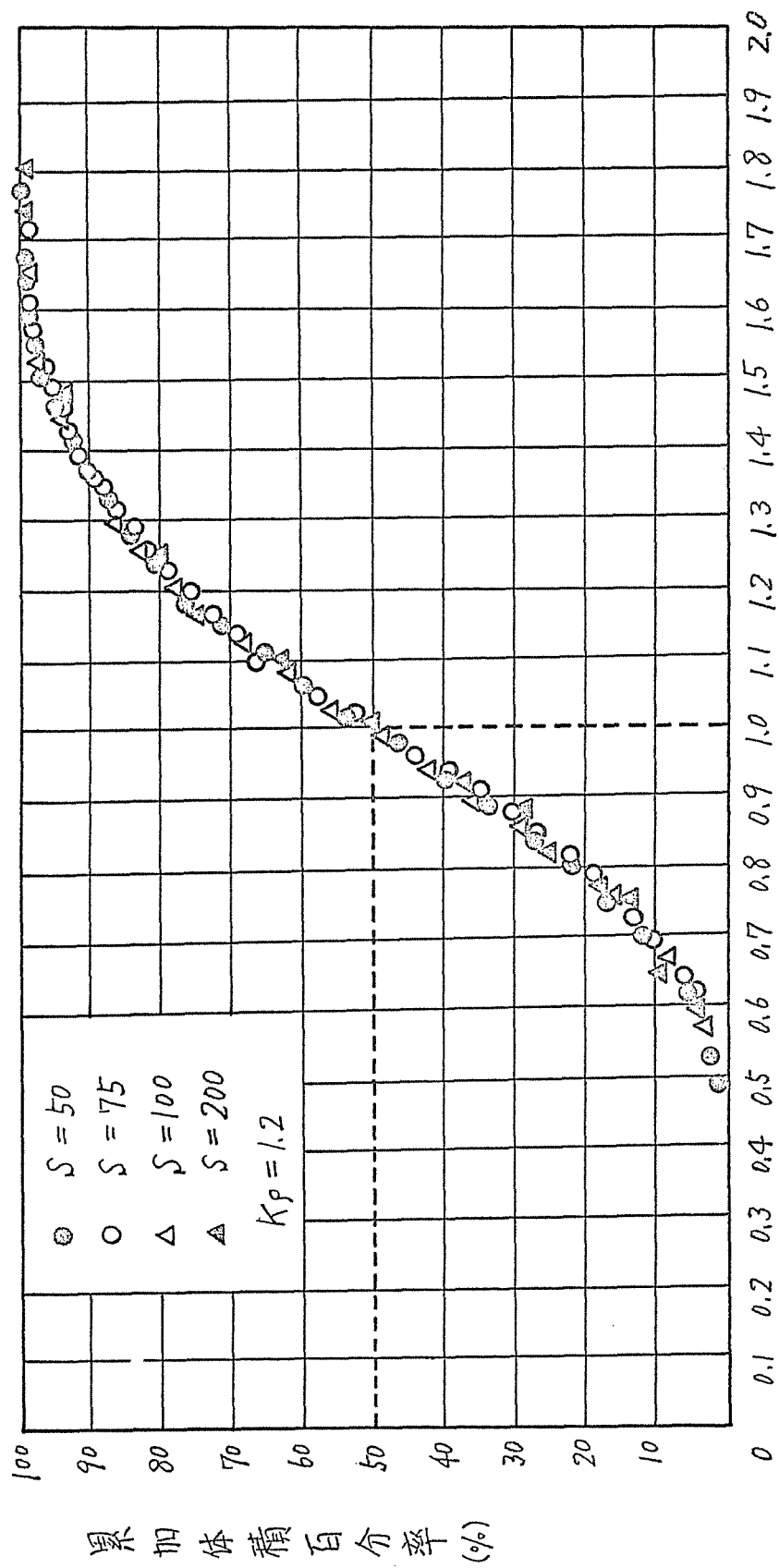
図(5-10) 無次元攪拌時間の経過に伴う粒度組成変化(数値計算による)



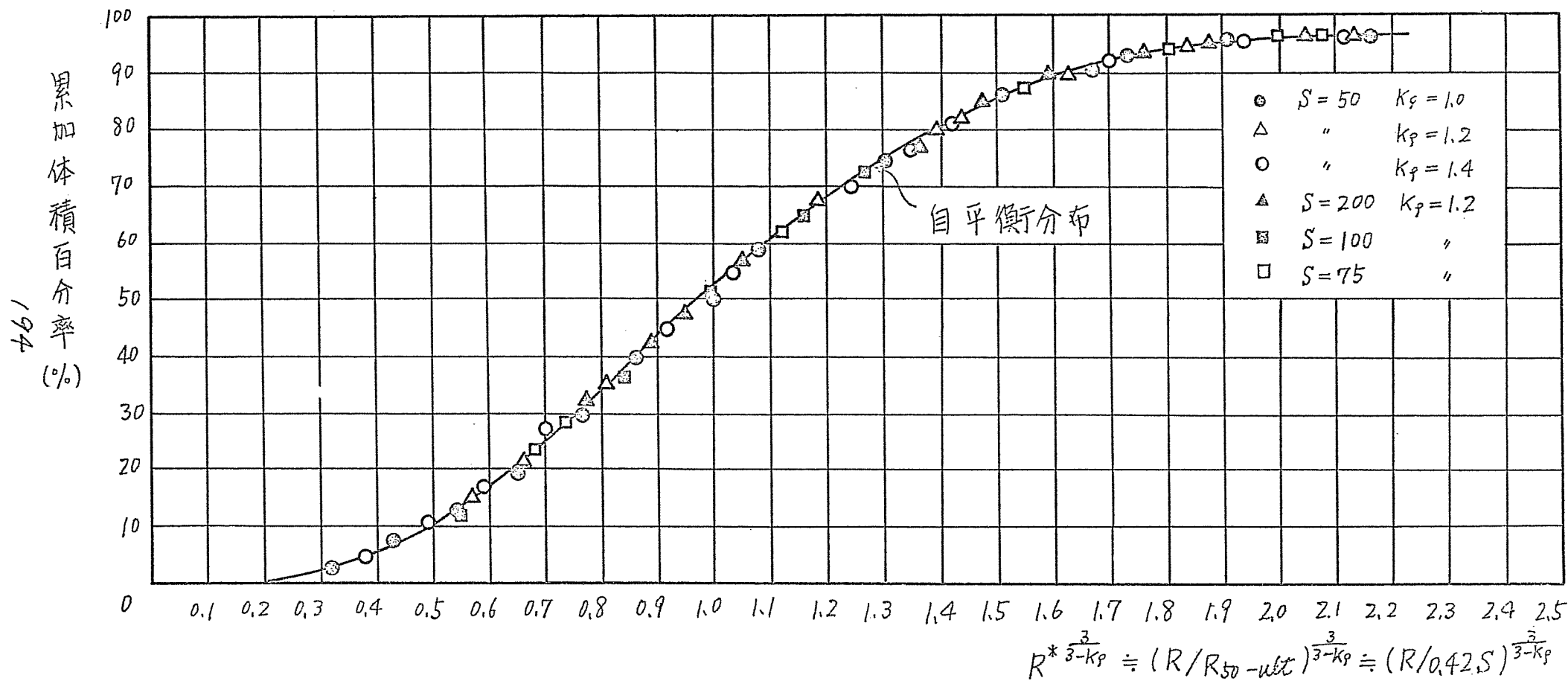
図(5-11) 無次元攪拌時間の経過に伴う累加 7口 7 体積分布の推移



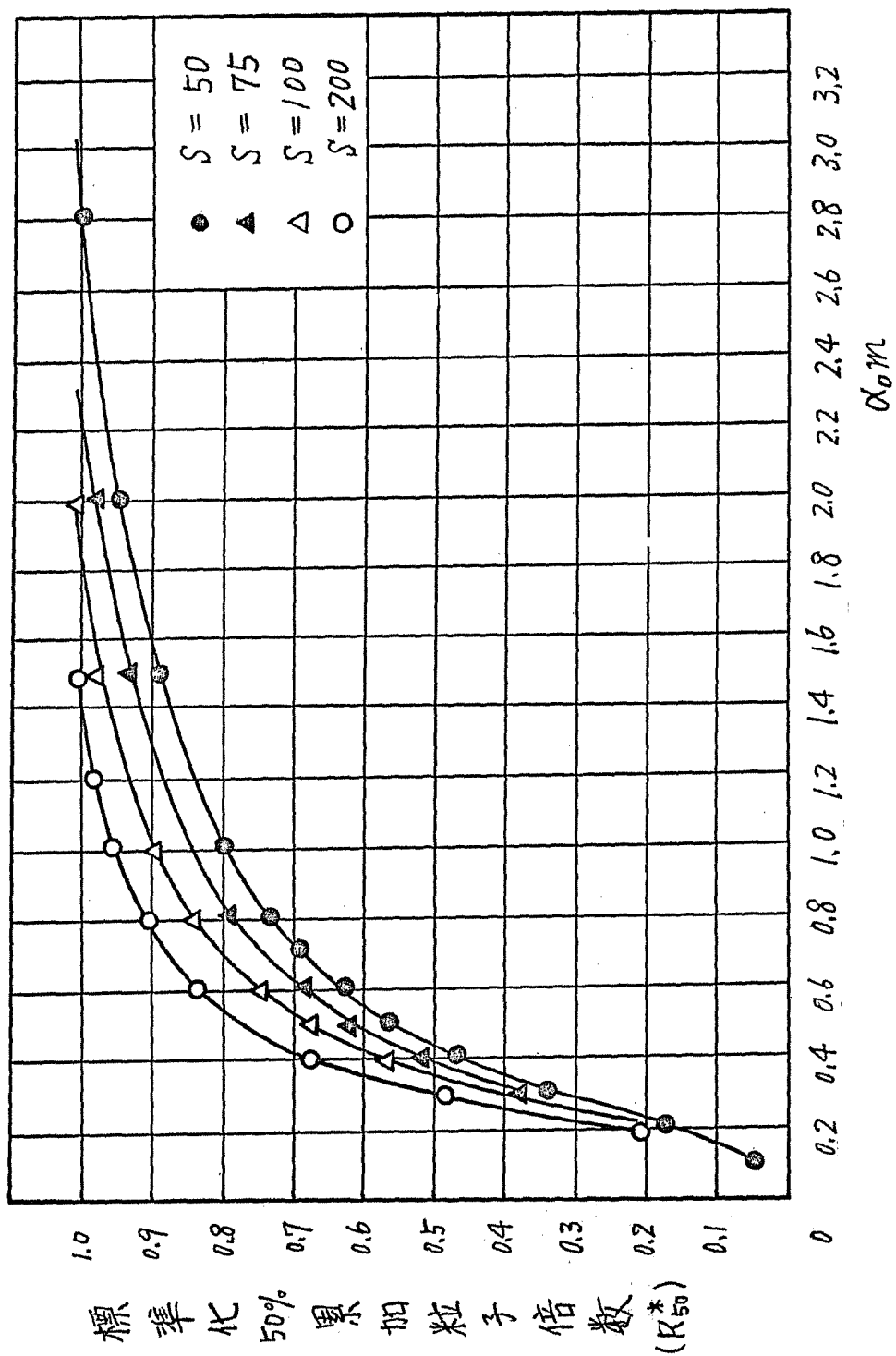
図(5-12) 無次元攪拌時間の経過に伴う累加7口7体積分布の推移



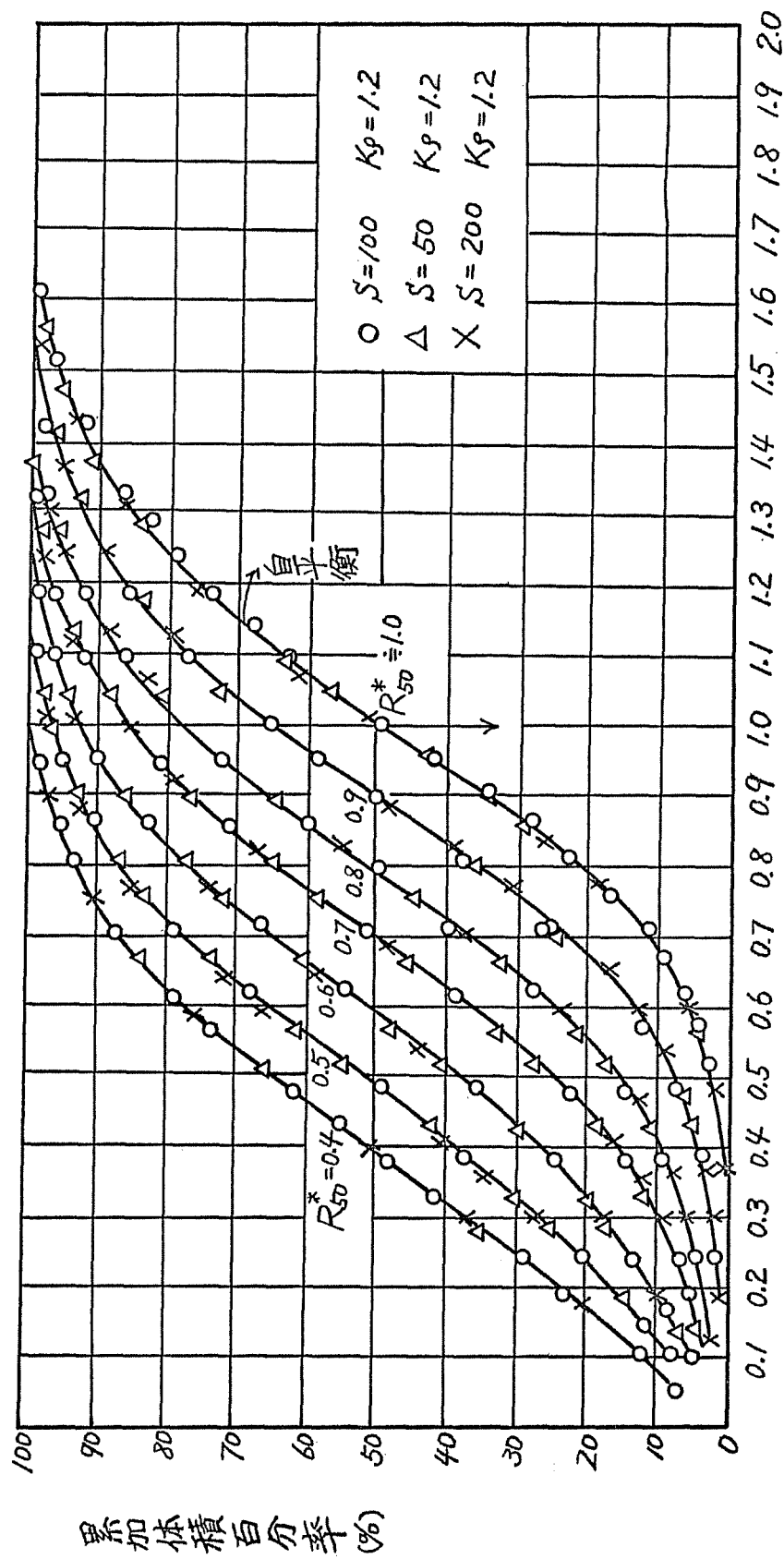
圖(5-13) 標準化成長平衡粒度分布



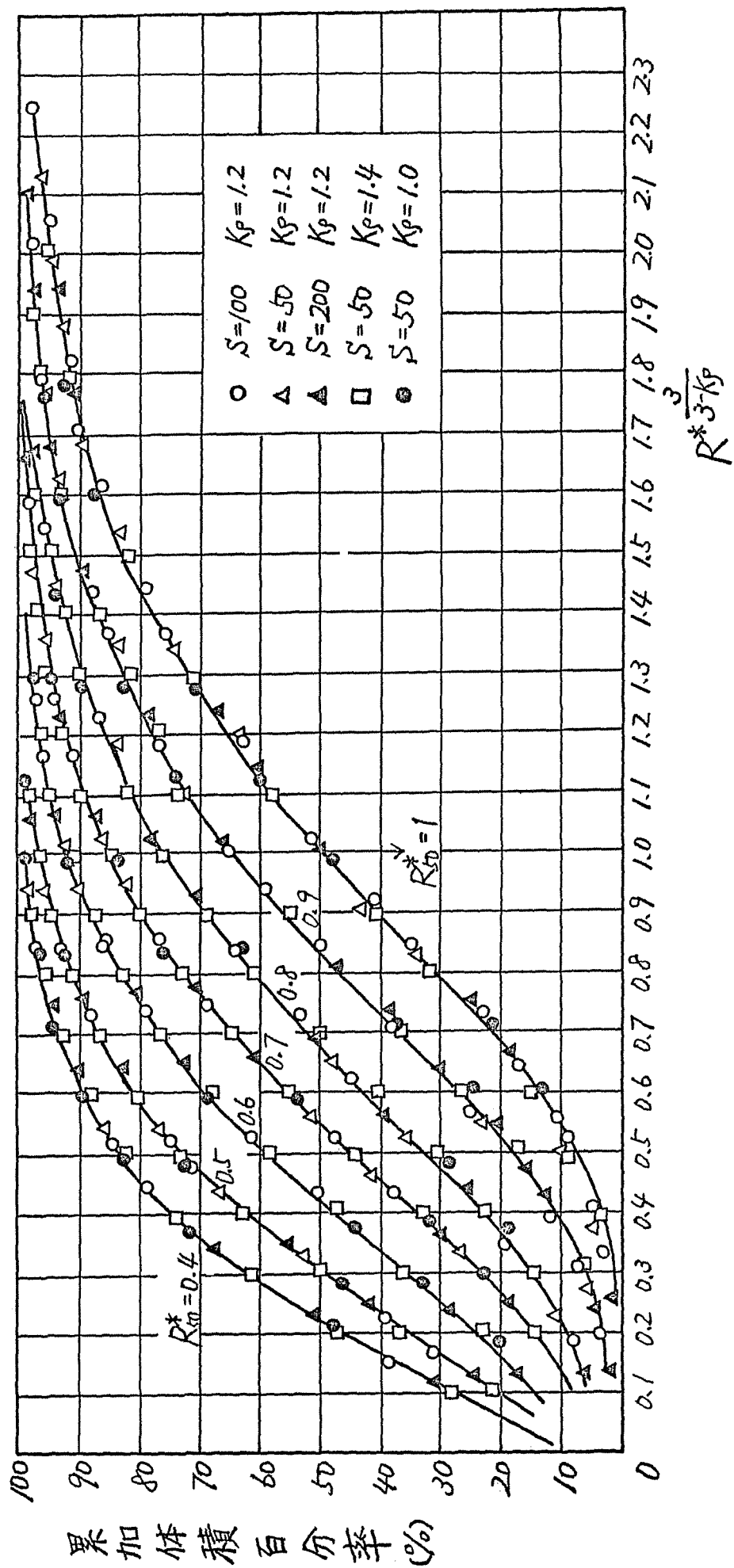
圖(5-14) 汎用標準化成長平衡累加粒度分布



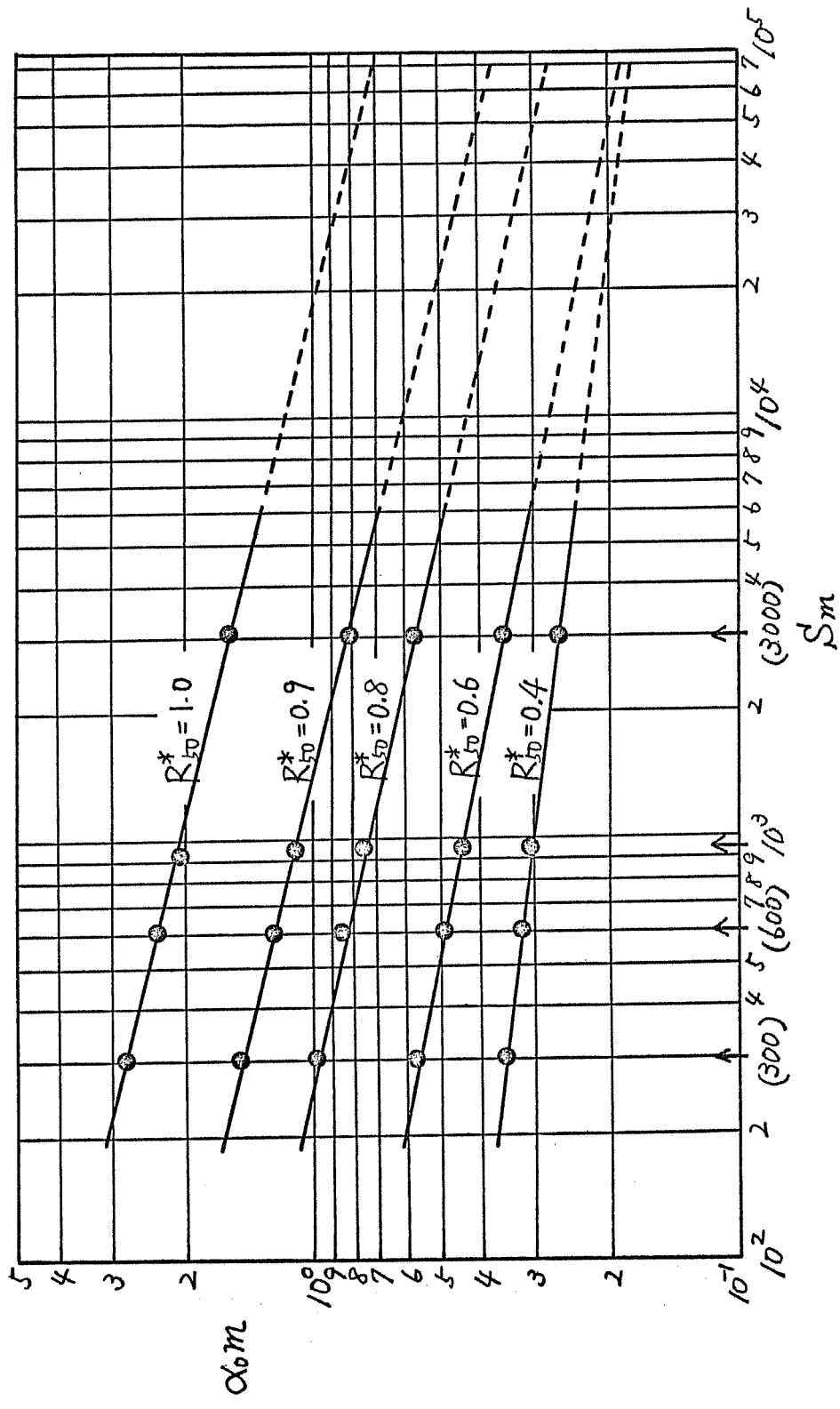
图(5-15)  $\alpha_m - R_{50}^*$  曲线



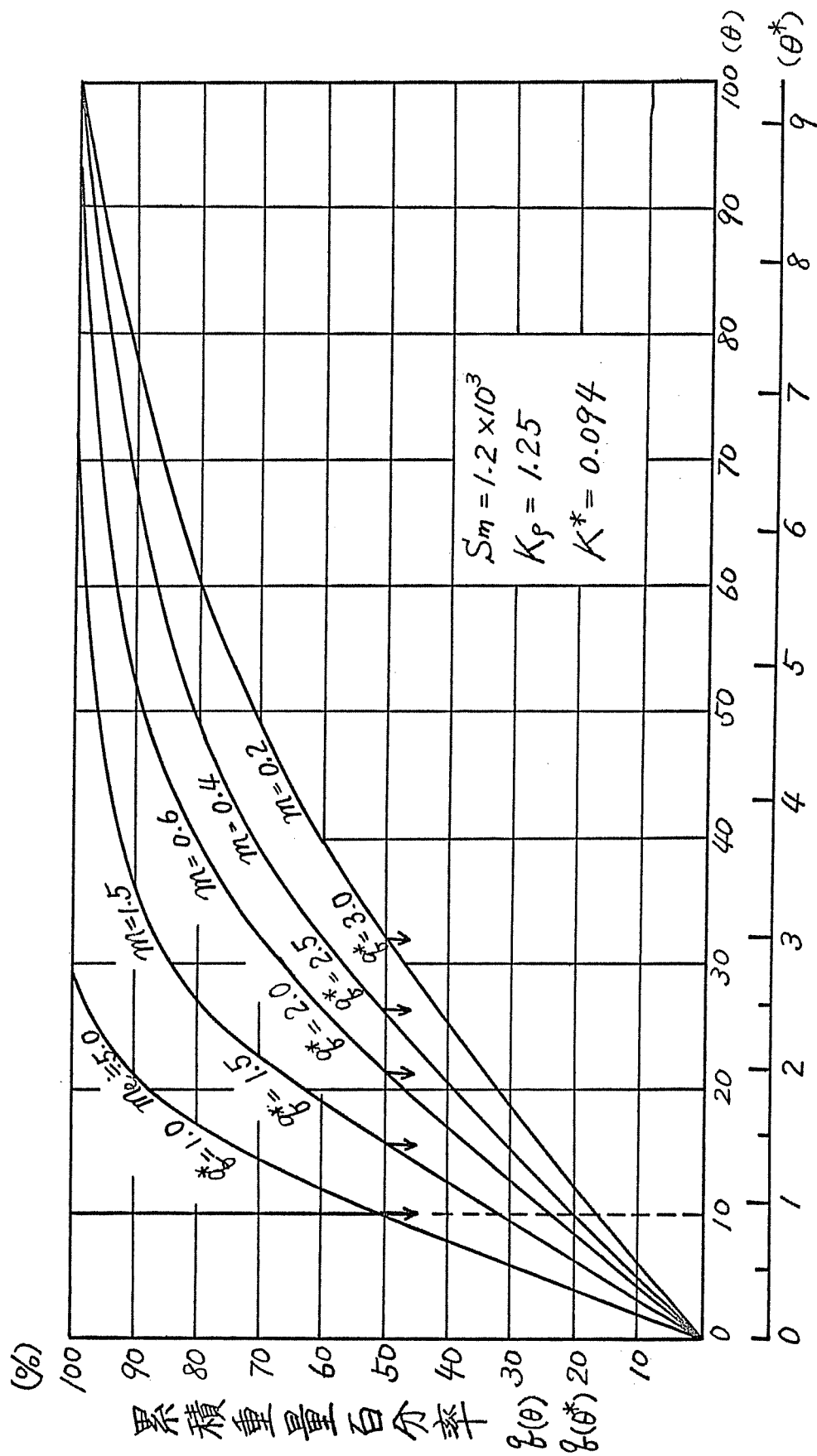
圖(5-16) 標準化累加粒度分布



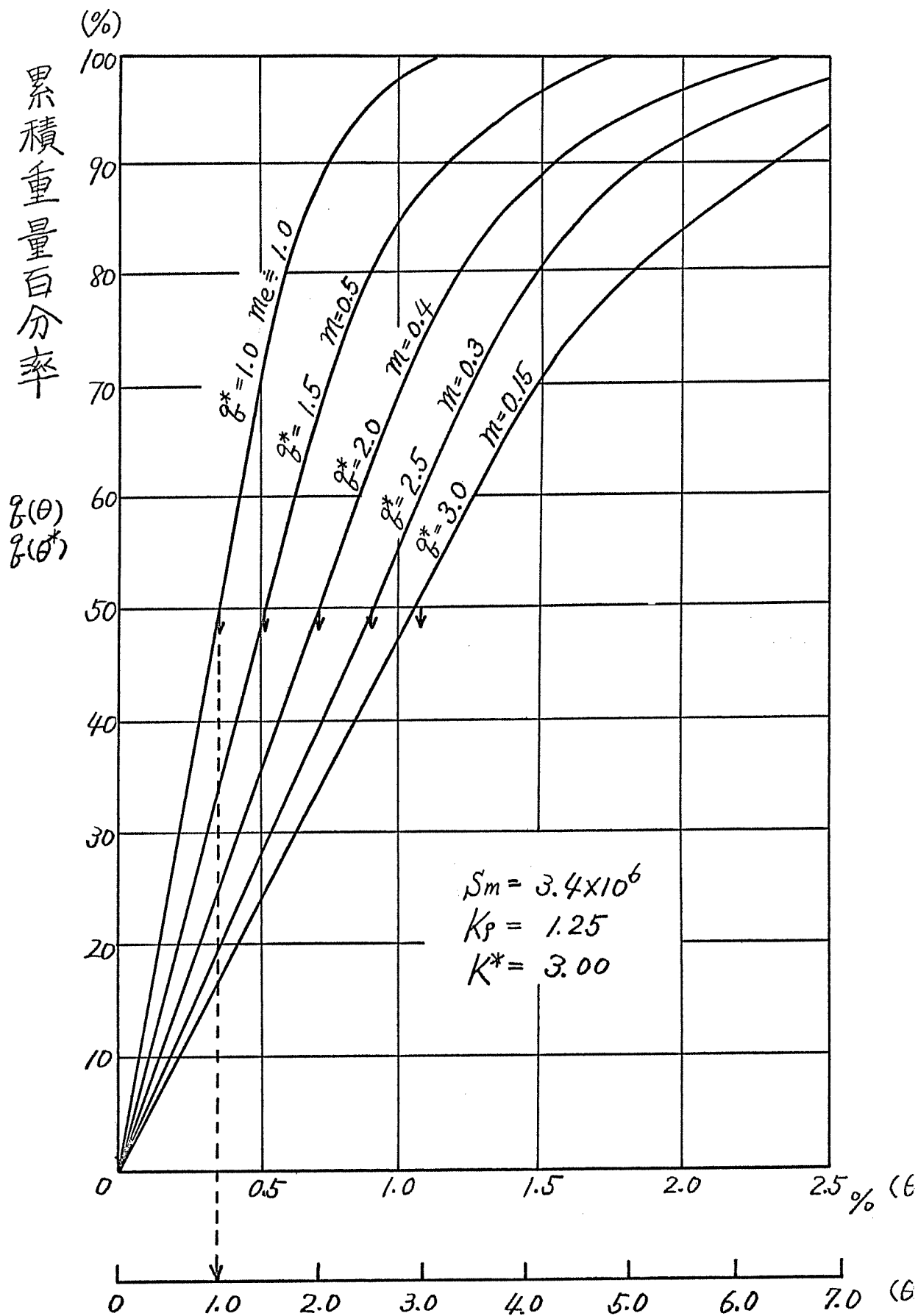
图(5-17) 汎用標準化累加粒度分布



図(5-18) 最大成長度( $S_m$ )と等しい  $R_{50}^*$ に達する無次元攪拌時間の関係  
(数値計算による)



圖(5-19) 無次元化時間累積量曲線



圖(5-20) 無次元化時間累積量曲線

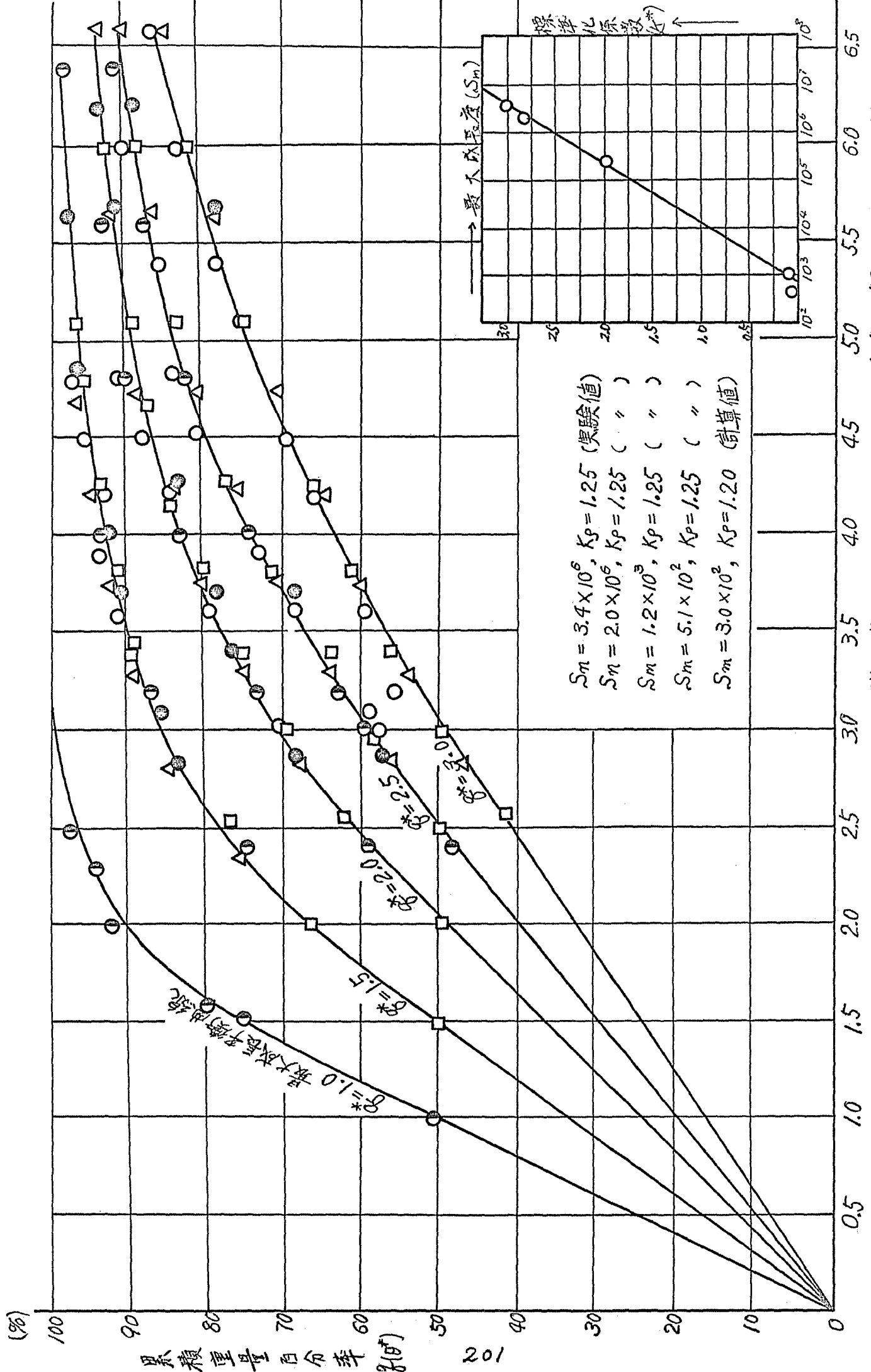
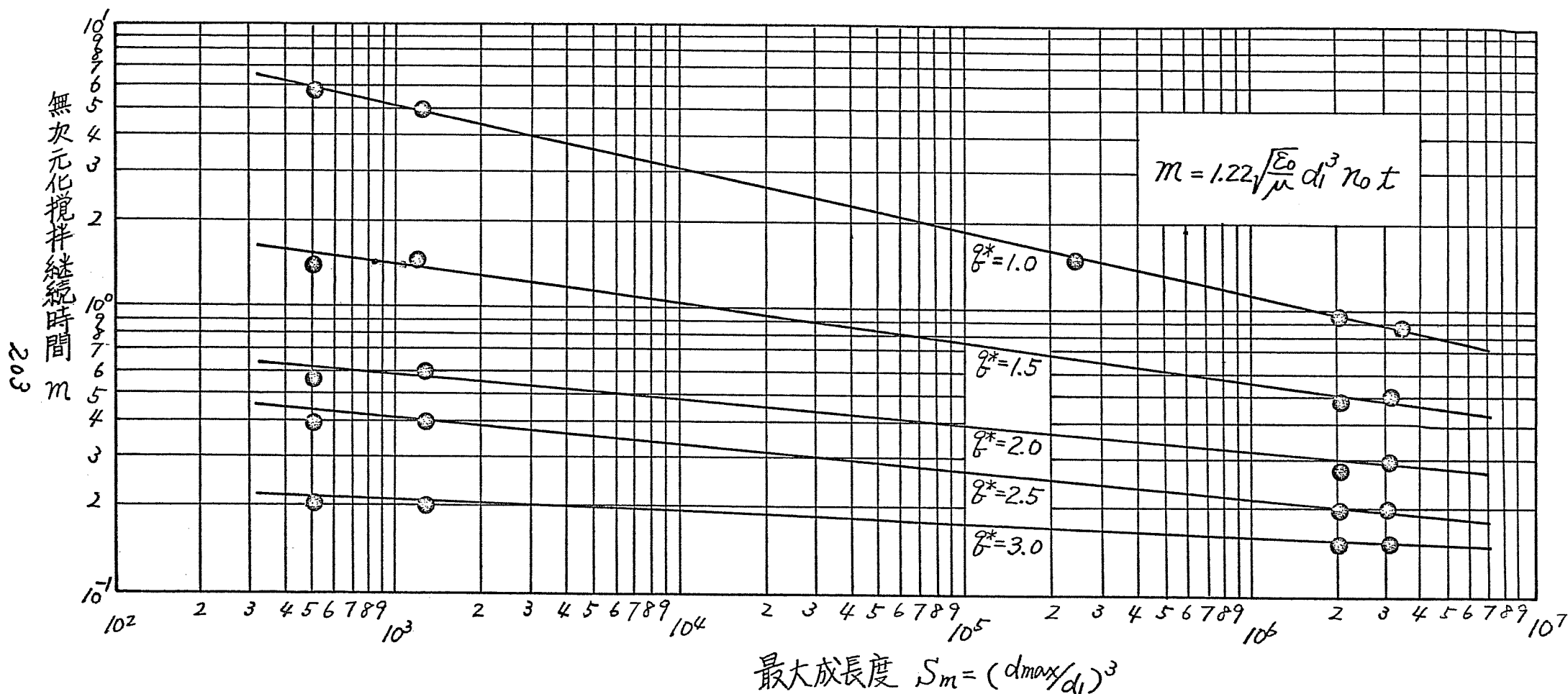


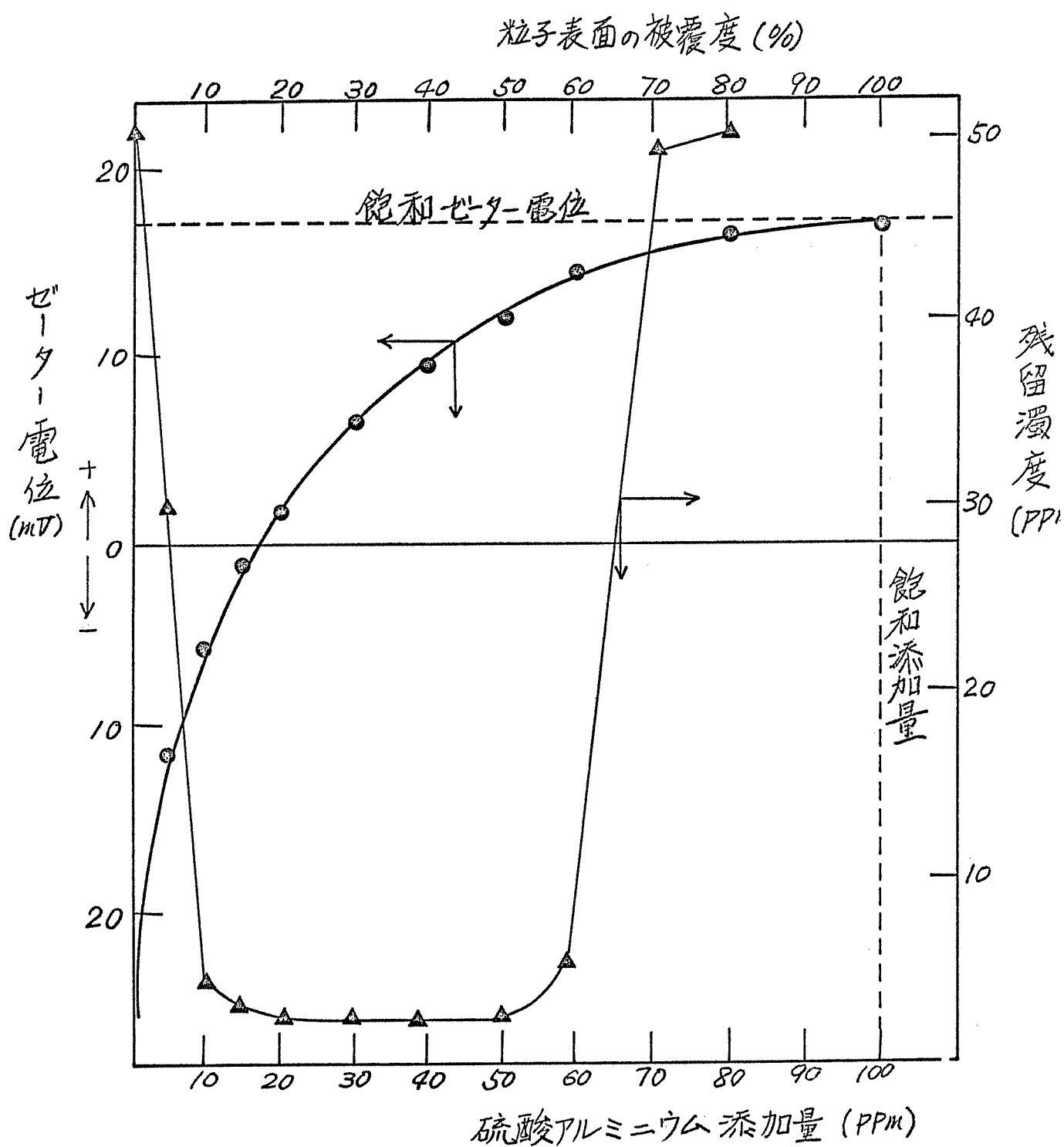
圖 (5-21) 汎用標準化無次元沉降曲線



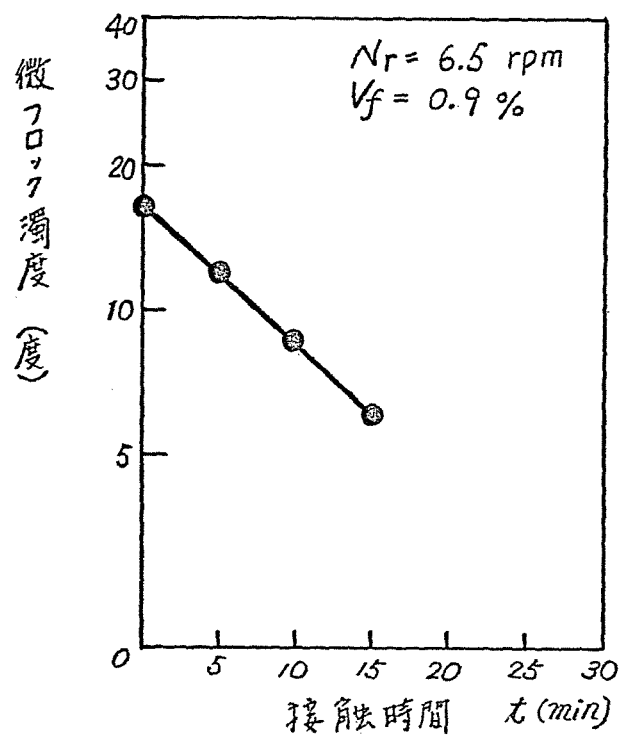


( $\alpha_0 \div \frac{1}{3}$  の場合の図)

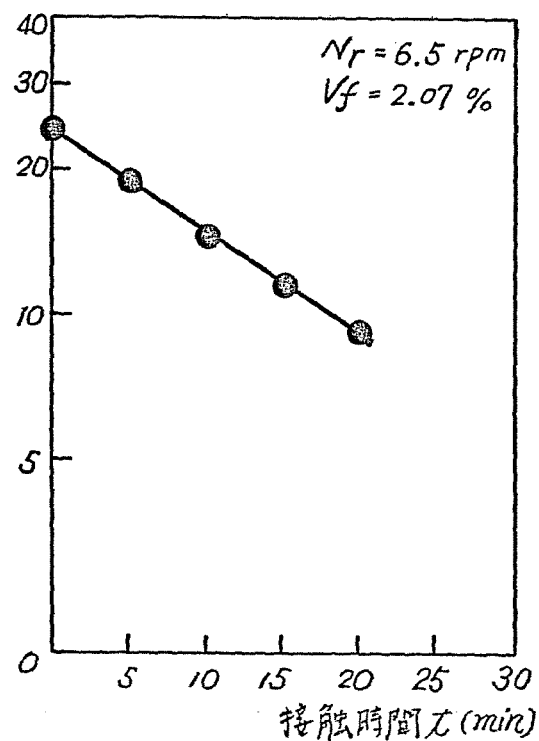
図(5-23) 最大成長度 ( $S_m$ ) と等しい  $g^*$  に達する無次元攪拌時間の関係 (実験による)



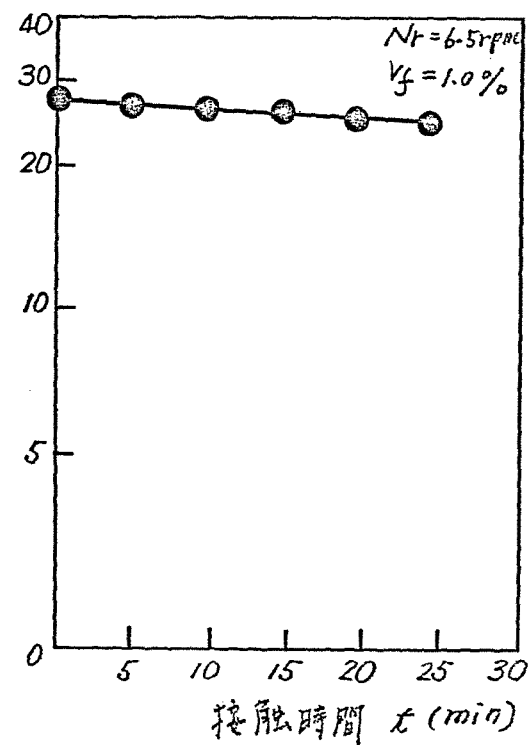
図(5-24) 凝集剤添加量と粒子表面被覆度の関係



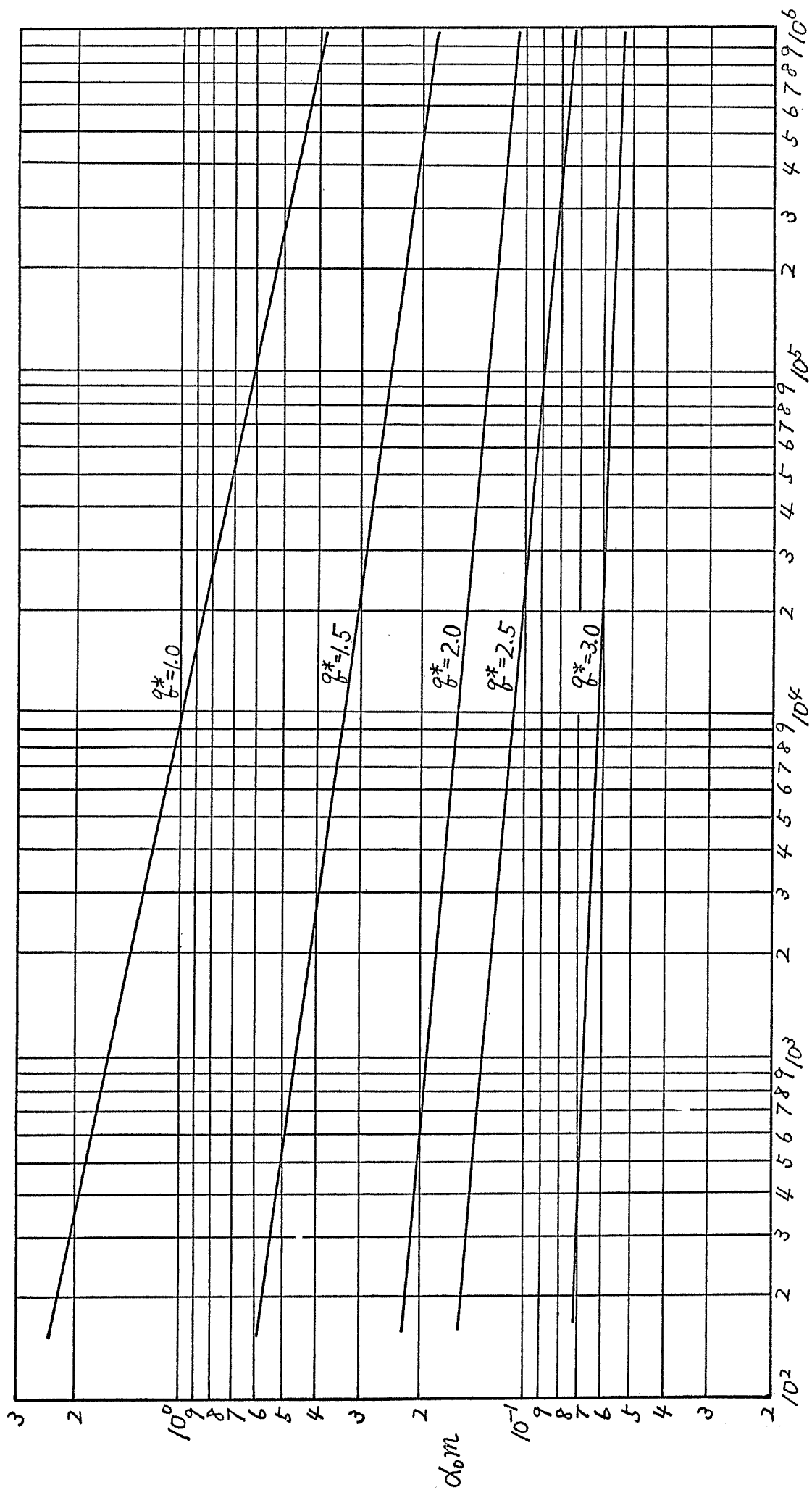
図(5-25)微小粒子吸合速度



図(5-26) 微小粒子吸合速度



図(5-27)微小粒子吸合速度



最大成長度  $S_m = (d_{\max}/d_1)^3$

図(5-28)  $\alpha_0 m$  と最大成長度の関係 (任意の  $\alpha_0$  に適用可能)

## 参考文献(第5章)

- 1) 例えば, 宇野利雄, 計算機のための数値計算, 応用数学力学講座 14, 朝倉書店, P. 146
- 2) Fair. G.M and Gemmell. R. S, A Mathematical Model of Flocculation, J. Colloid Sci. Vol 19, 1964, P. 360 ~ 372
- 3) Kruyt. H.R, Colloid Science I, p. 283 ~ 286, Elsevier Publication Co., 1952
- 4) Hahn. H.H and Stumm. W, Kinetics of Coagulation with Hydrolyzed Al(III), J. Colloid and Interface Sci., Vol 28, Sep. 1968, p. 134 ~ 144
- 5) 参考文献 3) と同じ
- 6) 丹保憲仁, 水処理における凝集機構の基礎的研究(I), 水道協会雑誌, 第361号, 昭39.10, P. 2~12
- 7) 丹保・山田・穂積, フロック強度に関する研究, 水道協会雑誌, 第427号, 昭45.4, P. 4~15
- 8) Healy. T.W and Lamer. V. K, The Energetics of Flocculation and Dispersion by Polymers, J. Colloid Science, Vol 19, 1964, P. 323 ~ 333
- 9) 丹保憲仁, 水処理における凝集機構の基礎的研究(II), 水道協会雑誌, 第365号, 昭40.2, P. 25~37
- 注) 本章の一部はすでに下記の論文に発表済みである。  
丹保・渡辺, フロッキュレーター合理的設計(III), 水道協会雑誌投稿中

## 第6章 連続流フロッキュレーターでの フロック形成

### 6-1 はじめに

流れが押し出し形であるような理想的フロッキュレーターにおいては前諸章で明らかにしたフロック形成に関する基礎理論とそこから導かれた諸成果を直ちに適用して設計を行なうことができる。

しかしながら、実際のフロッキュレーターは一般に3, 4段程度の直列攪拌槽から成り立っており、各段内での逆混合 (Back mixing) の影響を無視することができない。

そこで、本章ではある滞留時間分布を持つ実フロッキュレーターに対して本論で明らかにされたフロック形成理論を応用し、実設計への指針を得ることとしたい。

### 6-2 連続流フロッキュレーター内の流況の把握 (滞留時間分布と混合特性)

#### 6-2-1 実験用連続流フロッキュレーター

実験用パイロットプラントは第4章での実験に用いた回分式フロッキュレーターと同一の攪拌特性のものを4段直列に用いた。したがって、フロッキュレーターの攪拌特性を一括表示するために用いられる単位体積中の有効エネルギー消費率  $\epsilon$  と攪拌翼回転数の関係等は第4章での回分式フロッキュレーターと同様である。

使用したフロッキュレーターは縦 240 cm, 横 120 cm, 深さ 75 cm の角型水槽を開孔比が 6 % の隔壁で4つに仕切り、水平バドル型攪拌機を備えたものである。装置の概要は図 (6-1) に示す通りである。攪拌翼は無段変速プーリーによって 5 ~ 20 r.p.m. の間に自由に回転数を設定できる。

#### 6-2-2 実験手法と混合特性の表示法

連続流フロッキュレーター内での混合特性を求めるために、トレーサーとして食塩 (NaCl) を 300 ~ 400 ppm 流入端に注入し各段のフロッキュレーター隔壁の孔に付した白金電極でトレーサー濃度の時間変化を測定した。

測定方法としては、一定電圧下での電極間の抵抗の変化を電流で検出し高感度記録計によって自動記録した。

混合特性を表示するには幾つかの方法があるが、本章に

において残余濃度曲線 (Residence time curve) と過渡応答曲線 (Impulse response curve) の二つから特性を求める方法を採用した。また参考のために滞留時間分布関数そのものと考えられる近似的瞬間注入トレーサーによる濃度変化曲線も測定した。以下各々のトレーサーカーブの持つ意味について簡単に説明する。

図(6-2)のような断面積  $S$ ，長さ  $L$ ，容積  $V (=LS)$  なる装置内へトレーサー濃度  $C_0$  の流体が流速  $v (=Q/S)$  で連続的に供給されてゐる時，ある時刻  $t$  でトレーサーの注入を瞬間的に停止する。すなわち， $t \geq 0$  でのトレーサーの濃度を 0 とした場合の装置出口での排出流体中のトレーサー濃度  $C$  の時間変化曲線を残余濃度曲線と呼ぶ。

装置の大きさ，トレーサーの注入速度，初濃度などの実験毎のばらつきの影響を除くために，通常，濃度表示は時間  $t$  の濃度  $C$  を初濃度  $C_0$  で除した値  $C/C_0$  を用い，時間は還元時間 (Reduced time)  $\theta = t/T$  で表わし無次元化しておく。ここで， $T = L/v = V/Q$  であり装置内での平均滞留時間と呼ばれる。また， $C/C_0$  は  $\theta$  と共に変化するのを残余濃度曲線は還元時間  $\theta$  の関数として式(6-1)のよう表わされる。

$$\frac{C}{C_0} = R(\theta) \text{ ----- (6-1)}$$

図(6-3)は  $R(\theta)$  と  $\theta$  の関係を模式的に示したものであるが，流れが押し出し流であれば  $ABCD$ ，完全混合であれば  $AH E$  の形を示すが，一般にはこれらの中間に来るものが多く逆混合の存在のために  $AF$  のような傾向を示したり，死空間 (Dead space) があつて流体の一部が短絡したりしている場合には  $AG$  のような形にもなる。

トレーサーの注入をある瞬間から連続的に行ない，流出端でのトレーサー濃度の増加曲線を測定する方法で求められたものが過渡応答曲線である。したがつて，時間  $\theta$  に対する出口濃度を無次元濃度  $C/C_0$  として関数  $f(\theta)$  で定義すれば， $R(\theta)$  の定義からも明らかなるように式(6-2)によつて  $R(\theta)$  と  $f(\theta)$  は交互に変換しうる。

$$f(\theta) = 1 - R(\theta) \text{ ----- (6-2)}$$

Dirac の  $\delta$ -関数に近似しうる形で一瞬間に注入されたトレーサーに対する応答を  $E(\theta)$  とすると， $E(\theta)d\theta$  は  $\theta$

$\sim \theta + d\theta$  の間に流出した溶質の分率を表わしてゐる。この意味で  $E(\theta)$  のことを滞留時間分布関数 (Residence time distribution function) と呼ぶ。

$E(\theta)$  は  $R(\theta)$  と  $f(\theta)$  に対して次のような簡単な関係にある。

$$E(\theta) = df(\theta)/d\theta = -dR(\theta)/d\theta \quad \text{-----}(6-3)$$

$$f(\theta) = 1 - R(\theta) = \int_0^\theta E(\theta) d\theta \quad \text{-----}(6-4)$$

### 6-2-3 実験結果の解析

トレーサーによる応答の例を第1段と第3段での残余濃度曲線について示したのが図(6-4), (6-5)である。

ここで用いられた攪拌槽の混合特性を推定するため、図(6-3)と図(6-4)を比較してみると図(6-4)の実測のトレーサー曲線は図(6-3)の  $AHE$  に近似しうる形を有してゐることが分かる。そこで、本実験で用いられた連続流フロッキューレーターは多段直列完全混合槽として取扱ひうると考えられる。

等しい完全混合槽を  $j$  個直列に配置した際の  $R(\theta)$  は各槽毎の物質収支をとることによつて次式で表わされる。

$$R(\theta) = e^{-\theta} \left\{ 1 + \theta + \frac{\theta^2}{2!} + \frac{\theta^3}{3!} + \cdots \cdots \frac{\theta^{j-1}}{(j-1)!} \right\} \quad \text{-----}(6-5)$$

したがつて、この場合の  $E(\theta)$  は、

$$E(\theta) = \frac{df(\theta)}{d\theta} = \frac{d[1-R(\theta)]}{d\theta} = \theta^{j-1} e^{-\theta} / (j-1)! \quad \text{-----}(6-6)$$

式(6-5), 式(6-6)を槽列に適用するためには上述の還元時間  $\theta$  の代りに、槽列数  $j$  を加味して槽列全体の平均滞留時間  $jT_1$  (ここで、 $T_1$  は1槽の平均滞留時間) を分母にとつた還元時間  $\theta = t/jT_1$  を用いる。

式(6-5)を横軸に槽列全体の無次元滞留時間  $\theta$  をとり、

縦軸に  $R(\phi)$  をとって図示すると図(6-6)となる。図から槽の分割数  $j$  を増やしていくと流れが押出し流に近づく様子が理解できる。

式(6-6) を  $\phi$  を基準にして書き換えると式(6-7)となる。

$$E(\phi) = j^j \phi^{j-1} \exp(-j\phi) / (j-1)! \quad \text{----- (6-7)}$$

もし本実験で用いたフロッキュレーターを近似的に完全混合槽列として扱うことができれば、図(6-4)と図(6-5)の横軸を  $\phi$  として表示すると図(6-4)と一致するはずである。第1段と第3段の実験値を横軸を  $\phi$  によって無次元表示すると図(6-7)が得られる。

図から知られるように、実験値は完全混合よりも幾分流出の遅い混合特性を示している。流出が遅れる原因としては、槽の混合特性そのものよりもむしろ今回の実験ではトレーサー感知電極を各段の間の隔壁の孔に取付けたので、測定されたトレーサー濃度が後続する槽の濃度の影響を受けたものと考えられる。この点を確かめるためには、使用したフロック形成槽を単独槽として用いて槽からの排出流体そのものの濃度を測定すれば良い。

このような実験を Angaman は著者と同型のパドル式フロッキュレーターを用いて行っており、その結果  $Camp$  の速度勾配値  $G$  (1/sec) が  $30 \sim 200 \text{ sec}^{-1}$  の範囲で攪拌強度が滞留時間分布に影響せず、その混合特性も完全混合と見なれて良いことを明らかにしている。Angaman のトレーサー実験の結果を  $R(\theta)$  について示すと図(6-8)のようである<sup>2)</sup>。

したがって、本章ではこの遅れを無視して実験に用いたフロッキュレーターを近似的に完全混合槽列として扱うことにした。なお、図(6-7)は攪拌翼回転数が  $13 \text{ r.p.m}$  の実験値を示したものであるが、 $6 \sim 13 \text{ r.p.m}$  の範囲では攪拌強度による混合特性の差は見られず、この点について  $Angaman$  の結果と一致している。参考のために本実験に用いたフロッキュレーターの  $E(\theta)$  の実験例を示すと図(6-9)のようである。

本実験で用いた連続流多段直列槽のように、各々の槽からの流出濃度そのものの測定が困難な装置の混合特性が完全混合に近いと予想される場合には、トレーサー感知電極は装置内の濃度を直接測定できる位置に設置した方がより正確にトレーサーの応答を計測できると考えられる。

### 6-3 案フロッキュレーター内でのフロック形成

前章で明らかにしたように、通常のフロック形成過程は数μ程度の微小粒子（水中にけん濁してゐる粘土粒子など）が衝突合—くり返し、数百μ程度の微小粒子集合体（フロック）へと成長して行く現象であり、不均一組成粒子群の衝突にまつ現象が進行して行く不均一二次反応である。

回分式または押出し流れのフロッキュレーターにおけるフロック形成は前章までの理論の通りに進行して行くが、逆混合を伴うフロッキュレーターでは回分式によるフロック形成のパターンと流れの混合パターンを合わせ、滞留時間分布のある場合のフロック形成を論じなければならぬ。トレーサー実験などによつて得られた滞留時間分布と回分式反応の進行過程の合成は、均一一次、二次反応等の場合には解析的に数値計算によつて比較的容易に行なうことができるが不均一反応の問題は簡単には解けぬ。しかも、反応の機序が複雑で反応係数そのものが濃度（フロックの個数濃度）のみでなくフロックの組成によつても変化するようなフロック形成反応と滞留時間分布を重ね合わせることは非常に困難である。したがつて、何等かの便法を採つて反応の進行と流況を合成する方策を講じなければならぬ。

凝集・フロック形成・沈殿・砂ろ過を主プロセスとしてゐる通常の急速ろ過システムにおけるコロイド寸法以上のけん濁質の除去（固液分離）は、沈殿池で重力を推進力とする固液分離で高次の集塊生成物（大形フロック）を除き、ろ過過程で微小フロックを除去するように設計されてゐる。

この様に沈殿池とろ過池に配分される粒子寸法別の負荷が生ずるのは、原水中に存在したほぼ均一な組成を持つ初期粒子群がフロック形成に伴つて大きな寸法分布（沈降速度分布）を持つに至ることが主な理由と考えられる。

そこで、ここでは主として沈殿池で沈殿分離される大形のフロック群と沈殿池での除去の対象とならぬろ過池の負荷としての微小フロックの二つに、生成したフロックを大別して論ずる便法を用ひて検討を進めることとする。

理論的にはこれら二群のフロック粒子は連続的な寸法分布を持つてゐるが、実用上静水中30分沈降時の上澄5cmの部分に残留してゐるものを微小粒子群、それ以上を沈降分離可能粒子として本論では扱うこととした。直径が3~4μの粘土粒子は $10^{-3}$ cm/sec程度の沈降速度を持つので、

このような沈降条件で残留してゐるものは、 $10\mu$ 以下の粒子と考えられ。したがって、このような分画を行なうときには、フロック群を数μの径を持つ初期粒子と数十μ以上の径を持つフロックに分けて論ずることになる。

押し出し流れ形のフロッキュレーターでは初期粒子から最大成長フロックに至る粒径分布は連続的であり、このような分画は適当とは言えない。しかし、逆混合を伴う多段のフロッキュレーターでは、体積濃度が少量の大形フロック群が滞留してゐる槽内へ、少量の微小フロックが連続して流入して来る形をとることで、微小フロックがフロック全量に占める割合は小さく、微小フロック群のみの挙動を分離することもある上、実用上可能であろう。

逆混合が充分で平均滞留時間の比較的長い単槽のフロッキュレーターを考えると、大形化したフロック同志は衝突半径が大であるから接触の機会も大きい。しかし、連続的に流入して来る小さな衝突半径を持つ粒子群は相互会合の機会よりは、大形フロックへ接触フロック形成的に吸合されフロック化して行く機会が、多いものと考えられる。

上述のような場合の極限状態が接触高速沈殿池における微小フロックの吸合フロック化であり、式(3-37)で与えられる均一1次反応となる。

通常の非接触形フロッキュレーターにおいても、逆混合のある場合には程度は低いにしても既成のフロックに対する微小粒子の接触吸合が大きな意味を持つてくる。

Hudson はフロック形成の全段階において、微小粒子の減少を微小粒子個数濃度に関する均一1次反応と考え、Camp の基本式を用いて、攪拌継続時間も後のフロック個数濃度  $n_t$  を式(6-8)のようにならせた。<sup>4)</sup>

$$\frac{n_t}{n_0} = \exp\left(-\frac{\phi V_f G}{\pi} t\right) \text{-----} (6-8)$$

ここで、 $\phi$ ：衝突合一確率、 $V_f$ ：フロック体積率、 $G$ ：C-amp の速度勾配値、 $n_0$ ： $t=0$ に存在した微小フロック個数濃度。

また、角田はフロック形成反応を均一 $\alpha$ 次反応と仮定し、著者と同様に静水沈降上澄水濁度によって表示される微小粒子の消滅速度の測定結果から、 $\alpha=1$ であることを明らかにした。<sup>5)</sup>

これらはいずれも前述のように、微小フロック群を仮に全フロック群から分離して扱った場合に現れる擬1次反

応であって、微小粒子の減少速度を1次反応的に扱って良いことを示している。しかし、Hudsonの式(6-8)はフロック体積を一定としているので接触フロック形成のみを用いることができない。また角田の報告は微小粒子の消滅のみを扱ったものであるから、これらの成果はフロック形成過程の一面のみをとらえたものであり全過程を取扱ったものとは言えない。

逆混合を持つ数段の撹拌槽を直列に配した通常のフロッキュレーターにおいては、ある程度の大形フロック(100μ程度以上)が初期から出現し、微小粒子群の消滅は擬1次反応(擬接触フロック形成)として扱いうるのであろう。

したがって、1次反応の特性から滞留時間と微小粒子群の濃度は共に同程度の重要性を反応の進行に持ち、滞留時間分布によって現象が大きく支配される。

一方、沈殿池で除去される主要部分となるフロックの成長はフロック個数濃度に関する不均一2次反応であり、滞留時間の分布よりもフロック濃度により進行の度合いが支配される場合が多い。したがって、多少の槽内滞留時間分布があってもそれ程大きな影響を反応に及ぼさず、押し出しもしくは回分式での結果と近似的には一致してくるはずである。

上述の諸点を考慮するならば、ある滞留時間分布を持つ実フロッキュレーターでのフロック形成は微小粒子のフロック化による消滅現象とフロック同志が合一してより大形のフロックへと成長して行く現象とに分けて論ずることも可能と考えられる。そこで、次節以下では微小粒子群のフロック化とフロック成長とを別々に取扱うこととした。

#### 6-4 連続流フロッキュレーターでの微小粒子群の消滅速度

##### 6-4-1 消滅速度の一般式

今、連続流フロッキュレーターが縦方向混合を伴う定常状態で操作されている場合を考える。この場合の微小粒子消滅のパターンは回分式もしくは押し出し流れのフロッキュレーターのそれとは異なってくる。

すなわち、回分式では多量に初期粒子群と見なせる均一微小粒子から衝突合一が始まり大形フロックへと成長しつつ微小粒子群が消滅して行く。しかし、逆混合を伴う連続流定常状態においては、ある粒度組成を持ったフロック群の存在するフロッキュレーターに凝集段階を終了した

微小粒子群が連続的に流入し、微小粒子が既成の大形フロック群に（フロッキュレーター内を流下するにつれてフロック群は大形となる）吸合される過程、あるいは微小粒子のフロック化過程が存在する。したがって、逆混合のある連続流フロッキュレーター内での定常状態における微小フロック群の消滅は、単一組成粒子が成長して行く形のフロック形成式のみによっても論ずることができず、既成のフロックとの相互作用を持ったフロック形成として各々の段毎に考える必要がある。

第3章6節で明らかにしたように、著しく粒径を異にするフロック群相互の衝突合一現象は均一1次反応であるから、滞留時間分布のある流れの場合についても簡単に理論を応用することができよう。

フロッキュレーターへ初濃度  $C_0$  の微小粒子群が連続的に供給され槽内で吸合反応が進み、遂に平均濃度  $C$  となってフロッキュレーターから流出して行く場合を考える。

流出水中のフロック化されない初期粒子群の濃度  $C$  は、そのフロッキュレーターの滞留時間分布関数を  $E(\phi)$  とすると均一1次反応である場合に限り槽内での流体の混合機構の如何にかかわらず式(6-9)で示すことができる。

$$\frac{C}{C_0} = \int_0^{\infty} e^{-K_c t \phi} \cdot E(\phi) d\phi \quad \text{----- (6-9)}$$

ここで、 $C_0$ ：初期粒子群の初濃度， $t$ ：反応時間 (sec)， $K_c$ ：反応速度係数 (1/sec)，接触フロック形成の場合には、

$$K_c = \frac{9}{\sqrt{15}} \bar{P} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} V_f \quad \text{----- (3-39)}$$

$E(\phi)$  として式(6-7)を用いると多段直列槽の場合については式(6-9)は次式のような形に積分され、第  $j$  段からの流出微小粒子濃度  $C_j$  は、

$$\frac{C_j}{C_0} = \frac{1}{(1 + K_{c1} t_1)(1 + K_{c2} t_2) \cdots (1 + K_{cj} t_j)} \quad \text{----- (6-10)}$$

ここで、 $K_{c1} \cdot K_{c2} \cdots K_{cj}$ ：それぞれの段での反応速度係数 (1/sec)， $t_1 \cdot t_2 \cdots t_j$ ：それぞれの段での平均滞留時間 (sec)。

したがって、既知の攪拌強度  $E_0$  と滞留時間  $t$  のフロッキュレーターでは  $\bar{\rho}$  と  $V_f$  を求めておけば式(3-39)と式(6-10)より流出水中の微小粒子群の濃度を知らることが出来る。

一般の化学反応では、反応速度係数  $K_c$  を一定と見なしているのが回分テストにあって  $K_c$  を求め、 $K_{c1} = K_{c2} = \dots = K_{cj} = K_c$  とし式(6-10)より  $C_i/C_0$  を算定することが出来る。しかし、フロック形成反応においては  $K_c$  は  $\bar{\rho}$  と  $V_f$  の関数であるから、たとえ  $E_0$  を一定としても  $K_c$  はフロック形成時間に伴って変化し一定値と見なせない。

そこで次に、 $\bar{\rho}$  と  $V_f$  がフロック形成時間とどのような関係にあるかを検討して、多段槽列における反応速度係数を算定する方法を提案したい。

#### 6-4-2 微小粒子のフロック化過程でのフロック体積率 $V_f$ と衝突合-確率 $\bar{\rho}$

著しく粒径を異にする2群の粒度組成を持つフロック群における微小粒子の大形フロックへの吸合速度は式(6-11)で与えられる。

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{9}{\sqrt{15}} \bar{\rho} \sqrt{\frac{E_0}{\mu}} V_f n \quad \text{----- (6-11)}$$

式中の  $n$ ,  $V_f$ ,  $\bar{\rho}$  は各々任意攪拌継続時間  $t$  における微小粒子個数 ( $1/\text{cm}^3$ ), フロック体積率 (無次元), 衝突合-確率であるから、考える瞬間における微小粒子の大形フロックへの吸合による消滅速度は式(6-11)で表わされることとなる。

通常の高速接触沈殿池の接触フロック形成は与えられた攪拌条件下における最大成長分布に達した母フロック群に対する微フロックの吸合反応であり、この場合には  $\bar{\rho}$  と  $V_f$  は一定と見なすことが出来る。そこで、式(6-11)で個数比が濃度比に比例すると考えられるので、未反応率  $C/C_0$  は式(6-12)のようにならる。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{n}{n_0} = \exp\left(-\frac{9}{\sqrt{15}} \bar{\rho} \sqrt{\frac{E_0}{\mu}} V_f t\right)$$

----- (6-12)

しかしながら、フロックの粒度組成がフロックの成長段階毎に変化し、したがって  $\bar{\rho}$  と  $V_f$  もそれに伴って変化して行

く通常のフロッキュレーターでは、式(6-12)のまうに $\bar{P}$ と $\bar{V}_f$ を定数として扱い未反応率を求めることができない。  
 着目してゐる段階でのフロック粒度組成が分かれば $\bar{P}$ 、 $\bar{V}_f$ が定まり、式(3-39)と式(6-10)によつてフロッキュレーターからの流出水中に含まれる微小粒子群の濃度を算定することができ。しかし、逆混合を伴う連続流フロッキュレーター内のフロック群の粒度分布は固分式または押し出し流れで、理論式から直ちに求められぬ。  
 そこで、本章3節で述べた理由によつて、実フロッキュレーターの平均滞留時間が $\bar{t}$  (ここで、 $\bar{t}$ は1段での滞留時間)である1段目のフロック形成槽のフロック体積率 $\bar{V}_f$ と衝突合一確率 $\bar{P}_i$ は、 $\bar{t} = \bar{t}_i$ であるもう1段の固分式または押し出し流れの際のフロック粒度組成と衝突合一確率 $\bar{P}$ に対応すると考え、以下に示すような便法を講じて未反応率を求めることとした。

固分式においてフロック形成条件が固定されてゐれば、 $\bar{P} = \bar{P}(t)$ 、 $\bar{V}_f = \bar{V}_f(t)$ であり共にフロック形成時間 $t$ の関数であるから、便宜的に両者の積がフロック形成時間に伴つて指数関数的に変化すると仮定する。

$$\bar{P}\bar{V}_f = F(t) = K_1 \left( \frac{t}{T^*} \right)^\delta \text{-----} (6-13)$$

ここで、 $t$ : フロック形成時間、 $T^*$ : フロック群が成長平衡に至るに要するフロック形成時間、 $K_1$ : 定数、 $t \geq T^*$ では第3章6節で示したように $\bar{P} \doteq 1/45$ であるから、 $K_1 = 1/45 \bar{V}_f^*$ 、ここで $\bar{V}_f^*$ は成長平衡時のフロック体積率。

式(6-13)を式(6-11)に代入して積分すると、

$$\log \frac{C}{C_0} = \log \frac{n}{n_0} = - \frac{K_2}{\delta + 1} \left( \frac{t}{T^*} \right)^{\delta + 1} + K_3 \text{-----} (6-14)$$

$$K_2 = \frac{9}{\sqrt{15}} \frac{1}{45} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu}} \bar{V}_f^* T^* = \frac{1}{5\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu}} \bar{V}_f^* T^* \text{-----} (6-15)$$

$K_3$ : 積分定数

もし式(6-13)が成つて式(6-14)の関係が成立する

ならば、回分式のフロック形成テストを行ないフロック形成時間の経過に伴う微小粒子の減少速度を追跡し、その結果を横軸に  $(t/T^*)^{\delta+1}$ 、縦軸に  $\log C/C_0$  をとりプロットすると勾配が  $-K_2/\delta+1$  の直線関係が得られるはずである。ただし、 $\delta+1 > 0$  となる。

この関係を確認するため第4章で用いた回分式フロッキュレーターで実験を行ない、一定時間間隔でフロック形成槽より不攪乱採水し、恒温水槽中にサンプリング管を浸して30分間沈降させ上澄の5cmをハウルピペットで抜き取り、その中に含まれる微小粒子群の濃度を濁度として求めた。

前述の  $\delta > -1$  の条件下で式(6-14)の関係を満たす  $\delta$  を推定する試行錯誤プロットを行なった。 $\delta = -0.5, -0.6$  と仮定してプロットを試みたのが図(6-10)である。図から分かるように、 $\delta = -0.6$  のプロットで良好な直線関係を示した。理論式(6-15)に基づいて  $K_2$  を計算し前述のようにして求めた  $\delta = -0.6$  を用いて図(6-10b)の勾配  $-K_2/\delta+1$  を計算で求めた所  $-0.3$  となり図(6-10b)のプロットと大略一致した。しかも用いた粒度分布は成長平衡分布を基準とした正規化されたものであるから、この結果はフロック形成条件の如何を問わずすべてのフロック形成過程に対して汎用しうるものである。したがって、 $\delta = -0.6$  と云う値は理論の直線性を満し理論計算値と実測の勾配の絶対値もほぼ等しく妥当な値と考えられる。そこで、 $\delta = -0.6$  を採用して  $\bar{P}$  の変化を式(6-13)で表示することが可能と考えた。

### 6-4-3 接触フロック形成における $\bar{P}$ と $\nabla f$

成長平衡に達した母フロック群に対する衝突合-確率  $\bar{P}$  は先に明らかにしたように  $\bar{P} \doteq 1/45$  である。

また、逆混合を持たないフロック形成における一般の衝突合-確率関数  $\alpha_f$  は式(6-18)で示される。(第5章3節参照)

$$\alpha_f = \alpha_0 \left(1 - \frac{R}{S+1}\right)^n \text{-----} (6-16)$$

ここで、 $\alpha_0$ :初期衝突合-確率( $\doteq 1/3$ )、 $R \cdot S$ :第5章3節参照。

接触フロック形成における最大成長フロック群に吸合さ

れる微小フロック群のフロック化過程における衝突合-確率 $\bar{p}$ は第3章6節と第5章3節で得られた成果を組み合わせて式(6-17)のよう示される。

$$\bar{p} = \alpha_f = \alpha_0 \left(1 - \frac{R}{S+1}\right)^n \doteq \frac{1}{3} \left(1 - \frac{R}{S+1}\right)^n$$

$$\doteq \frac{1}{40} \sim \frac{1}{45} \text{ ----- (6-17)}$$

さらに、成長平衡時においてはその時の累加フロック体積が50%を占めるフロックへの初期粒子集合数 $R_{50-ult}$ と最大成長フロックへの集合数 $S$ との間には $R_{50-ult} \doteq 0.4 S$ の関係がある。累加フロック体積が50%であるフロックを体積基準での母フロックの代表値とし、式(6-17)から $R = R_{50-ult} = 0.4 S$ として指数値 $n$ を求めたところ $n \doteq 5$ となった。

実験におけると同様に、数値計算によって求められたフロック群について式(6-13)の関係が成立しているかどうかを $n = 5, 6$ の場合について $\bar{p}$ を計算し前述の $\delta = -0.6$ を用いて $(t/T^*)^{-0.6}$ と $\bar{p}V_f$ の関係をプロットしたのが図(6-11)である。図(6-11)より、 $n = 5$ の場合に良い直線性を示した。各々について $\bar{p}$ を式(6-17)によって求めたところ、 $n = 5$ では $\bar{p} \doteq 0.022 (\doteq 1/45)$ 、 $n = 6$ では $\bar{p} \doteq 0.015 (\doteq 1/65)$ であった。

第5章3節で述べたように、単一組成から出発した場合のフロック形成において $n \doteq 6$ であり、その際の衝突合-確率関数は $R$ 倍粒子を形成するすべての粒子の組合わせに対する平均値として表示した。しかし、初期粒子( $R=1$ )と $(R-1)$ 倍粒子から $R$ 倍粒子が形成される組合わせが卓越する接触フロック形成においては、 $n$ の値は単一組成から出発する場合よりも若干小さくなるのかも知れない。したがって、既成の大形フロックに微フロックが吸合される接触フロック形成における衝突合-確率関数の指数 $n$ は6よりも若干小さい程度の値をとるものと考えられる。

同分テストで確認された式(6-13)の関係を逆混合のある連続流条件下に適用するには、逆混合のある連続流のフロッキュレーターのフロック形成時間をどのように考えるかが問題となる。

第3節で述べた理由から、フロック形成攪拌時間の代表値として平均滞留時間等をとることができれば、多段連続流フロッキュレーターのある段における吸合反応速度係数

$K_c$ の算定に式(6-13)を用いることができる。

そこで次に、回分と連続流のフロック群粒度分布の比較を行ない、上述の諸点を検討するための実験を行なった結果について述べることにする。

## 6-5 連続流フロッキュレーター内のフロック粒度分布の遷移

### 6-5-1 実験方法

図(6-1)の連続流フロッキュレーターを用い実験条件として原水濁度50ppm, 硫酸アルミニウム添加量30ppm, pH 8.0とし、処理流量を50l/min, 100l/min, フロック形成攪拌を8r.p.m ( $E_0 = 1.9 \times 10^{-1} \text{ erg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ ) と10r.p.m ( $E_0 = 3.3 \times 10^{-1} \text{ erg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ ) のそれぞれを2通りとした。

フロック群粒度分布の測定はフロック形成槽からサイフォンでフロックを吸入し接写撮影を行なう方法を用いた。

### 6-5-2 連続流フロッキュレーター内のフロック群粒度分布

回分フロッキュレーターにおける無次元フロック形成時間 $m$ は実攪拌継続時間 $t$ から直ちに求めることができるが、逆混合のある連続流フロッキュレーターは槽内滞留時間分布を持つので $m$ を一義的に確定できない。しかし、成長平衡時の粒度分布は自平衡分布となつて初期条件と独立に定まるはずであるから、十分な滞留時間を持つ槽内のフロック粒度分布は先に明らかにした成長平衡分布となつてゐるものと考えられる。

流量 $Q = 50 \text{ l/min}$ , 攪拌翼回転数8r.p.mの実験の第4段(平均滞留時間35分)におけるフロック群粒度分布を標準化し、回分装置による著者と栗谷ら<sup>6)</sup>のデータとの比較を行なったものが図(6-12)である。図からフロック群の成長平衡分布はすべての条件においてほぼ等しくなることが実験的に確認された。なお、栗谷らのデータはCampの速度勾配値 $G$ が $100 \sim 1000 \text{ sec}^{-1}$ と云つた強い攪拌強度下のものであり、フロック径は $20 \mu \sim 200 \mu$ の範囲に分布している。著者のデータはフロック径が $100 \sim 1000 \mu$ の範囲に分布してゐたので、図(6-12)によつて確認されたように成長平衡分布は広い範囲の攪拌強度下に適用することが可能である。

今、仮りに処理流量で槽容量を除いた平均滞留時間を $\tau$

フロック形成時間にとり、各槽の $m$ 値を求めると表(6-1)となる。

第4章の無次元化時間累積量曲線から、本実験の状態( $K_s$ と最大フロック径 $d_{max}$ )に対応すると思われる図を選び同図上に $Q = 50 \text{ l/min}$ ,  $8 \text{ r.p.m.}$ ,  $10 \text{ r.p.m.}$ の各槽より得られたフロック群の沈降性をプロットしたものが図(6-13)と(6-14)である。このプロットでは初期粒子径 $d_1$ は不明確であり図(6-13), (6-14)のみによって回分と連続流でのフロック群粒度組成の推移を厳密に比較しえない。しかし、図(6-12)で明らかにしたように成長平衡時の分布は回分式と連続流で等しいので、図(6-13)のO点のデータは標準化係数 $K^*$ を用いて補正すると $m = 1.0$ の曲線と一致するはずである。補正のための $K^*$ を求めると約2.7となる。また、成長平衡に達するに要する無次元攪拌継続時間 $Me$ を1.4程度とし、図(4-16)と(4-18)を参照すると $8 \text{ r.p.m.}$ での $S_m$ は $10^6$ 程度と推測される。したがって、 $d_1$ は6μ程度であったことが予想できる。

図(6-13)のプロットを標準化係数 $K^* = 2.7$ として $S_m = 10^6$ の図に書き換えると図(6-15)が得られる。図(6-13), (6-14)の回分式のプロック群分布の遷移過程と図(6-15)のそれとはほぼ等しい傾向を持っている。

以上の点から平均滞留時間を代表的なフロック形成時間にとって $m$ 値を求め、回分式で得られた結果を連続流の場合に用いることが許されるであろう。

## 6-6 連続流フロッキュレーター内での微小粒子群の消滅速度の実測による検証

微小粒子群の消滅速度の実測結果を、横軸に無次元化滞留時間中、縦軸に未吸合微小粒子群濃度 $C$ をとって描いたものが図(6-16)である。図中の補助横軸は流量 $50 \text{ l/min}$ ,  $100 \text{ l/min}$ の場合の各実滞留時間に対応する槽段数を示している。これらの結果から、槽分割数を増す程、フロック形成攪拌強度が強い程、微小粒子群の消滅速度が大きくなることが分かる。

前者の理由については、槽分割数が増すにつれて流れが押し出し流れに近づき短絡流出する未吸合成分が減少することから容易に理解される。

後者の攪拌強度と吸合速度の関係について次に考えてみよう。一般に、微フロック吸合の場合の反応速度係数 $K_c$ は式(6-18)で与えられる。

$$K_c = \frac{9}{\sqrt{15}} \bar{\rho} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu}} V_f \text{-----}(6-18)$$

したがって、吸合反応速度係数は  $\varepsilon_0$  の 0.5 乗に比例して増加するはずである。しかし、実際の測定結果による  $K_c$  と  $\varepsilon_0$  の間には図(6-17)のような関係が見られ、 $K_c$  と  $\varepsilon_0$  の関係は式(6-19)のように表わされる。

$$K_c \propto \varepsilon_0^{0.3 \sim 0.4} \text{-----}(6-19)$$

この事は、攪拌強度が増大するにつれてフロックの成長平衡径が小さくなり、したがって同一質量当りの見かけフロック体積  $V_f$  が減少するために、吸合速度が  $\varepsilon_0$  の 0.5 乗には比例せずそれよりも小さな値である 0.3~0.4 乗に比例する結果を示すものである。

しかし、完全混合槽列と見なすような連続流フロッキュレーターでは式(6-10)で示されたように  $K_c t \gg 1$  の場合を除く一般の場合には、攪拌強度に無関係に一定量の微小粒子の流出があるので回分式操作で現われる程攪拌強度の影響は顕著ではない。

次に、式(6-9)、(6-10)によって微小粒子群の消滅速度を計算によって求めてみよう。

フロック群が成長平衡に達するに充分の攪拌が与えられまっている場合の  $\bar{\rho}$  は  $1/45$  程度であり、この時のフロック体積率  $V_f$  が分かれば式(6-13)の関係から次のようにしてそれ以前の段階での  $\bar{\rho} V_f$  を求めることができる。

$$\frac{(\bar{\rho} V_f)_{T^*}}{(\bar{\rho} V_f)_t} = \frac{(\bar{\rho} V_f)_{m_e}}{(\bar{\rho} V_f)_m} = \left(\frac{T^*}{t}\right)^{-0.6} = \left(\frac{m_e}{m}\right)^{-0.6}$$

故に、

$$\text{-----}(6-20)$$

$$\begin{aligned} (\bar{\rho} V_f)_t &= (\bar{\rho} V_f)_{T^*} \left(\frac{T^*}{t}\right)^{0.6} \div \frac{1}{45} V_f^* \left(\frac{T^*}{t}\right)^{0.6} \\ &= \frac{1}{45} V_f^* \left(\frac{m_e}{m}\right)^{0.6} \text{-----}(6-21) \end{aligned}$$

式(6-21)によって各々の段階での  $(\bar{\rho} V_f)$  を知り、式(6-11)を用いて吸合反応速度係数  $K_c$  を算定するためには、成長平衡時のフロック体積率  $V_f^*$  とそこに至るに要するフ

フロック形成時間 ( $T^*$  または  $m_e$ ) を求め求める。次いで考え  
える段数に至るまでの平均滞留時間  $t$  との比 ( $t/T^*$ ) を知り  
式 (6-21) を用いて  $(\bar{p}V_f)t$  を計算する。

計算の例を  $Q = 50 \text{ l/min}$ ,  $8 \text{ r.p.m.}$  の場合について示す  
と次のようになる。

この実験条件でのフロックの最大成長度は前節で述べた  
ようにほぼ  $10^6$  と考えて良いので、図 (4-19) によって成  
長平衡分布に達するに要する無次元攪拌継続時間 (フロッ  
ク形成時間)  $m_e$  を求めると  $m_e \approx 1.3$  となる。また、 $V_f^*$   
は図 (6-12) の分布を求めた時のフロック体積率  $0.5\%$  を用  
いる。次に、この実験における、 $E_0 = 1.9 \times 10^{-1} \text{ erg/cm}^3 \cdot \text{sec}$ ,  
 $\mu = 1.35 \times 10^{-2} \text{ poise}$ ,  $t_1 = t_2 = t_3 = t_4 = 520 \text{ sec}$  と云った  
諸数値を用いて各段の  $m$  値を計算する。

$m_e$ ,  $m$ ,  $V_f^*$  が決定されると、式 (6-21) からその段  
での  $(\bar{p}V_f)$  が求められ、式 (3-39) によって  $K_c$  を算出し  
式 (6-10) によって第  $i$  段から流出して行く微小粒子群の  
濃度  $C_i$  を求めることができる。

以上のようにして計算した結果、 $K_{c1} = 2.1 \times 10^{-3}$ ,  $K_{c2}$   
 $= 1.3 \times 10^{-3}$ ,  $K_{c3} = 1.1 \times 10^{-3}$ ,  $K_{c4} = 9.3 \times 10^{-4}$  となった。  
したがって、各段から未吸合のより次段に流出する微小粒  
子の濃度は、 $C_1/C_0 = 1/2.10$ ,  $C_1 = 50/2.10 = 24 \text{ ppm}$ , 同様に  
して  $C_2 = 14.2 \text{ ppm}$ ,  $C_3 = 9.1 \text{ ppm}$ ,  $C_4 = 6.1 \text{ ppm}$  と計算され  
た。10 r.p.m. についても同様の計算を行ない、それらの  
結果を図示したものが図 (6-16) の○印である。

成長平衡分布時のフロック体積率  $V_f^*$  は図 (6-12) から  
次のようにして求めることができる。図 (6-12) の回分式  
のデータを粒度分布ヒストグラムにしたのが図 (4-7) で  
ある。この時の初期粒子条件は  $d_1 = 75 \mu$ ,  $n_0 = 5000 \text{ 個/cm}^3$   
であり、フロック群の平均径 (累加体積が  $50\%$  を占める  
フロック径) は  $450 \mu$  程度である。  $450 \mu$  のフロック内に  
含まれる  $d_1$  粒子の数  $i$  は式 (3-26) より、

$$i \frac{1}{3 - K_s} = \frac{d_i}{d_1} = \frac{450}{75}$$

$K_s = 1.25$  であるから  $i = 25$ , したがって単位体積中の  
 $450 \mu$  のフロックの数は、

$$\frac{n_0}{i} = \frac{5000}{25} = 200 \text{ 個/cm}^3$$

そこで、

$$V_f^* = \frac{\pi}{6} (4.5 \times 10^{-2})^3 \times 200 \div 0.8\%$$

となる。すべての初期粒子がフロック化されるわけではなく、いので、実測される  $V_f^*$  は 0.8% よりも少ないはずである。同一条件での回分式から得られた実測の  $V_f^*$  は 0.6% 程度であり、本実験で用いたような縦方向混合のあるフロッキュレーターでは、流れに束まってフロック化されずに流出して行く初期粒子がかなりの量 (10% 程度) となるので  $V_f^*$  の値が 0.5% 程度となったのであろうと推察される。

## 6-7 まとめ

本章では、急速ろ過システムの理論的な扱いの中でフロッキュレーターのはたしうる役割を明確にするためにフロック形成過程を、①沈殿池負荷と考えられる部分への寄与と②ろ過池負荷と考えられる部分への寄与に分割して考えた。前者については前章までのフロック形成理論の直接的な適用の可能性を確認し、後者については接触フロック吸合の考え方を導入し、関与する諸条件をフロック形成理論との関係で合理的に定め、流れの状態との合成によって連続流の実装置に直ちに適用しうる形で体系化した。

このような取扱いを行なうことによって、従来は後続の沈殿池、ろ過池と密接に関連しなから一連のプロセスとして評価しえず、したがって理論的な合成を行ないえなかった急速ろ過システムの扱いを一步進めることができたと考えられている。

次に、連続流フロッキュレーターでのフロック形成を考えるに当たって本章で明らかにした諸事項について略述する。先ず、トレーサーとして食塩を用いた白金電極でその濃度変化を測定して、実フロッキュレーターの流況の把握を行なった。その結果、 $Pe = 10^{-1} \sim 10^0$  と云った範囲では攪拌強度の混合特性に対する影響は見られなかった。また、この範囲では使用したフロッキュレーターは完全混合直列槽として取扱うことができてゐることも明らかにした。

完全混合型の攪拌槽が数段程度直列に配置されて構成されてゐるフロッキュレーター内でのフロック形成は、微小粒子群が既存の大形フロックに吸合フロック化されて行く現象と、フロック同志が合してより大形のフロックへと成長して行く現象に分けて論ずることも可能である。

沈殿池で除去される主要部分となるフロックの成長過程は、フロック個数濃度に関する不均一二次反応であるから、

多少の滞留時間分布があつてもその影響はフロック濃度の影響に比して微少なものとなる。したがつて、3~5段程度に仕切られ連続流フロッキュレーターから流出してくる沈殿除去の対象となる大きさに迄成長してゐるフロック群は、1槽当りの滞留時間が極端に短い場合を除くと回分式で得られるフロック分布と大略一致するはずである。このことは実測によつて確認された。

一方、微小粒子の大形フロックへの吸合フロック化による消滅は、既成のフロックとの相互作用を持ったフロック形成として論ずる必要がある。既成の大形フロックへの微小粒子の吸合反応は均一一次反応であるから、未吸合成分の濃度  $C$  は滞留時間分布のある場合によつても流れの特性と反応とを合成することができ次式の形で示される。

$$\frac{C}{C_0} = \int_0^{\infty} e^{-K_c t \phi} \cdot E(\phi) d\phi \text{ ----- (6-9)}$$

ここで、 $C$  : 反応時間  $t$  で残存する微小粒子濃度、 $C_0$  :  $t = 0$  で存在した微小粒子濃度、 $K_c$  : 吸合反応速度係数 (1/sec)  
 $t$  : 反応時間 (sec)、 $\phi$  : 無次元化平均滞留時間 (槽列全体の滞留時間基準)、 $E(\phi)$  : 装置内の滞留時間分布関数。

完全混合槽列の場合は、 $E(\phi)$  は次式で与えられる。

$$E(\phi) = j^j \phi^{j-1} \exp(-j\phi) / (j-1)! \text{ ----- (6-7)}$$

ここで、 $j$  : 槽段数

式 (6-9) と (6-7) から第  $j$  段からの流出水中の微小粒子濃度  $C_j$  は、

$$C_j = \frac{C_0}{(1 + K_{c1} t_1)(1 + K_{c2} t_2) \cdots (1 + K_{cj} t_j)} \text{ ----- (6-10)}$$

ここで、 $t_j$  : 第  $j$  段の平均滞留時間 (sec)、 $K_{cj}$  : 第  $j$  段の吸合反応速度係数で次式で表わされる。

$$K_{cj} = \frac{9}{\sqrt{15}} \bar{P}_j \sqrt{\frac{E_0}{\mu}} V_{fj} \text{ ----- (3-39')}$$

そこで、式(3-39')にあって  $K_{cf}$  を算定すれば、式(6-10)を用いてフロッキエーターから流出して行く未吸合微小粒子濃度を知らることができる。

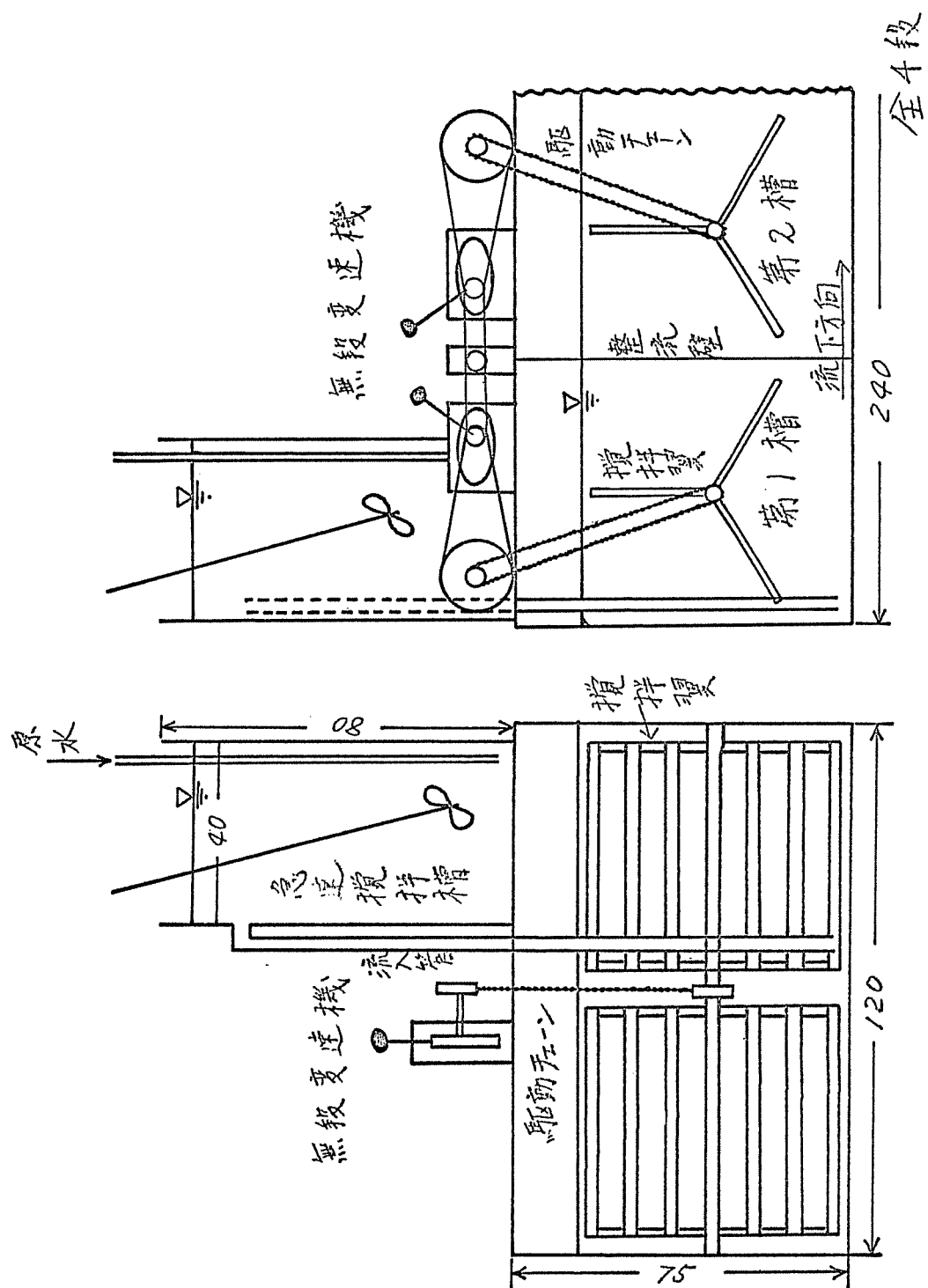
フロック体積率  $V_f$  とその時のフロック群の平均的衝突合-確率  $\bar{P}$  は式(6-13')で示される関係にあることが実験によって示された。

$$\bar{P} V_f \div K_1 \left( \frac{t}{T^*} \right)^{-0.6} = K_1 \left( \frac{m}{m_c} \right)^{-0.6} \text{-----} (6-13'')$$

$$K_1 \div \frac{1}{45} V_f^*$$

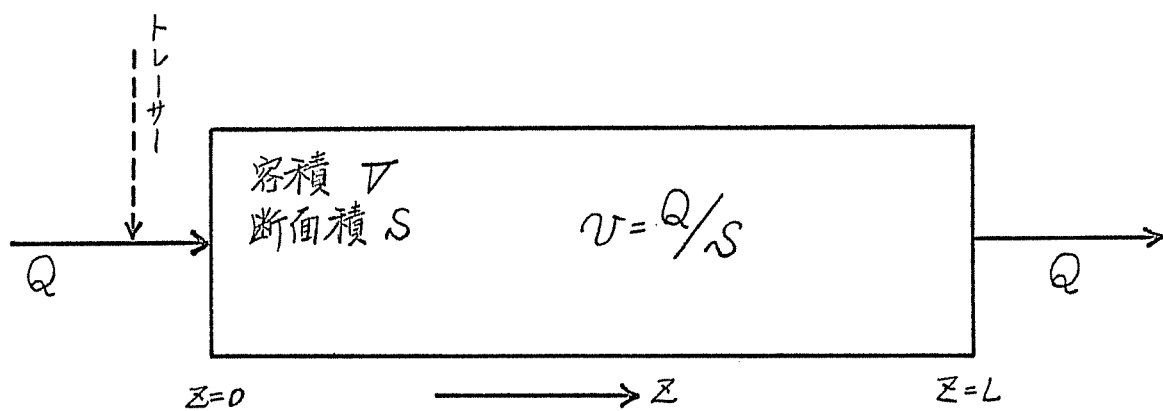
したがって、式(3-39')の運用に当っては  $\bar{P} V_f$  の作用を一括して計算を行なうことができる。

上述の方法によって計算した  $C_j$  と実測した  $C_j$  は良く一致しており、提示したモデルの健全さを実証できた。

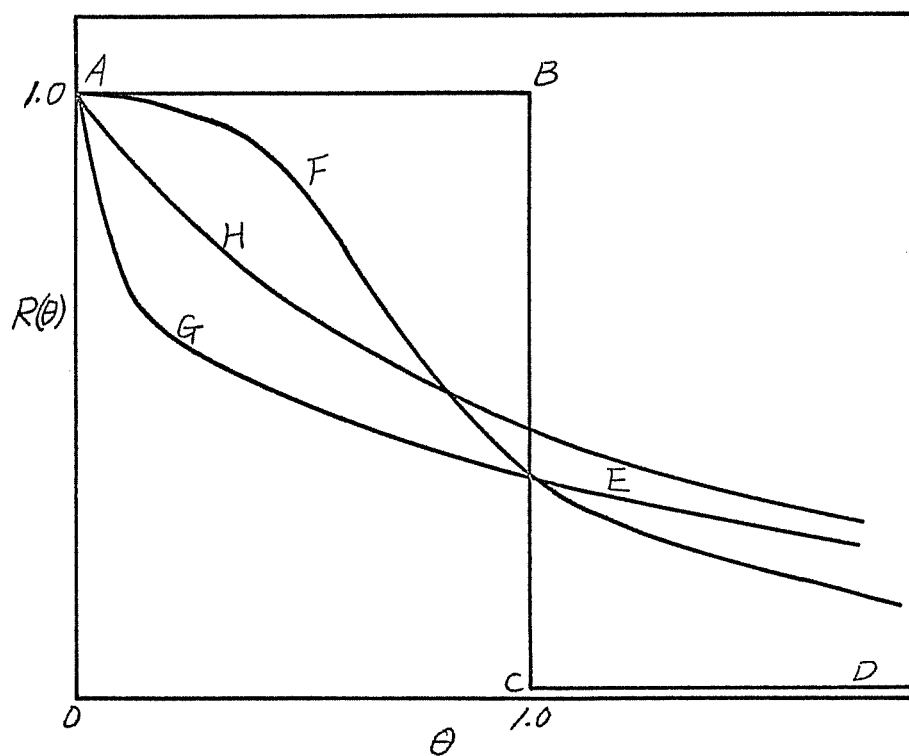


(単位: cm)

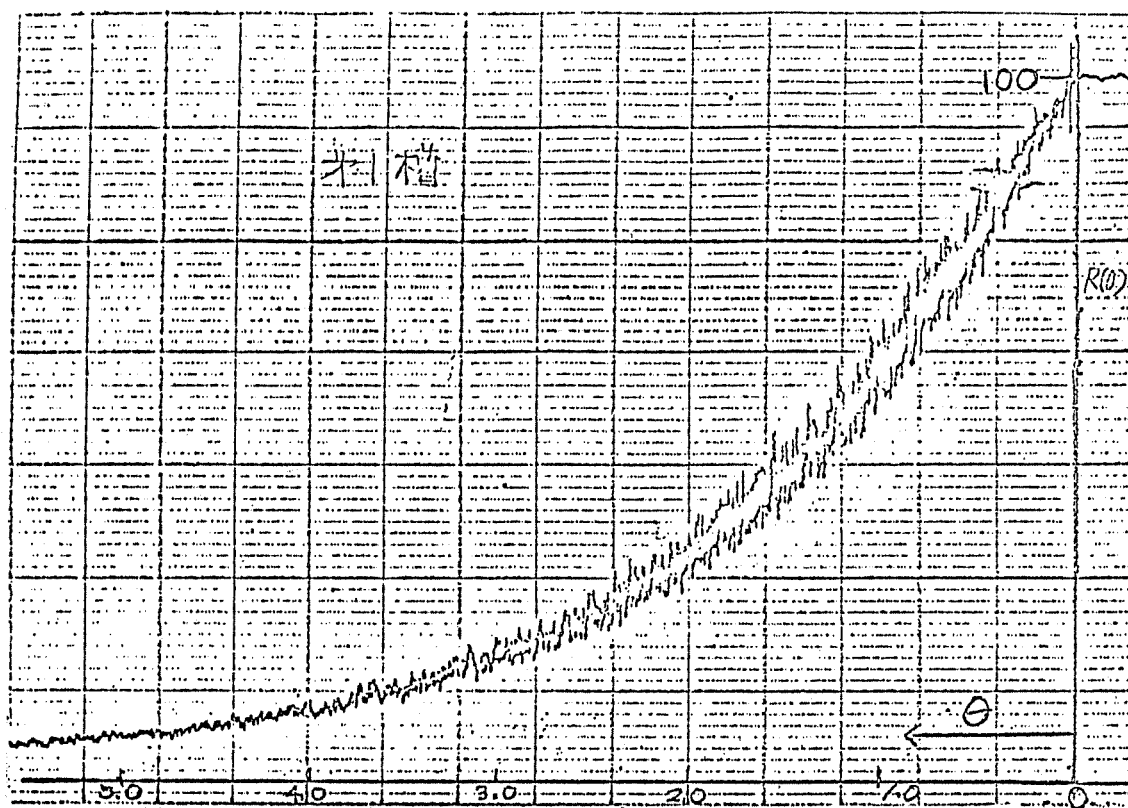
図(6-1) 連続流回転エレベーター



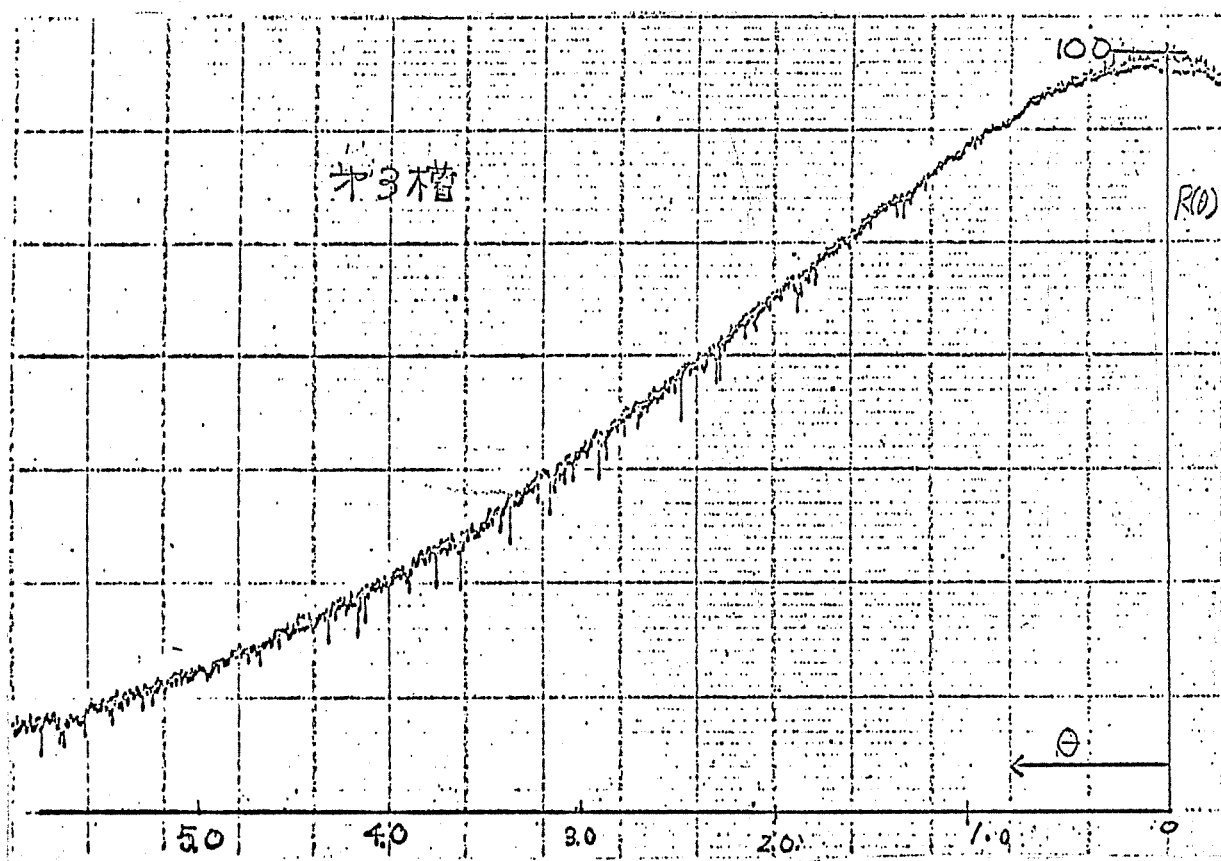
図(6-2) 流れモデル



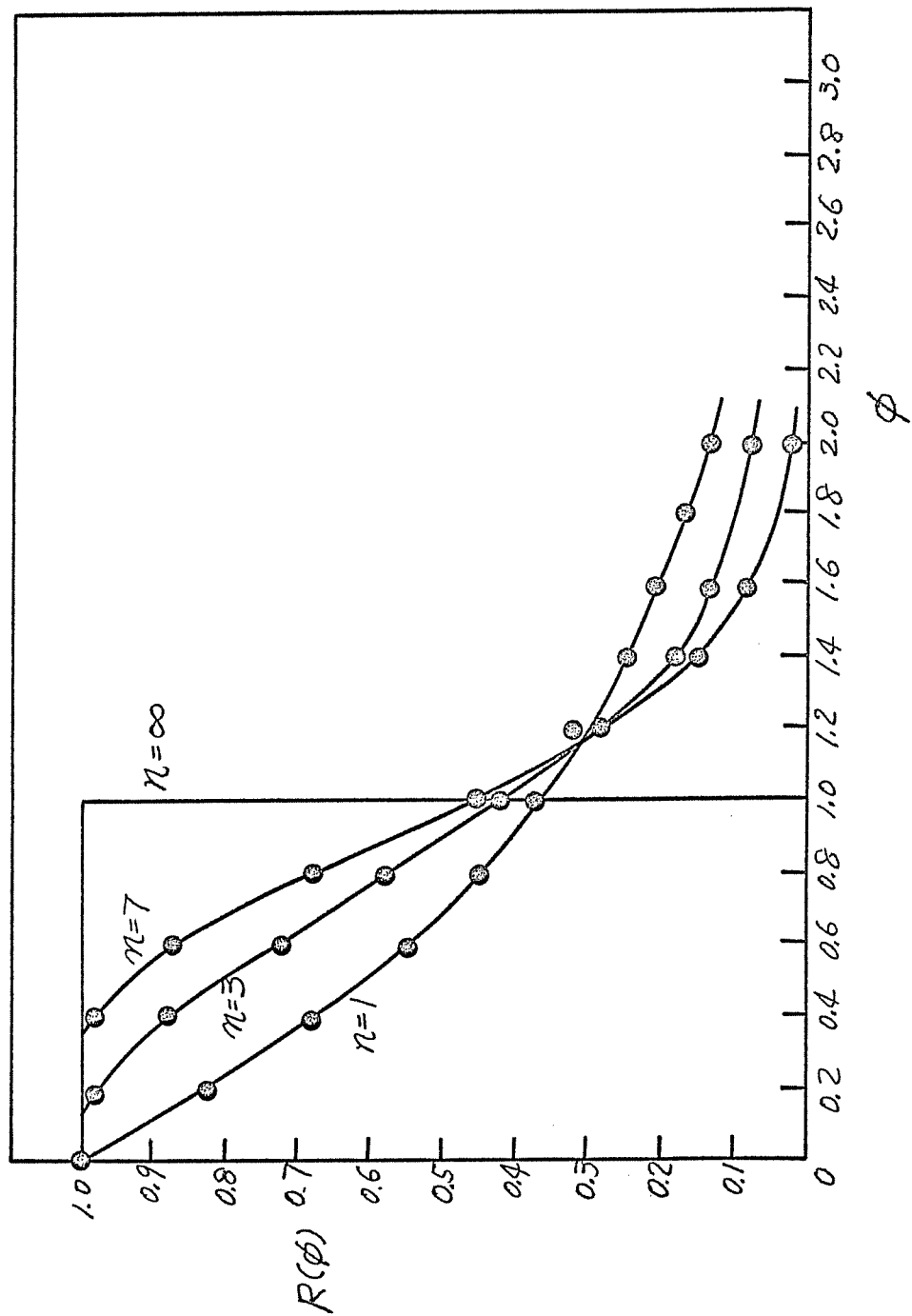
図(6-3) 単独槽の残余濃度曲線の模式図



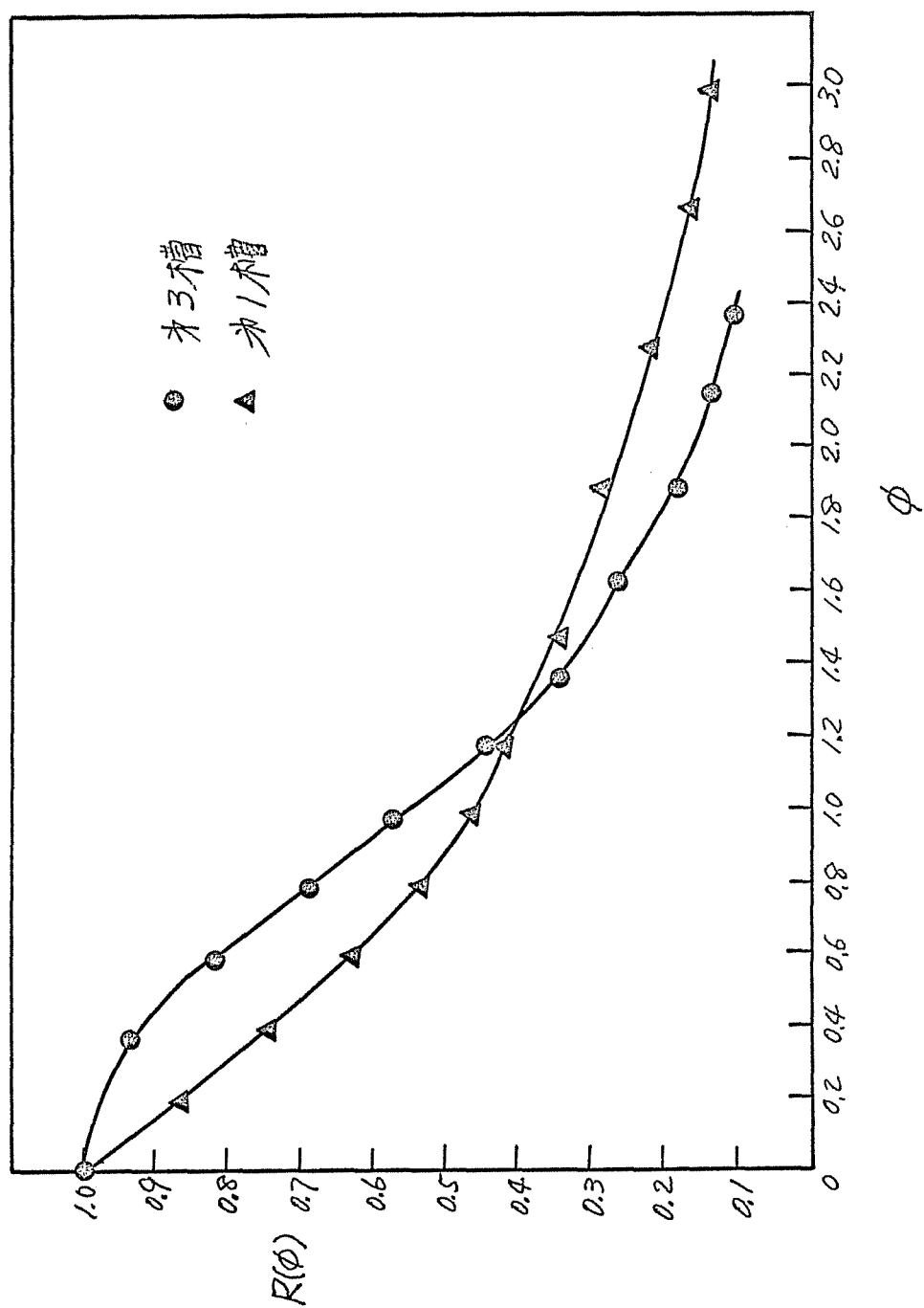
図(6-4) 突フロッキュレーターの残余濃度曲線



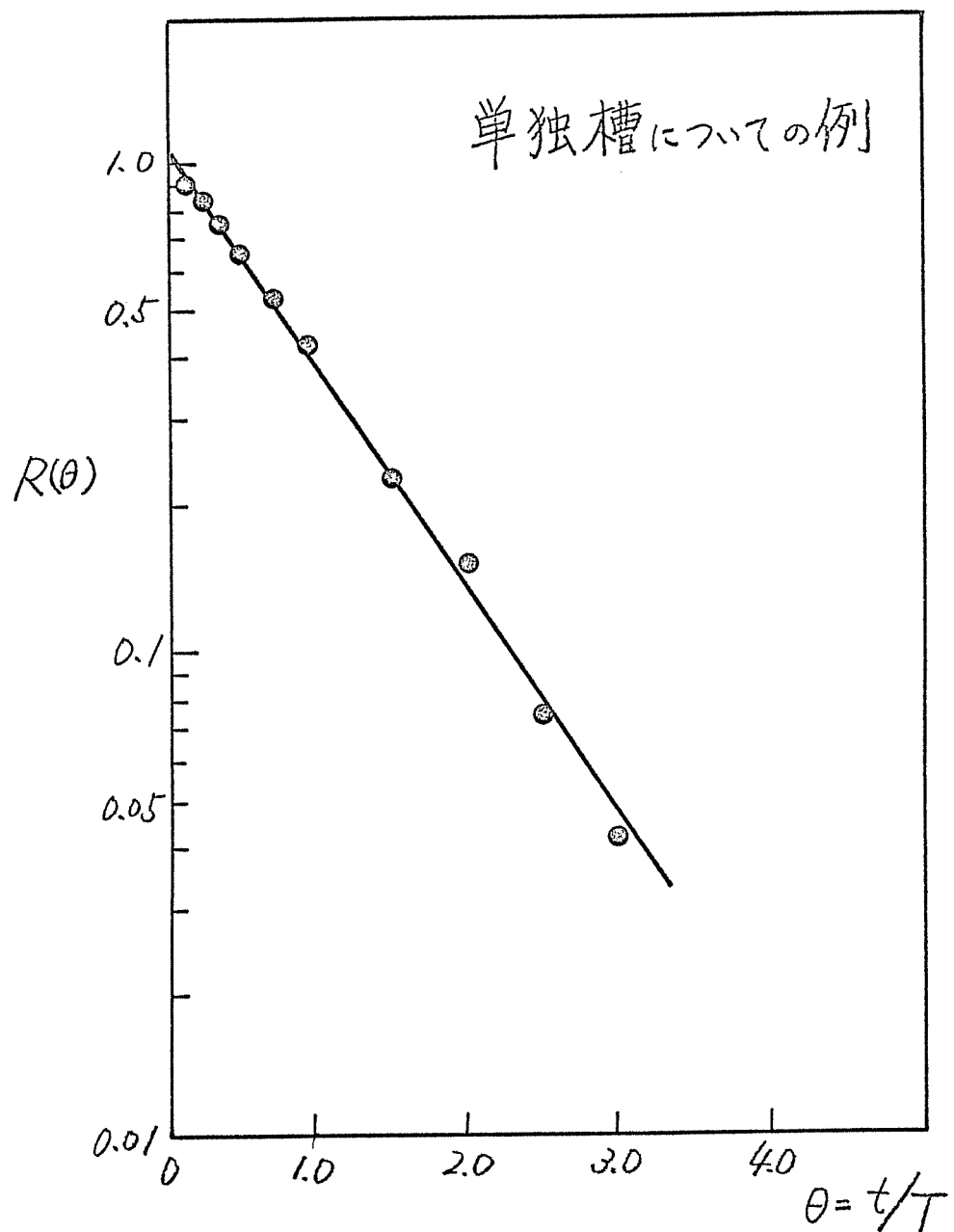
図(6-5) 突フロッキュレーターの残余濃度曲線



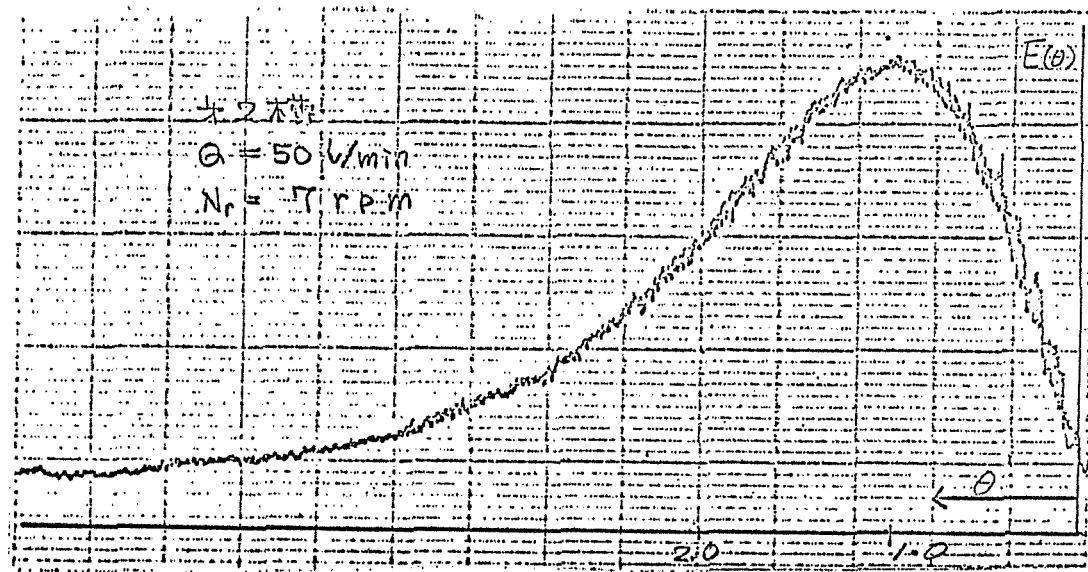
図(6-6) 直列完全混合槽列の  $R(\phi)$



図(6-7) 標準化した実験の残余濃度曲線

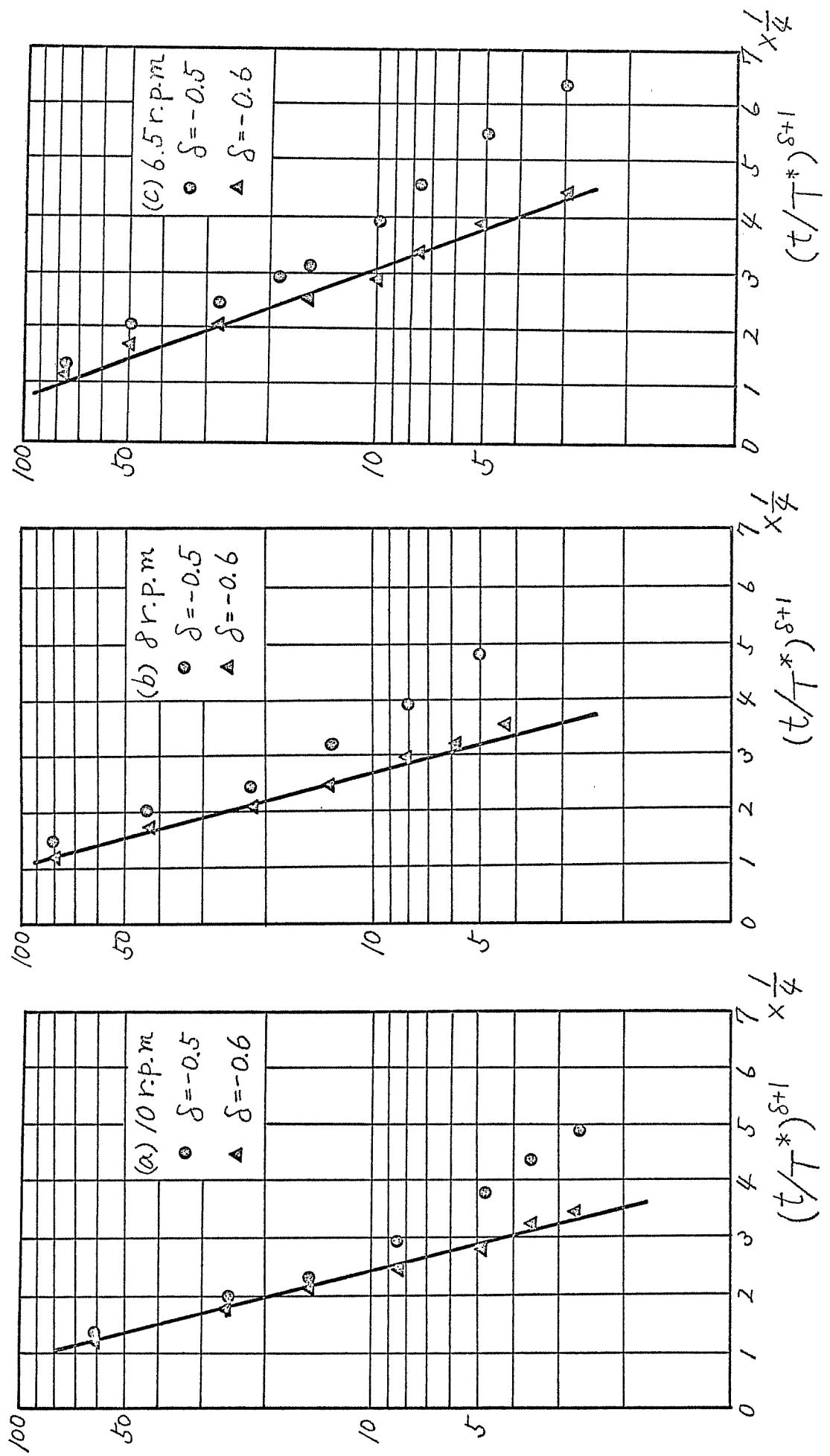


図(6-8) Argaman による残余濃度曲線

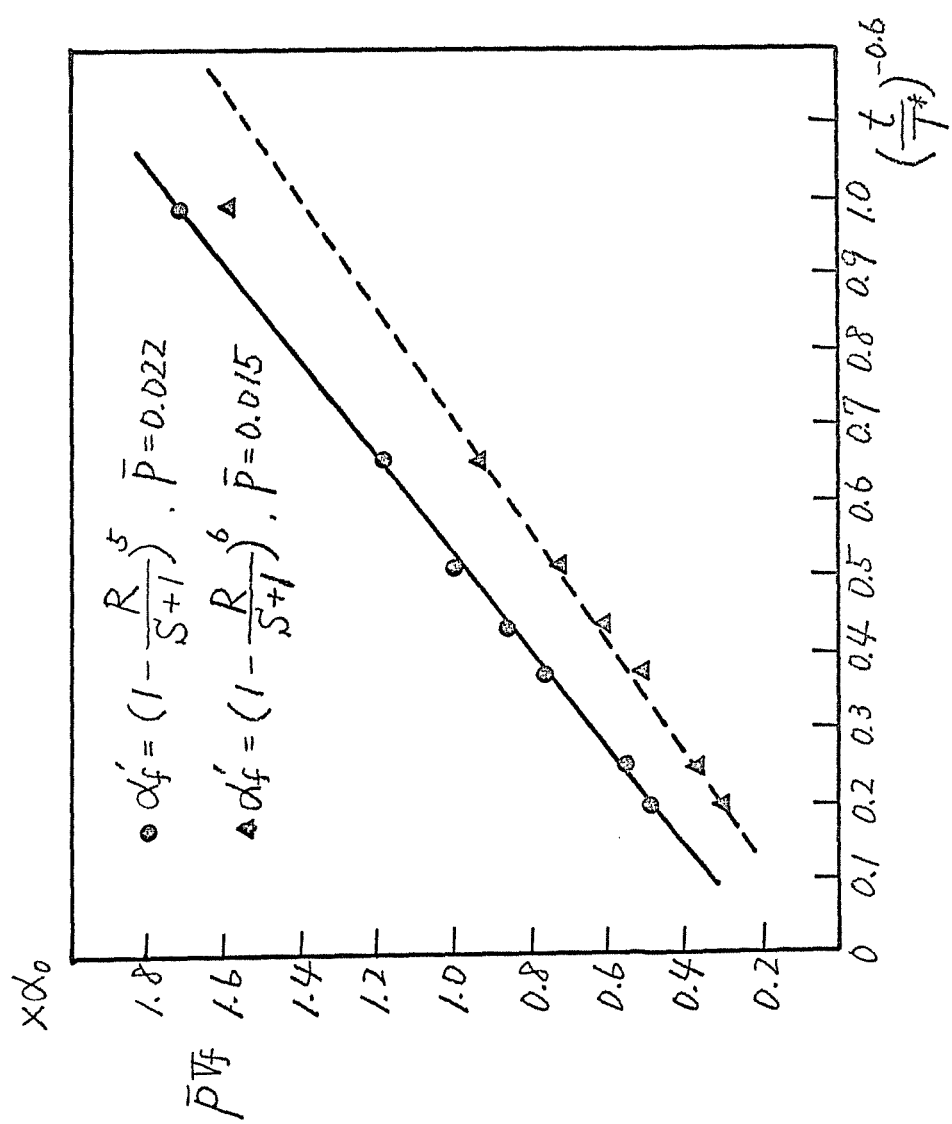


図(6-9) 実フロッキュレーターの滞留時間  
 分布曲線

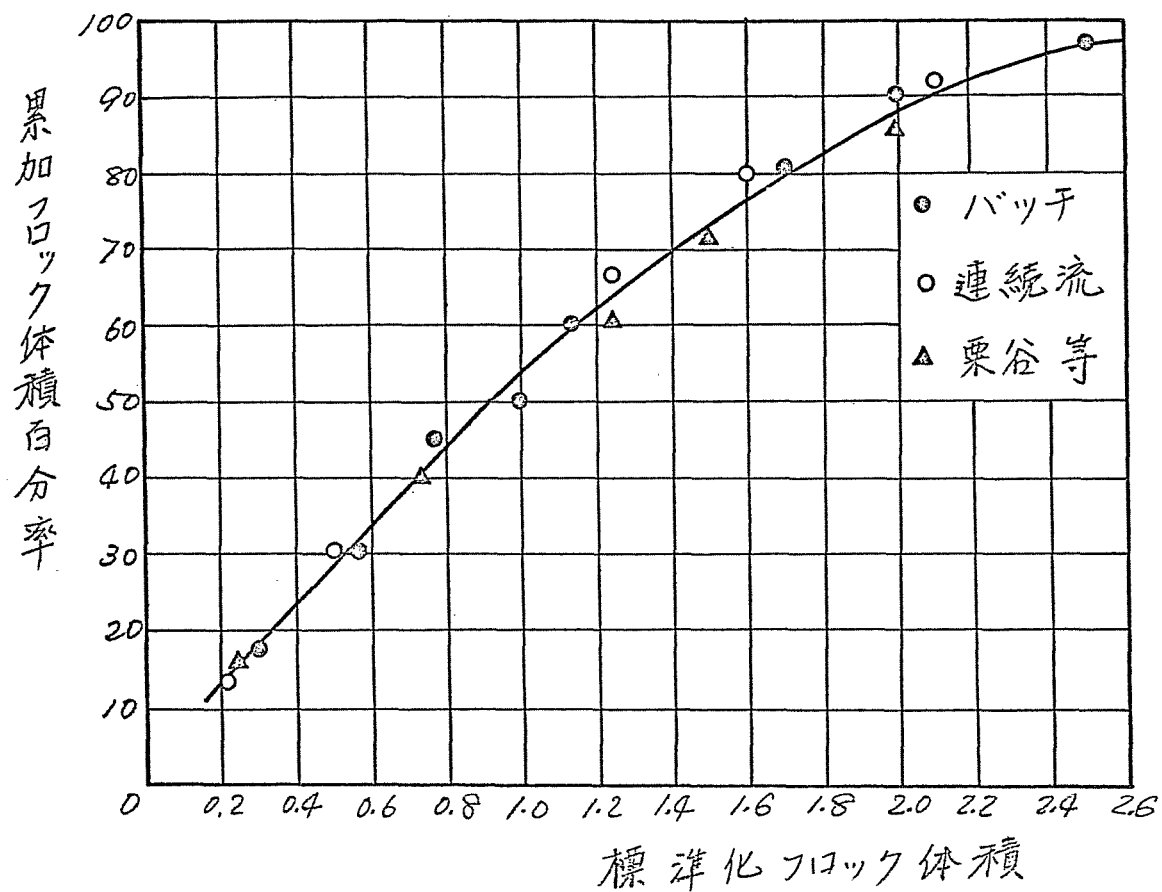
無次元化残留濁度



図(6-10) 残留濁度とフロック形成時間の関係

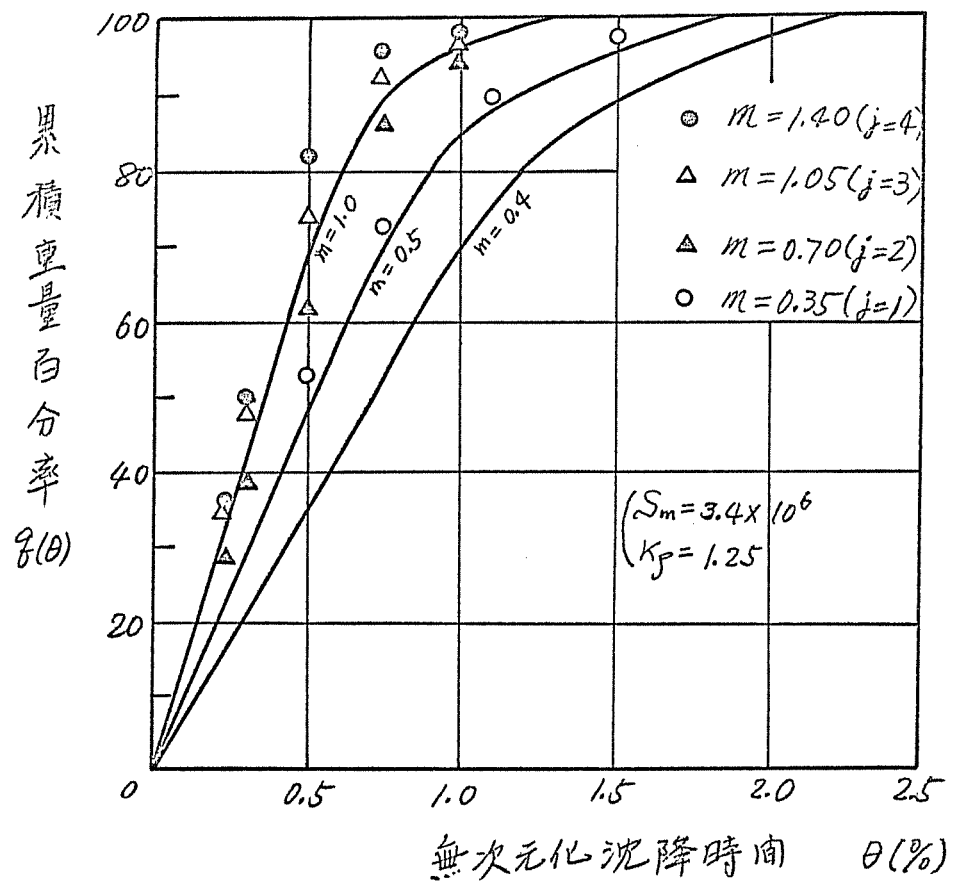


図(6-11) フロッツ形成時間と  $\bar{p} V_f$  の関係 (数値解)

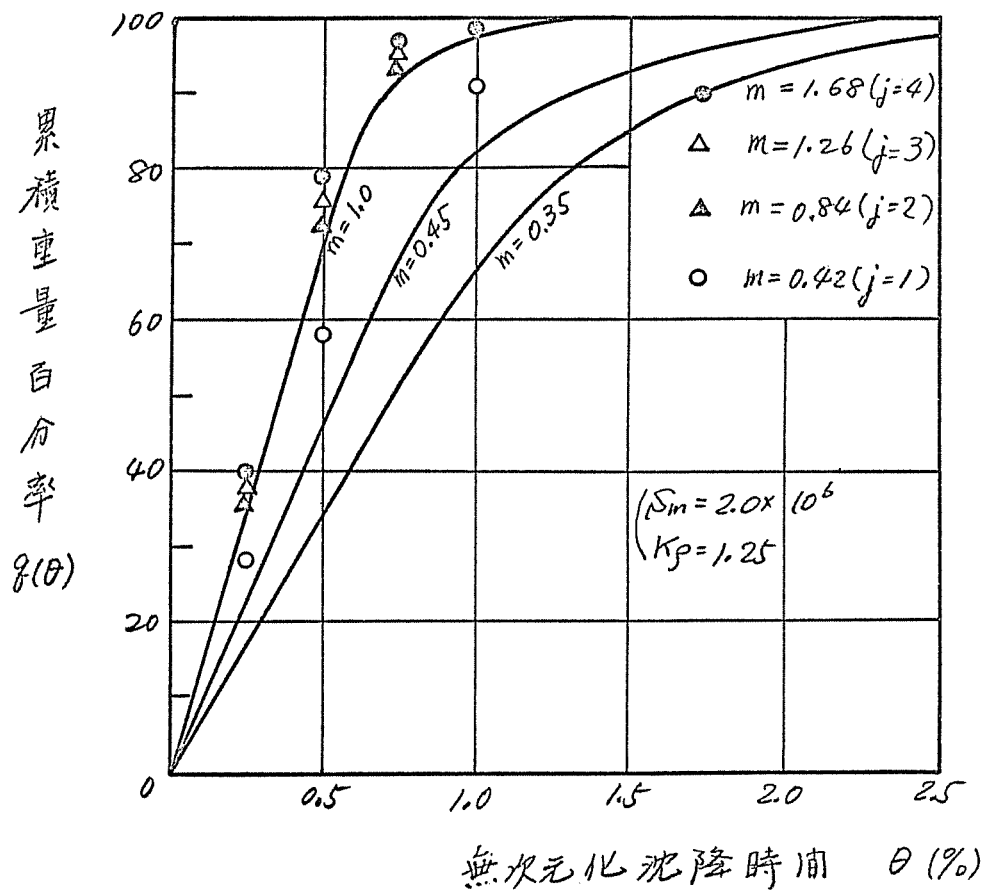


累加フロック体積が  
50%を示すフロック  
体積を1とした。

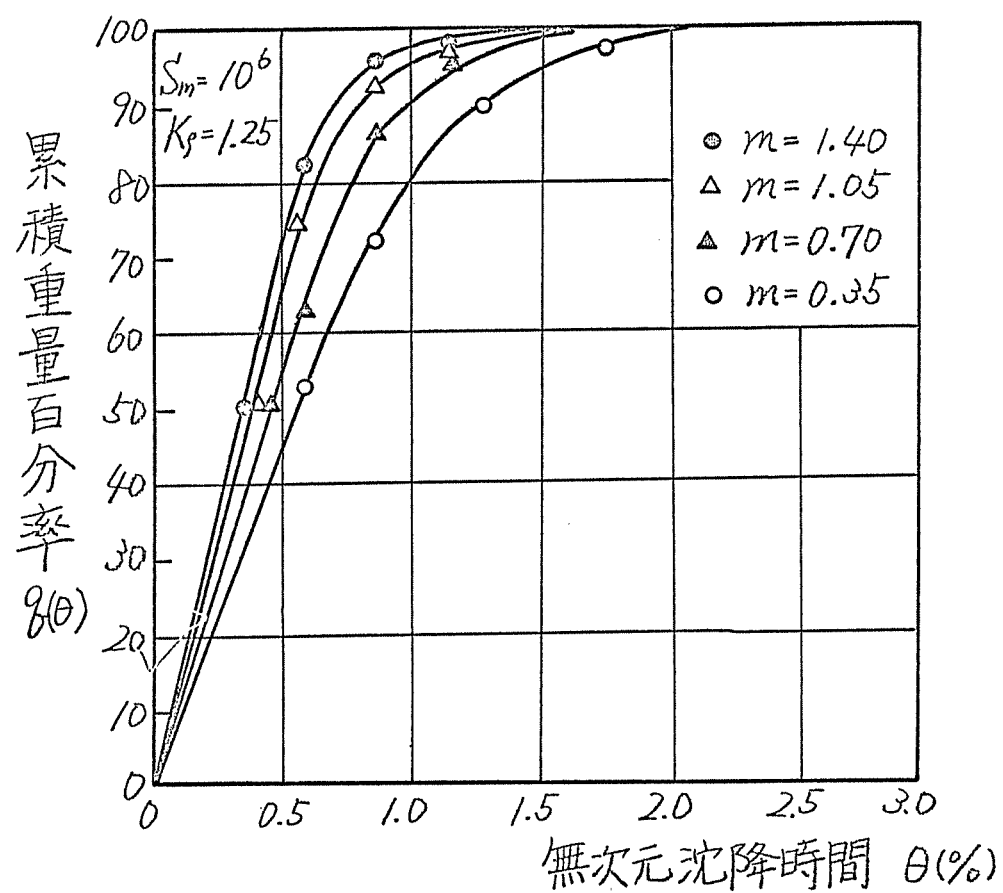
図(6-12) 最大成長平衡時におけるフロック群粒度分布



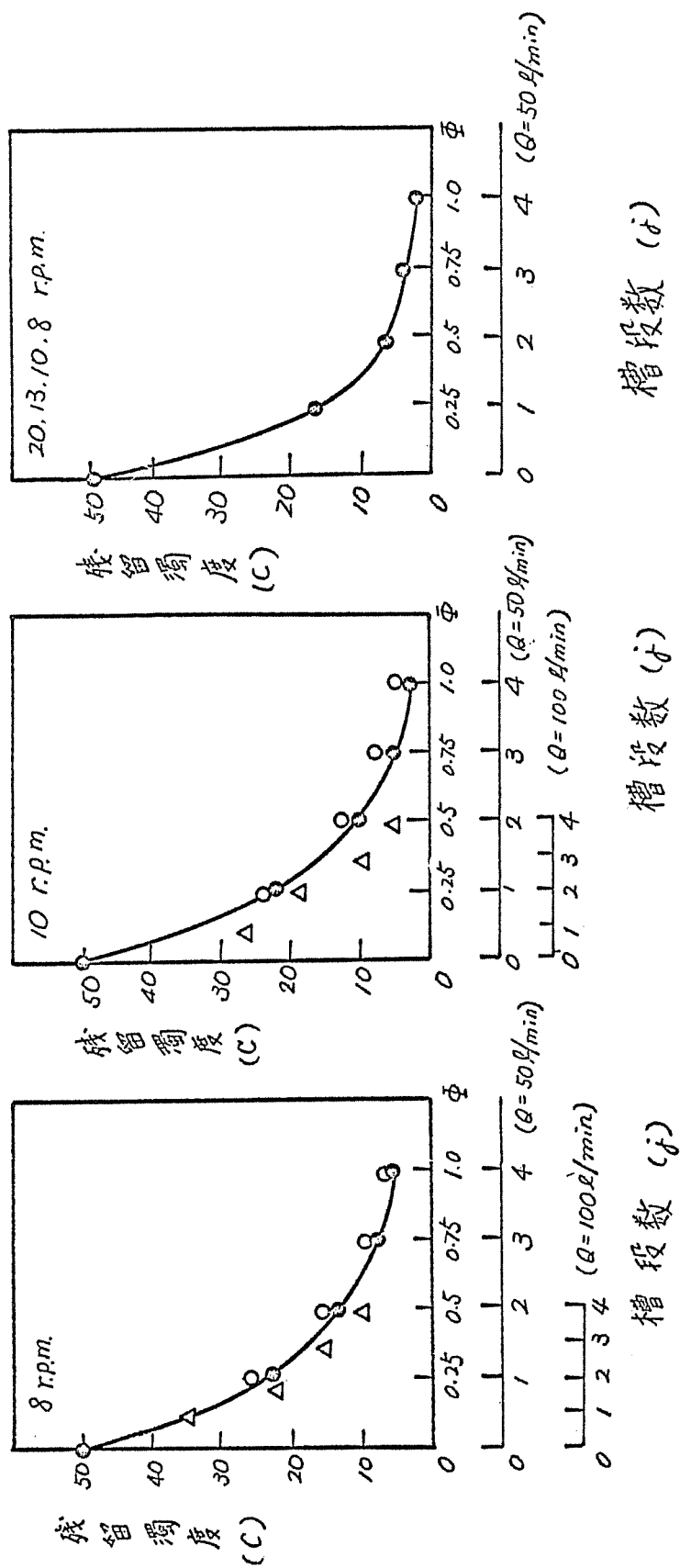
圖(6-13) 無次元化時間沈降量曲線 ( $S_m = 3.4 \times 10^6$ )



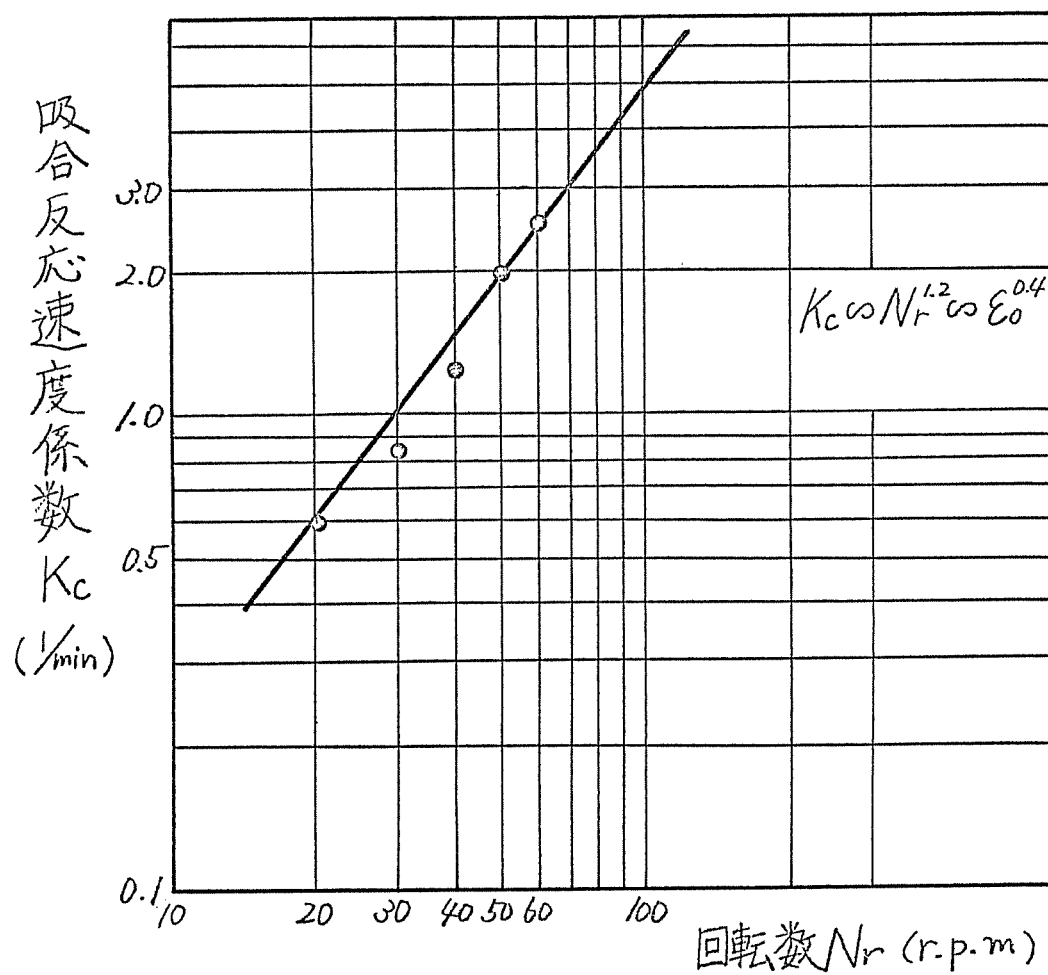
圖(6-14) 無次元化時間沈降量曲線 ( $S_m = 2.0 \times 10^6$ )



圖(6-15) 無次元化時間累積量曲線 ( $S_m = 10^6$ )



図(6-16) 連続流70キレターでの微小粒子群の消滅



図(6-17) 攪拌強度と反応速度係数の関係

## 参考文献 (第6章)

- 1) 例えば, 宮内照勝, 流系操作と混合特性, 続・新化学工学講座 14, 日刊工業新聞社, 1960. 8, p. 4 ~ 9
- 2) Argaman, Y., Turbulence in Orthokinetic Flocculation, Univ. of California, Barkeley, PhD thesis, Sanitary and Municipal Engineering, 1968
- 3) 丹保憲仁, フロック形成過程の基礎的研究(Ⅲ), 水道協会雑誌 382号, 昭41. 7, p. 9 ~ 21
- 4) Hudson, H.E. Jr., Physical Aspect of Flocculation, J.A.W. W.A., 1965. 7, p. 885 ~ 892
- 5) 角田省吾, 凝集かくはん槽の研究(I), 水道協会雑誌 408号, 昭. 43. 9, p. 22 ~ 30
- 6) 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の粒度分布について, 第24回土木学会年次学術講演会講演概要, 昭. 44. 10, p. 347 ~ 350
- 7) 穂積 準, 接触高速凝集沈殿池に関する研究, 北海道大学工学博士學位請求論文, 1969. 12

注) 本章の一部はすでに下記の論文に発表済みである。

丹保・渡辺, フロッキエーターの合理的設計(Ⅳ)  
水道協会雑誌投稿中

## 第7章 総括

### 7-1 結果の要約

本論において、急速ろ過システムの重要な単位操作であるフロック形成に関する理論的検討と理論に沿った実験を行ない、フロック形成プロセスの設計に汎用しうる無次元標準化した形のフロック形成操作図表を提示した。

本研究によって明らかにされた結果は次の諸点に要約される。

(1) フロック形成操作によって生成されるフロック粒子の直径とその実密度から水の密度を差し引いたフロックの有効密度との間には、式(2-6)で示されるフロック密度関数が成立する。

$$\rho_e = \rho_f - \rho_w = \frac{a}{(ds)^{K_f}} \text{-----} (2-6)$$

ここで、 $ds$ : フロック粒子の直径 (cm),  $\rho_e$ : フロックの有効密度 ( $g/cm^3$ ),  $\rho_f$ : フロックの実密度 ( $g/cm^3$ ),  $\rho_w$ : 水の密度 ( $g/cm^3$ ),  $a$ : 凝集条件によって決まる定数 ( $g/cm^3$ ),  $K_f$ : 凝集条件によって決まる指数 (無次元)。

[解説] フロックは原水中に浮遊していたけん濁質と添加された凝集剤が結合したものが架状にからみ合い、その空隙に多量の水を含んだ非常に小さい粒子であり径の増加に伴ってその空隙率は増大して行く。したがって、フロックが大形化するにつれてその密度は減少する。

フロックの静水中での単粒子沈降速度  $w$  と実測したフロックの一方径に形状補正係数 0.965 をかけて正八面体と仮定した等価球の直径  $ds$  を求め、式(2-5)によってフロックの密度を推算した。

$$w = \frac{g}{34\mu} (\rho_f - \rho_w) ds^2 \text{-----} (2-5)$$

その結果、フロックの有効密度とその等価球換算径  $ds$  との間には式(2-6)で示される関数関係が成立した。この関数式を本論ではフロック密度関数と名付けた。

フロック密度関数の指数  $K_f$  と係数  $a$  によって種々の条

件で白陶土をアルミニウムで凝集させた場合のフロックの密度を評価し次のような結論を得た。

$\alpha \cdot K_F$  したがってフロック密度は凝集の際の  $pH$ 、水質、フロック形成攪拌強度には実用の範囲では影響を受けない。アルミニウム注入率に対する白陶土濃度の比を  $A/L$  比と定義すると、 $\alpha \cdot K_F$  は  $A/L$  比によつてその値が変化する。したがって、 $A/L$  比がフロック密度を規定する因子である。 $A/L$  比と  $\alpha \cdot K_F$  の関係を示すものが図(2-20)である。

(2) 電子計算機を用いてシミュレートしたモデルフロックの構造を検討して、フロックの見かけの直径とその中に含まれる初期粒子数との間に式(2-22)で示される関係が成立することを明らかにし、実験的に求められたフロック密度関数の内容を示した。

$$i = \left( \frac{d_i}{d_1} \right)^{2.1} \text{-----} (2-22)$$

ここで、 $i$  : フロック内に含まれる初期粒子数、 $d_i$  : フロックの見かけの直径、 $d_1$  : 初期粒子の直径。

[解説] フロックが衝突合一して成長して行く過程はランダム現象として扱う。そこで、乱数を用いてフロックが形成されて行く過程のシミュレーションを行ない生成されたモデルフロックの構造を検討し、式(2-22)の関係を見出した。式(2-22)を用いると、実験的に求められたフロック密度関数を次の様にして誘導することができる。

フロック構造体を構成してゐる部分は次の二つに大別される。①固形物で形成されてゐる実質部分、②水のみが存在してゐる空隙部分。フロックの体積と質量をそれぞれ式(2-12)と(2-13)で表ゆし、 $i$ 倍粒子の有効密度を  $\rho_{ei} = \rho_i - \rho_w$  とおくと式(2-15)の関係が得られる。

$$\frac{\pi}{6} d_i^3 = \frac{\pi}{6} d_1^3 i + V_w \text{-----} (2-12)$$

$$\frac{\pi}{6} d_i^3 (\rho_{ei} + \rho_w) = \frac{\pi}{6} d_1^3 i (\rho_{e1} + \rho_w) + V_w \rho_w$$

----- (2-13)

$$\rho_{ei} = i(\rho_s - \rho_w) / (d_i/d_1)^3 \text{ ----- (2-15)}$$

式(2-15)の中の $i$ と $(d_i/d_1)$ は式(2-22)のような関係にあるので、結局式(2-15)は次式のようになる。

$$\rho_{ei} = (\rho_s - \rho_w) d_1^{0.9} d_i^{-0.9} = K' d_i^{-0.9} \text{ ----- (2-23)}$$

式(2-23)はフロック密度関数と同形のものである。

(3) 過大成長フロックの破壊とフロック径の増加に伴うフロック密度の減少を考慮した場合のフロック形成基本式を式(3-29)のような無次元式で与えた。

$$\begin{aligned} \frac{dNR}{dm} = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{R-1} \left( i \frac{1}{j-K_S} + (R-i) \frac{1}{j-K_S} \right)^3 N_i N_{R-i} \\ & - \sum_{i=1}^{S-R} \left( i \frac{1}{j-K_S} + R \frac{1}{j-K_S} \right)^3 N_i N_R \text{ ----- (3-29)} \end{aligned}$$

ここで、 $i, R$  : フロックへの初期粒子集合数,  $N_i, N_R$  :  $i, R$ 倍粒子の無次元個数濃度,  $S$  : 最大成長粒子への初期粒子集合数,  $K_S$  : フロック密度関数の指数。

[解説] 局所等方性乱流理論に基づき、粘性領域内のマイクロスケールの拡散が律速となる乱流拡散によってフロッキュレーター内でのフロックの衝突合—現象が進行すると考える。さらに、フロック形成を論ずる際のフロックの大きさをその中に含まれる初期粒子数で表示する。例えば、初期粒子を $i, j, R$ 個含むフロックを $i, j, R$ 倍粒子と定義する。

衝突合—によってフロックの体積が一定に保たれる場合の、 $i$ 倍粒子の直径 $d_i$ とその中に含まれる初期粒子数 $i$ は次式で示される関係にある。

$$d_i = i^{\frac{1}{3}} d_1 \text{ ----- (3-43)}$$

そこで、 $i$ 倍粒子と $j$ 倍粒子が衝突する場合の衝突半径 $R_{ij}$ は式(3-44)のようになる。

$$R_{ij} = \frac{1}{2}(d_i + d_j) = \frac{1}{2} d_1 (i^{\frac{1}{3}} + j^{\frac{1}{3}})^3 \text{-----} (3-44)$$

しかし，フロックが成長するにつれて空隙率が増加しその密度を減じて行く。この関係を示すものが式(2-6)のフロック密度関数である。フロックが式(2-6)の関係を満足する程度にまで成長している場合には  $i$  と  $d_i$  の関係は，

$$d_i = i^{\frac{1}{3-K_S}} d_1 \text{-----} (3-26)$$

そこで， $i$ ， $j$  倍粒子の衝突半径  $R_{ij}^*$  は，

$$R_{ij}^* = \frac{1}{2} d_1 (i^{\frac{1}{3-K_S}} + j^{\frac{1}{3-K_S}}) \text{-----} (3-27)$$

$i$  倍粒子と  $j$  倍粒子の衝突合—によって生ずる  $R$  倍粒子 ( $R = i + j$ ) の増加と，他の粒子との衝突合—によって  $R$  倍粒子でなくなるものを総計し，さうに，一定攪拌強度下ではある大きさ以上のフロックは存在しえないと云った状況を加味すると， $R$  倍粒子の単位体積中の個数  $n_R$  の消長は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{dn_R}{dt} &= \frac{1}{2} A \sum_{i=1}^{R-1} \left( i^{\frac{1}{3-K_S}} + (R-i)^{\frac{1}{3-K_S}} \right)^3 n_i n_{R-i} \\ &\quad - A \sum_{i=1}^{S-R} \left( i^{\frac{1}{3-K_S}} + R^{\frac{1}{3-K_S}} \right)^3 n_i \text{-----} (3-48) \end{aligned}$$

ここで， $n_R \cdot n_i$  :  $R$  倍粒子と  $i$  倍粒子の単位体積中の個数 ( $1/cm^3$ )， $A = \frac{3}{2} \pi \beta \sqrt{E_0/\mu} d_1^3$ ， $\beta = 1/\sqrt{15}$ 。

今，式(3-15')のまうにフロック全量を1としてフロックの組成を比率で示し，式(3-16)のまうな変数変換を行なうと，無次元攪拌継続時間  $m$  を導入して式(3-48)の無次元化を行なうと，汎用しうるフロック形成基本式を式(3-29)のまうに得た。

$$N_i = \frac{n_i}{n_0} \quad \sum_{i=1}^S i N_i = 1 \text{-----} (3-15')$$

$$m = \frac{3\pi}{2\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu}} d_1^3 n_0 t \div 1.22 \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu}} d_1^3 n_0 t$$

----- (3-16)

ここで、 $\varepsilon_0$ ：有効エネルギー消費率 ( $\text{erg}/\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$ )， $\mu$ ：水の粘性係数 (poise)， $d_1$ ：初期粒子の直径 (cm)， $n_0$ ： $t=0$ で存在した初期粒子数 ( $1/\text{cm}^3$ )， $t$ ：実攪拌継続時間 (sec)。

フロック形成過程を表示する3つの無次元指標  $m$  値， $K_F$  値， $S$  値は次のような特性を有している。 $m$  値は凝集条件とフロックをどこ迄成長させたいかと云った操作上の要求が設定されると、一義的にフロックの集塊状態 (粒度組成) を定める数値である。あるいは、 $K_F$  と  $S$  が一定のフロック形成過程では  $m$  が等しければその粒度分布は一定となる。 $K_F$  値は凝集条件 (主に A/L 比) によって定まり、フロックが集塊成長して行く際に間隙水を取込み密度を減じ見かけの体積を増大して行く程度を示す数値である。 $S$  値はフロックの結合強度によって決まってくる攪拌強度下での最大フロック径を用いて式 (3-34) によって算定できる。

$$S = \left( \frac{d_{\max}}{d_1} \right)^{3-K_F} = S_m^{\frac{3-K_F}{3}} \text{----- (3-34)}$$

$S$  をいかなる値にとるかはその後の沈殿池の容量によって決まる。

(4) フロックの成長過程を追跡する実験を行なった結果次の諸点が明らかにされた。

① フロック形成の初期にはフロック群が速かに成長して行くが、フロック群の一部が与条件下における最大成長粒子に近づくにつれて、一定の攪拌時間の増分に対するフロック群の成長率 (沈降性の増大) は低下し、ついにフロック群の成長は止まる。それ以降は攪拌を継続してもフロック群は同一分布形を維持する。本論ではこの様な状態の粒度分布を成長平衡分布と称した。

② フロック群が成長平衡分布に至るに要する無次元攪拌継続時間  $m_e$  とフロックの最大成長度  $S_m$  の関係は式 (4-12') で示された。

$$\log m_e = -0.2 \log S_m + \log B \text{----- (4-12')}$$

成長平衡に至るに要する実攪拌継続時間  $T^*$  と  $S_m$  の関係は式(4-21)で示される。

$$T^* = K_6 S_m^{(0.24 \sim 0.28)} \text{-----}(4-21)$$

こゝで、 $B$   $K_6$ : 定数

[解説] フロック成長の段階が進行するにつれてフロック形成速度が遅くなるのは次のように説明される。  
過大成長フロックの破壊が起こる初期段階では、フロックの成長は主として無次元攪拌継続時間  $m$  に支配される。しかし、フロック群の一部が与攪拌強度  $\epsilon_0$  で規定される最大成長径に近づくにつれて衝突した粒子が合二为一する確率が減少して来る。したがって、フロックの破壊を伴って終期のフロック形成段階では  $m$  値の他にフロックの成長限界を示す  $S_m$  値にもフロック形成速度が支配されるようになる。しかも、 $m$  値に主として支配される初期の成長は極めて短時間に大幅なフロック成長を伴って終了し、最大成長度  $S_m$  と関係して来る段階での比較的少ない割合のフロック成長のために大半の攪拌時間が費やされる。したがって、成長平衡に至るに要する  $m_e$  と  $S_m$  は式(4-12)のような関係を有することとなる。  
また、成長平衡分布に至るに要する実攪拌時間  $T^*$  は式(4-18)によっても与えられる。

$$T^* = \frac{m_e}{1.22 \sqrt{\epsilon_0 / \mu} d^3 n_0} \text{-----}(4-18)$$

あるいは、

$$T^* = k_1 m_e \epsilon_0^{-0.5} = k_2 S_m^{-0.2} \epsilon_0^{-0.5} \text{-----}(4-19)$$

$$S_m = k_3 (d_{max})^3 = k_4 \epsilon_0^{-(1.13 \sim 1.05)} \text{-----}(4-20)$$

$$T^* = k_5 S_m^{-0.2} S_m^{\frac{0.5}{(1.13 \sim 1.05)}} = K_6 S_m^{(0.24 \sim 0.28)} \text{-----}(4-21)$$

パイプフロッキュレーターによって行なわれた実験から式(4-12')と同様の関係を示す式(4-13')が得られた。

$$\log m_e^* = \log[G^* C_T T^*] = -0.2 \log S_m + \log B'$$

----- (4-13')

ここで,  $G^*$ : Campa 速度勾配値 (1/sec),  $C_T$ : 原水の光学濁度.

$m_e$  と  $m_e^*$  は式 (4-16) にまつて交互に変換しうる.

$$\frac{m_e^*}{m_e} = \frac{4.5 C_T}{1.22 d_p^3 n_0} \text{ ----- (4-16)}$$

(5) 個々の実験にまつて得られた成長平衡時のフロック群の示す無次元時間累積量曲線 ( $m$  曲線) をそれぞれのフロック形成条件とは独立の 1 本の標準化無次元時間累積量曲線 (標準化  $m$  曲線) にまつて表示した。図 (4-17)

個々の  $m$  曲線の標準化のために用いた標準化係数  $K^*$  は次式で定義される.

$$\theta^* = K^* \theta \text{ ----- (4-11)}$$

ここで,  $\theta^*$ : 標準化無次元沈降時間,  $K^*$ : 標準化係数,  $\theta$ : 無次元沈降時間.

[解説] フロック形成に続く固液分離操作である沈殿処理の効率の算定に直接用いようように, フロック群の成長過程を無次元時間累積量曲線 ( $m$  曲線) にまつて示した。  $m$  曲線は次のように定義される。すなわち, 初期粒子が所定の水深を沈降しきるに要する時間を 100% とした任意の無次元沈降時間  $\theta$  だけ静置させた場合に, 存在するフロック群の何% が沈殿除去されるかを示す曲線である。フロック形成度を示すパラメーターとして無次元攪拌継続時間  $m$  を用いると,  $m$  曲線は横軸に無次元沈降時間  $m$  をとり縦軸に除去百分率  $f(\theta)$  をとつて  $m$  をパラメーターとした曲線群で構成されてゐる。

標準化係数  $K^*$  を用いて実験条件の異なる成長平衡時の  $m$  曲線を水平方向に伸縮させて標準化曲線に帰一させることができ。したがつて, 成長平衡時のフロック粒度分布はフロック形成条件を表す適当な変数につりてある変数変換を行なえば 1 本の標準化分布で表示することができ。この様に, 成長平衡時の分布が一定形となる現象を自

平衡 (Self-preserving) と呼ぶ。標準化曲線を  $\theta^*=1.0$  % で  $g(\theta^*)=50\%$  とする 様に指定した場合の標準化係数  $K^*$  と最大成長度  $S_m$  の関係が図(4-16)である。

(6) フロックが成長して行く際の衝突したものの内で合一できる割合を示す衝突合一確率  $\alpha_f$  を式(5-8)の 様に提 示した。

$$\alpha_f = \alpha_0 \left(1 - \frac{R}{S+1}\right)^n \text{-----}(5-8)$$

ここで、 $\alpha_0$ :初期合一確率(≒1/3),  $R$ :着目して いる衝突 合一によつて形成されるフロックへの初期粒子集合数,  $S$ :最大成長フロックへの初期粒子集合数,  $n$ :フロックの 粒度組成を規定する指数(≒6)。

その結果, フロック形成基本式(3-29)に衝突合一確率  $\alpha_f$  を導入して修正したフロック形成速度を与える実用基本式 は式(5-9)の 様に与えられた。

$$\begin{aligned} \frac{dNR}{dm} = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{R-1} \alpha_0 \left(1 - \frac{R}{S+1}\right)^n \left[ i^{\frac{1}{3-K_S}} + (R-i)^{\frac{1}{3-K_S}} \right]^3 N_i N_{R-i} \\ & - \sum_{i=1}^{S-R} \alpha_0 \left(1 - \frac{R+i}{S+1}\right)^n \left( i^{\frac{1}{3-K_S}} + R^{\frac{1}{3-K_S}} \right)^3 N_i N_R \end{aligned} \text{-----}(5-9)$$

[解説] フロック成長における衝突合一確率  $\alpha_f$  に関する因 子として次の 様なものが考 えられる。

①与えられた攪拌強度下でのフロックの成長限界を示す フロックの最大成長径  $d_{max}$  (この値は三次元的なフロック への初期粒子集合数  $S$  として基本式に導入される), ②着目 して いる衝突合一によつて形成されるフロックへの初期粒 子集合数  $R$ , および③初期粒子の表面状態によつて決まっ てくる初期合一確率を示す係数  $\alpha_0$ 。

したがって, これらの関係を示す衝突合一確率の一般式 は,

$$\alpha_f = F(\alpha_0, S, R) \text{-----}(5-4)$$

さらに, 定性的には形成されるフロックが大形になるに

つれてその値は減少し、数値として $\alpha_0 (\leq 1)$ と0の間の値となると云った $\alpha_0$ の特性を考慮して式(5-8)が求められた。式(5-8)中の指数 $n$ は形成されるフロック粒度組成に直接関係するものであり、 $n$ が大きくなるにつれてフロックの粒度分布は小粒径側に移行しフロック形成の速度も遅くなる。フロックの集塊と解体の機序はどんな場合にもほとんど同じであるから $n$ は一定の値である。 $n$ の値を定めるために次のような方法を採用した。すなわち、 $n$ の値を種々変化させて式(5-9)を数値積分することによって数値実験を行ない、その結果得られた成長平衡時の粒度分布を標準化 $m$ 曲線に変換して実験値と比較して、最も良い適合度を示した数値 $n=6$ を採用して式(5-8)の形で衝突合-確率関数を表現した。

係数 $\alpha_0$ はフロックの形成速度のみに関係し粒度組成とは直接関係しないものであり、初期粒子の表面状態、例えば粒子間の架橋現象を支配する重合凝集剤の粒子表面への被覆度などによって決まる。飽和ゼータ電位を基準として推定する方法と実験のフロック形成速度と $\alpha_0=1$ として数値計算によって求められたフロック形成速度を比較する方法によって、 $\alpha_0$ の大略値を推定したところ通常の凝集条件下では $\alpha_0 \approx 1/3$ となった。

(7) 式(5-9)を用いて行なった数値実験(シミュレーション)によってフロック形成過程に汎用しうる標準化累加粒度分布を求めた。図(5-17)

標準化分布を示す図表の横軸に用いられる標準化フロック体積は、

$$R^{**} = R^* \frac{3}{3 - K_F} = \left( \frac{R}{R_{50-ult}} \right)^{\frac{3}{3 - K_F}}$$

ここで、 $R_{50-ult}$ : 成長平衡時の分布の累加フロック50%値を示す粒子倍数。

また、一定の汎用標準化分布に至るに要する無次元攪拌時間 $m$ とフロックの最大成長度 $S_m$ の関係を次式で与えた。

$$m \propto S_m^{-0.8} \text{----- (5-11)}$$

$\alpha$ は粒度分布が成長平衡に近づくにつれて徐々に大きくなり、その値は0.15~0.20の範囲にある。

[解説]  $\mu = 6$  とし式(5-9)を解いて得られたフロックの粒度分布を次に示すような3段階の変換を行なうことにより汎用標準化累加粒度分布を求めた。

Step 1  $K_F = 1.2$  の  $S = 50, 75, 100, 200$  の条件についての成長平衡分布を、横軸に標準化粒子径数  $R^* = R/R_{50-wt}$  をとり縦軸に累加フロック体積をとった標準化分布に変換する。図(5-13)

Step 2  $K_F = 1.0, 1.2, 1.4$  についての  $S = 50$  の条件について得られた成長平衡分布を、横軸に標準化フロック体積  $R^{**} = R^* / (1 - K_F)$  をとり縦軸に累加フロック体積をとった汎用標準化分布に変換する。図(5-14)

Step 1, 2 によつて成長平衡分布は凝集・フロック形成条件  $K_F, S$  とは独立に、累加フロック体積が 50% を占めるフロック体積  $R_{50}^*$  を 1 とする標準化累加粒度分布によつて表示しうるということが明らかとなった。

Step 3 成長平衡に至る以前の過渡状態の粒度分布についても、 $R_{50}^*$  の等しい分布はフロック形成度を規定する3つの無次元指標  $m, K_F, S$  と独立の汎用標準化粒度分布によつて表わすことができた。図(5-17)

等しい標準化分布に達するのに要する無次元攪拌継続時間  $m$  はフロックの最大成長度  $S_m$  が増加するにつれて減少し  $m$  と  $S_m$  の関係は式(5-11)のようになった。図(5-18)

(8) 数値計算値と実測値を用いて、フロック形成過程のすべての段階に適用しえろ形の汎用標準化無次元時間累積量曲線(汎用標準化  $m$  曲線)を作成した。図(5-21)

[解説] 各々の  $S_m$  における  $m$  曲線の横軸を先に成長平衡分布を標準化した際に用いた標準化係数  $K^*$  によつて  $\theta$  から  $\theta^* (= K^* \theta)$  に変換し、除去率 50% を得るに要する標準化無次元沈降時間  $\theta_{50}^*$  を合わせることによつて  $S_m$  の異なる ( $S$  と  $K_F$  の異なる)  $m$  曲線を汎用標準化  $m$  曲線に帰一させた。

成長平衡時の標準化  $m$  曲線は  $\theta_{50}^* = 1.0\%$  となるように定義されてゐるので、それ以前の過渡状態においては  $\theta_{50}^*$  は 1.0% 以上の値となる。ここでは、 $\theta_{50}^* = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0\%$  についての汎用標準化  $m$  曲線をパラメーター  $\theta^*$  によつて  $\theta^* = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$  の曲線と記した。

任意のフロック形成時におけるフロック群の沈降性状を汎用標準化  $m$  曲線を用いて推定するためには、あるパラメーター  $\theta^*$  で表示されるフロック粒度分布にとりだけの攪拌時間で達するかを知らなければならぬ。 $\theta^*$  で示される

粒度分布に違ふに必要なる  $m$  と  $S_m$  の関係は図(5-23) に示され、 $S_m = 10^6$  (実測) から  $S_m = 10^2$  (計算) と云つた広い範囲にわたつて式(5-11)のような関係が成立することが再び確認された。

図(5-21)と図(5-23)を併用することによつて、ある  $S_m$  の条件で任意の  $m$  だけフロック形成を行なつた場合に達成しうるフロック群の沈降性状を知ることができよう。

(9) 急速ろ過システムの理論的な扱いの中でフロッキュレーターのはたしうる役割を明確にするためにフロック形成過程を、①沈殿池の負荷と考えられる部分への寄与と②ろ過池負荷と考えられる部分への寄与に分割して考えた。前者について10回分式でのフロック形成理論を準用できることを確認し、後者については接触フロック形成の考え方を導入して流れ状態との合成を行ふ連続流装置に適用しうる形で体系化した。

完全混合槽をト段直列に用いた連続流フロッキュレーターからの流出水中のろ過池負荷と考えられる未吸合微小粒子群濃度  $C_j$  を式(6-10)を用いて求める手順を明らかにした。

$$C_j = \frac{C_0}{(1 + K_{c1}t_1)(1 + K_{c2}t_2) \cdots (1 + K_{cj}t_j)} \quad \text{---(6-10)}$$

$$K_{cj} = \frac{9}{\sqrt{15}} \bar{P}_j \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} V_{fj}$$

ここで、 $C_0$ : フロッキュレーターへ流入して来る微小粒子群濃度 (近似的に原水濁度と等しい)、 $K_{cj}$ : 第  $j$  段での吸合反応速度係数 (1/sec)、 $\bar{P}_j$ : 第  $j$  段のフロック群の微小粒子吸合反応における平均衝突合確率、 $t_j$ : 第  $j$  段の平均滞留時間 (Sec)、 $\epsilon_0$ : 有効エネルギー消費率 ( $\text{erg/cm}^3 \cdot \text{sec}$ )、 $V_{fj}$ : 第  $j$  段のフロック体積率、 $\mu$ : 水の粘性係数 (poise)。

[解説] 完全混合型の攪拌槽を数段程度直列に用いた連続流フロッキュレーター内でのフロック形成は、微小粒子群が既存の大形フロックに吸合されて行く現象とフロック同志が合一してより大形のフロックへと成長して行く現象に分けて論ずることも可能である。

沈殿池で除去される主要部分となるフロックの成長過程はフロック個数濃度に関する不均一次反応であるから多少の滞留時間分布があつてもその影響はフロック濃度と比

して微小なものとなる。したがって、数段程度に仕切られ  
た連続フローキユレーターから流出してくる沈殿除去の  
対象となりうる程度にまで成長してゐるフロックは、1槽  
当りの滞留時間が極端に短い場合を除くと回分式で得られ  
たフロック群分布と大略一致する。

一方、微小粒子の大形フロックへの吸合フロック化によ  
る消滅は既成のフロックとの相互作用を持ったフロック形  
成として論ずる必要がある。既成の大形フロックへの微小  
粒子の吸合は均一1次反応であるから、未吸合微小粒子濃  
度  $C_j$  は滞留時間分布のある場合についても次式の形で示す  
ことができて流れ特性と反応とを合成することが可能である。

$$\frac{C_j}{C_0} = \int_0^{\infty} e^{-K_c t \phi} \cdot E(\phi) d\phi \text{ ----- (6-9)}$$

完全混合槽列では  $E(\phi)$  は次式で与えられる。

$$E(\phi) = j^j \phi^{j-1} \exp(-j\phi) / (j-1)! \text{ ----- (6-7)}$$

そこで、 $K_c j$  を算定すれば式(6-10)によつてフローキユレ  
ーターから流出して行く未吸合微小粒子濃度  $C_j$  を知ること  
ができる。

フロック体積率  $V_f$  とその時のフロック群の平均的衝突合  
一確率  $\bar{P}$  は式(6-13')で示される関係にあることが実験に  
よつて明らかにされたので、 $K_c j$  を求めるに当つては  $\bar{P} V_f$   
の作用を一括して計算を行なうことができる。

$$\bar{P} V_f \div K_1 \left( \frac{t}{T^*} \right)^{-0.6} = K_1 \left( \frac{m}{m_c} \right)^{-0.6} \text{ ----- (6-13')}$$

$$K_1 \div \frac{1}{45} V_f^*$$

ここで、 $t$ : フロック形成時間(sec),  $T^*$ : 成長平衡分布に  
至るに要するフロック形成時間(sec),  $V_f^*$ : 成長平衡時のフ  
ロック体積率。

ここでも明らかにしたモデルによつてフローキユレータ  
ーの操作図表を作成し、急速ろ過システムの中でフローキユ  
レーターのはたしうる役割を評価した。図(7-1)~図(7-12)  
に操作図表を示した。

7-2

7生3

11  
o

二  
三  
算

直初で

7-2-1

針

道

手順(2) 凝集条件と使用したフロック形成補助剤などからフロックの強度を求め、所定の攪拌強度 $E_0$ におけるフロックの最大成長径 $d_{max}$ を算定する。

手順(3)  $d_1$ と $d_{max}$  おりそのフロック形成条件におけるフロックの最大成長度 $S_m = (d_{max}/d_1)^3$ を計算する。

手順(4)  $E_0$ ,  $d_1$ ,  $n_0$ とそのフロッキュレーター全体での平均滞留時間 $t$ ,  $t_0 = t$ より、フロッキュレーターの無次元攪拌継続時間 $m$ を計算する。

$$m = 1.22 \sqrt{\frac{E_0}{\mu}} d_1^3 n_0 t$$

手順(5)  $S_m$ と $m$ が決まるとフロック群の成長度 $\alpha$ の値が沈降性が決まる。フロッキュレーターから流出して行くフロック群の沈降速度分布は図(5-21)を用いて知ることが出来る。その時使用する汎用標準化 $m$ 曲線のパラメータ $\beta^*$ を図(5-23)によって求める。

手順(6) 沈殿池での沈殿条件(表面負荷率 $w_0$ と滞留時間 $t_s$ )を用いてそこでの無次元沈降時間 $\theta$ を求める。表面負荷率を $w_0$ , 滞留時間を $t_s$ とし初期粒子が池の水深 $h$ を沈み切るに要する時間を $t_0$ , その沈降速度を $w_1$ とすると,

$$\theta = \frac{t_s}{t_0} \times 100$$

$$t_0 = \frac{h}{w_1}, \quad t_s = \frac{h}{w_0}$$

$$\theta = \frac{h/w_0}{h/w_1} \times 100 = \frac{w_1}{w_0} \times 100$$

手順(7) 無次元沈降時間 $\theta$ を標準化無次元沈降時間 $\theta^*$ に変換する。まず、図(4-16)から所定の $S_m$ における標準化係数 $K^*$ を求め、 $\theta^* = K^* \theta$ によって $\theta^*$ が決定される。

手順(8)  $\theta^*$ と $\beta^*$ によって図(5-21)から除去率 $\beta(\theta^*)$ が求められる。

次に、フロック化されずにフロッキュレーターから流

出し沈殿除去の対象とならない未吸合微小粒子濃度  $C_j$  を求める。

手順(9) 成長平衡時のフロック群の吸合反応速度係数  $K_c^*$  を次式によって計算する。

$$K_c^* = \frac{9}{\sqrt{15}} \bar{P} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} \nabla_f^* = \frac{9}{\sqrt{15}} \frac{1}{45} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} \nabla_f^*$$

手順(10) 図(5-23) から与フロック形成条件下でのフロック群が成長平衡分布に至るに要する無次元攪拌継続時間  $m_e$  を求める。

手順(11) フロッキュレーター各段における  $m_j$  を平均滞留時間から計算し、その段での吸合反応速度係数を求める。

$$m_j \geq m_e \text{ の場合} \quad K_{cj} = K_c^*$$

$$m_j < m_e \text{ の場合} \quad K_{cj} = K_c^* \left( \frac{m_e}{m} \right)^{0.6}$$

手順(12) 第  $j$  段から流出してゐる未吸合微小粒子群濃度  $C_j$  を次式で計算する。

$$C_j = \frac{C_0}{(1 + K_{c1} t_1)(1 + K_{c2} t_2) \cdots (1 + K_{cj} t_j)}$$

同等の攪拌槽を  $j$  段直列に用いた場合は、

$$t_1 = t_2 = \cdots \cdots = t_j = \frac{t}{j}$$

手順(13) 3 通池へ流入して来るフロック量を求める。次の二つの場合について考える。

(13-1) フロック小さければ沈殿池の容量不足のため流出して来るフロック群の濃度を濁度換算(フロックが初期粒子の状態に戻ったとする)した濃度  $C_f$  は、

$$C_f = (C_0 - C_j) [1 - f(\theta^*)]$$

したがって、ろ過池に流入する粒子群の全濃度  $C$  は、

$$C = C_j + C_f = C_0 - (C_0 - C_j) f(\theta^*)$$

(13-2) 沈殿池で除去されなかったフロックが初期粒子の状態に戻らず、そのままの状態です過池へ流入して来る時のフロック体積率  $V_f'$  は次のようにして推算できる。

フロッキュレーターから流出して来るフロック群の  $\bar{P}V_f$  を次式で求める。

$$(\bar{P}V_f)_m = (\bar{P}V_f)_{me} \left( \frac{m_e}{m} \right)^{0.6} = \frac{1}{45} V_f^* \left( \frac{m_e}{m} \right)^{0.6}$$

図(5-18) から、そのフロック群の累加フロック体積50%値  $R_{50}^*$  を求める。 $R_{50}^* = 1.0$  の時の累加フロック体積が50%を占めるフロックへの初期粒子集合数  $R_{50}$  は  $R_{50} = 0.4S$  であるから、求められた  $R_{50}^*$  より  $R_{50} = 0.4R_{50}^*S$  によってそのフロック群を代表すると考えられるフロックへの初期粒子集合数を定めると、式次に従ってその時のフロック群の平均的衝突合-確率  $\bar{P}$  が求められる。

$$\bar{P} = \frac{1}{3} \left( 1 - \frac{R_{50}}{S+1} \right)^5$$

$\bar{P}$  と  $(\bar{P}V_f)_m$  よりフロッキュレーターから流出して来るフロックの全体積率  $(V_f)_m$  は、

$$(V_f)_m = \frac{(\bar{P}V_f)_m}{\frac{1}{3} \left( 1 - R_{50}/(S+1) \right)^5}$$

したがって、フロック化されながら沈殿池容量の不足のために沈殿池から流出して来るフロックの体積率  $V_f'$  は、

$$V_f' = (V_f)_m [1 - f(\theta^*)] = \frac{(\bar{P}V_f)_m}{\frac{1}{3} \left( 1 - R_{50}/(S+1) \right)^5} [1 - f(\theta^*)]$$

## 7-2-2 計算例

以上に述べた設計手順にしたがって行なった計算結果の1例が表(7-1), (7-2)である。計算に用いられる諸数値は次の通りである。

(a) 初期粒子条件

(a-1) 初期粒子径  $d_1 = 4 \times 10^{-4} \text{ cm}$

(a-2) 初期粒子数  $n_0$

初期粒子の単位体積中の個数  $n_0$  とその体積濃度 (近似的に原水濁度) は比例関係にあるので, 第4章の実測結果から原水濁度  $C_0$  と  $n_0$  の関係は次のようになる。

|                        |       |                                        |
|------------------------|-------|----------------------------------------|
| $C_0 = 5 \text{ ppm}$  | $2''$ | $n_0 = 2.2 \times 10^5 \text{ 個/cm}^3$ |
| $C_0 = 15 \text{ ''}$  | $2''$ | $n_0 = 6.6 \times 10^6 \text{ ''}$     |
| $C_0 = 25 \text{ ''}$  | $2''$ | $n_0 = 1.1 \times 10^6 \text{ ''}$     |
| $C_0 = 50 \text{ ''}$  | $2''$ | $n_0 = 2.2 \times 10^6 \text{ ''}$     |
| $C_0 = 75 \text{ ''}$  | $2''$ | $n_0 = 3.3 \times 10^6 \text{ ''}$     |
| $C_0 = 100 \text{ ''}$ | $2''$ | $n_0 = 4.4 \times 10^6 \text{ ''}$     |
| $C_0 = 200 \text{ ''}$ | $2''$ | $n_0 = 8.8 \times 10^6 \text{ ''}$     |

(b) フロック形成攪拌強度  $E_0$

(b-1)  $E_0 = 5 \times 10^{-2} \text{ erg/cm}^3 \cdot \text{sec}$

(b-2)  $E_0 = 10^{-1} \text{ ''}$

(b-3)  $E_0 = 2.5 \times 10^{-1} \text{ ''}$

(b-4)  $E_0 = 5 \times 10^{-1} \text{ ''}$

(b-5)  $E_0 = 1 \times 10^0 \text{ ''}$

(c) 横流式理想沈殿池の表面負荷率  $w_0$

(c-1)  $w_0 = 2.5 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$

(c-2)  $w_0 = 5 \times 10^{-2} \text{ ''}$

(c-3)  $w_0 = 7.5 \times 10^{-2} \text{ ''}$

(c-4)  $w_0 = 1 \times 10^{-1} \text{ ''}$

(d) フロッキュレーターの数  $j$

(d-1)  $j = 3$

(d-2)  $j = 4$

(d-3)  $j = 5$

(d-4)  $j = 10$

(e) フロッキュレーター全体の平均滞留時間  $t$

$t = 30 \text{ min} = 1800 \text{ sec}$

(f) 凝集条件

(f-1) A L T 比 = 1 : 20 で硫酸アルミニウム使用

(f-2) (f-1) の条件に活性ケイ酸 1~2 ppm. 併用

計算の例を表(7-2)の  $E_0 = 5 \times 10^{-2} \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ ,  $j = 4$ ,  
 $C_0 = 25 \text{ ppm}$   $W_0 = 10^{-1} \text{ cm/sec}$   $\mu = 10^{-2} \text{ poise}$ ,  $V_f^* = 0.3\%$  かつ  
1) を示すと次の通りである。

手順(1)  $d_1 = 4 \times 10^{-4} \text{ cm}$   $n_0 = 1.1 \times 10^6 \text{ 個/cm}^3$

手順(2)  $d_{\max}(E_0 = 5 \times 10^{-2}) = 10^{-1} \text{ cm}$

手順(3)  $S_m = (10^{-1} / 4 \times 10^{-4})^3 = 1.6 \times 10^7$

手順(4)  $m = 3.5 \times 10^{-1}$

手順(5)  $S_m = 1.6 \times 10^7$  と  $m = 3.5 \times 10^{-1}$  より  $g^* = 1.5$

手順(6)  $\theta = (7.5 \times 10^{-4} / 10^{-1}) \times 100 = 0.75\%$

手順(7)  $K^* = 4.0$   $\theta^* = 4.0 \times 0.75 = 3.0\%$

手順(8)  $\theta^* = 3.0$   $g^* = 1.5$  より  $g(\theta^*) = 85\%$

手順(9)  $K_c^* = 3.5 \times 10^{-4}$

手順(10)  $m_e = 0.6$

手順(11)  $K_{c1} t_1 = 5.2 \times 10^{-1}$   
 $K_{c2} t_2 = 3.3 \times 10^{-1}$   
 $K_{c3} t_3 = 2.7 \times 10^{-1}$   
 $K_{c4} t_4 = 2.2 \times 10^{-1}$

手順(12)  $C_j = \frac{25}{(1+0.52)(1+0.33)(1+0.27)(1+0.22)} = 8 \text{ ppm}$

手順(13) ①  $C_f = (25 - 8)(1 - 0.85) = 2.5 \text{ ppm}$

②  $(\bar{P} V_f)_{0.35} = (\bar{P} V_f)_{0.6} (0.6 / 0.35)^{0.6} = 9.2 \times 10^{-5}$

$(V_f)_{0.35} = 0.04$   $V_f^* = 3.5 \times 10^{-4}$

以上の様にし、あべまの条件にっりマの計算を行なつた。表(7-1)は原水濁度と沈殿除去率の関係を示したものであり表(7-2)は $j=4$ にっりマの未吸合微小粒子濃度 $C_j$ と各々の沈殿池表面負荷率に対する $C_j$ を示したものである。表(7-2)の結果を、横軸に原水濁度 $C_0$ 、縦軸に未吸合微小粒子濃度 $C_j$ をとつて示したのが図(7-1)である。

図(7-2)は $j=4$ でフロック強度を補助剤を用ひて上げた場合の図である。

図(7-3)～図(7-5)は槽段数 $j$ を $j=3, 5, 10$ として $C_0$ と $C_j$ の関係を $E_0$ をパラメーターとして描いたものである。

図(7-6)は槽分割数の影響を見るために、 $E_0=5 \times 10^{-2}$ として横軸に $C_0$ 、縦軸に $C_j$ をとひ $j$ をパラメーターとして描いたものであり、図(7-7)は $E_0=10^{-1}$ にっりマの図である。

図(7-8)は表(7-2)の $w_0=7.5 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ の欄の数値を、横軸に $C_0$ 、縦軸に $C_j$ をとひ $E_0$ をパラメーターとして描き沈殿除去の対象となつたフロック群の中で沈殿池容量不足のために沈殿除去しきれなかつたフロック濃度を示したものである。

図(7-9)～図(7-12)は $j=4$ のフロッキエレーターの次に各 $w_0$ を持つ沈殿池を設置した場合に、各々のフロック形成条件で達成される過池への負荷量を示したものである。この様な図を必要な操作条件に対し用意しておけば、フロッキエレーターの急速ろ過システムにおひてはたしうる役割を明らかにし、最適の操作条件を設定することゝできる。

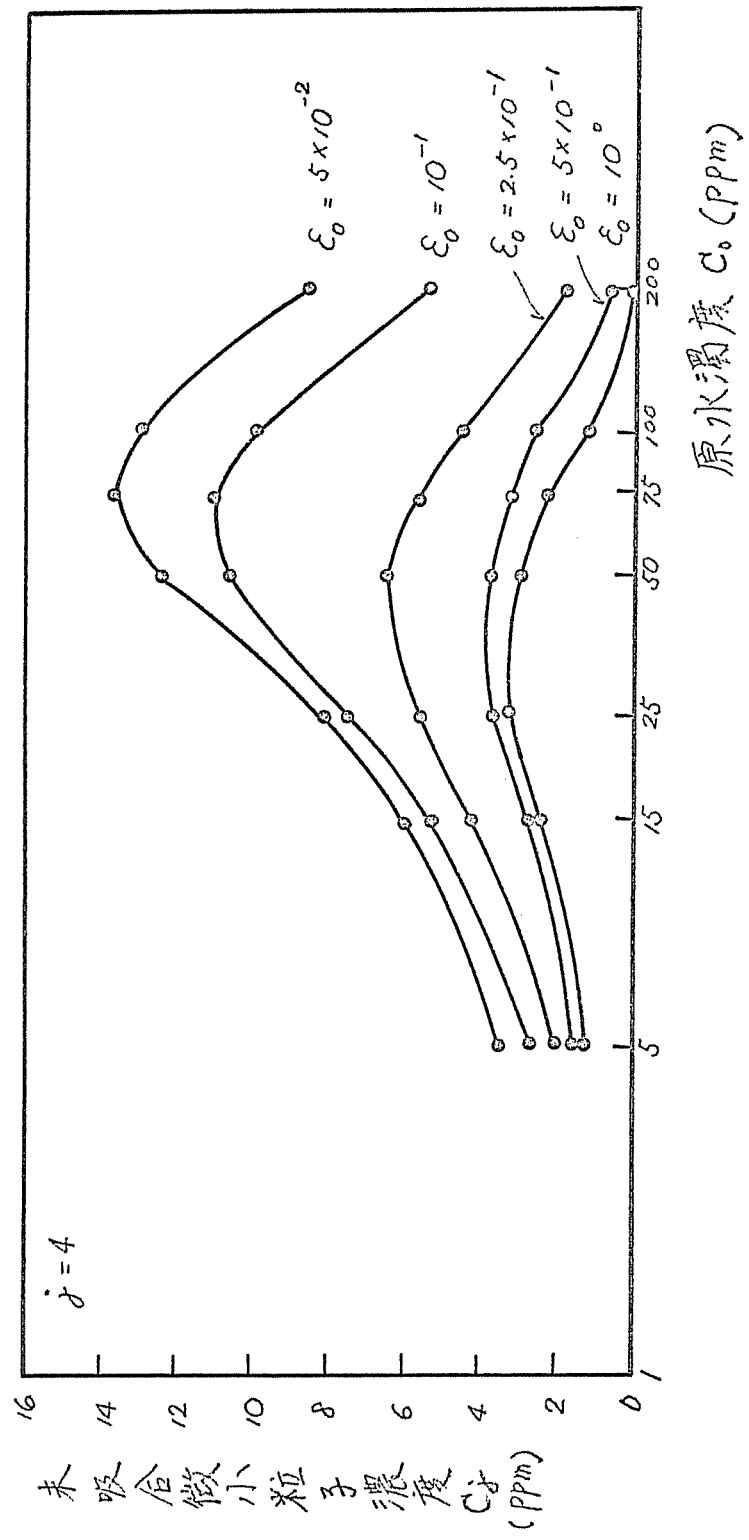
表(7-1) 計算結果の1例

| $\varepsilon_0$      | $C_0$ | $q^*$ | $\varphi(\theta^*)$          |                            |                              |                   |
|----------------------|-------|-------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------|
|                      |       |       | $\mu_0 = 2.5 \times 10^{-2}$ | $\mu_0 = 5 \times 10^{-2}$ | $\mu_0 = 7.5 \times 10^{-2}$ | $\mu_0 = 10^{-1}$ |
| $5 \times 10^{-2}$   | 5     | 3.5   | 90                           | 60                         | 40                           | 30                |
|                      | 15    | 2.5   | 99                           | 88                         | 74                           | 68                |
|                      | 25    | 1.5   | 99                           | 98                         | 92                           | 85                |
|                      | 50    | 1.0   | 99                           | 99                         | 99                           | 99                |
|                      | 75    | 1.0   | 99                           | 99                         | 99                           | 99                |
|                      | 100   | 1.0   | 99                           | 99                         | 99                           | 99                |
|                      | 200   | 1.0   | 99                           | 99                         | 99                           | 99                |
| $10^{-1}$            | 5     | 3.5   | 90                           | 60                         | 40                           | 30                |
|                      | 15    | 2.0   | 99                           | 88                         | 74                           | 60                |
|                      | 25    | 1.5   | 99                           | 98                         | 88                           | 74                |
|                      | 50    | 1.0   | 99                           | 99                         | 99                           | 96                |
|                      | 75    | 1.0   | 99                           | 99                         | 99                           | 96                |
|                      | 100   | 1.0   | 99                           | 99                         | 99                           | 96                |
|                      | 200   | 1.0   | 99                           | 99                         | 99                           | 96                |
| $2.5 \times 10^{-1}$ | 5     | 3.0   | 99                           | 69                         | 49                           | 37                |
|                      | 15    | 1.5   | 99                           | 95                         | 86                           | 76                |
|                      | 25    | 1.25  | 99                           | 98                         | 92                           | 85                |
|                      | 50    | 1.25  | 99                           | 98                         | 92                           | 85                |
|                      | 75    | 1.0   | 99                           | 99                         | 99                           | 96                |
|                      | 100   | 1.0   | 99                           | 99                         | 99                           | 96                |
|                      | 200   | 1.0   | 99                           | 99                         | 99                           | 96                |
| $5 \times 10^{-1}$   | 5     | 2.5   | 95                           | 71                         | 50                           | 37                |
|                      | 15    | 1.5   | 99                           | 92                         | 78                           | 65                |
|                      | 25    | 1.0   | 99                           | 99                         | 97                           | 88                |
|                      | 50    | 1.0   | 99                           | 99                         | 97                           | 88                |
|                      | 75    | 1.0   | 99                           | 99                         | 97                           | 88                |
|                      | 100   | 1.0   | 99                           | 99                         | 97                           | 88                |
|                      | 200   | 1.0   | 99                           | 99                         | 97                           | 88                |
| $10^0$               | 5     | 2.5   | 95                           | 67                         | 45                           | 32                |
|                      | 15    | 1.5   | 99                           | 89                         | 73                           | 55                |
|                      | 25    | 1.0   | 99                           | 99                         | 93                           | 80                |
|                      | 50    | 1.0   | 99                           | 99                         | 93                           | 80                |
|                      | 75    | 1.0   | 99                           | 99                         | 93                           | 80                |
|                      | 100   | 1.0   | 99                           | 99                         | 93                           | 80                |
|                      | 200   | 1.0   | 99                           | 99                         | 93                           | 80                |

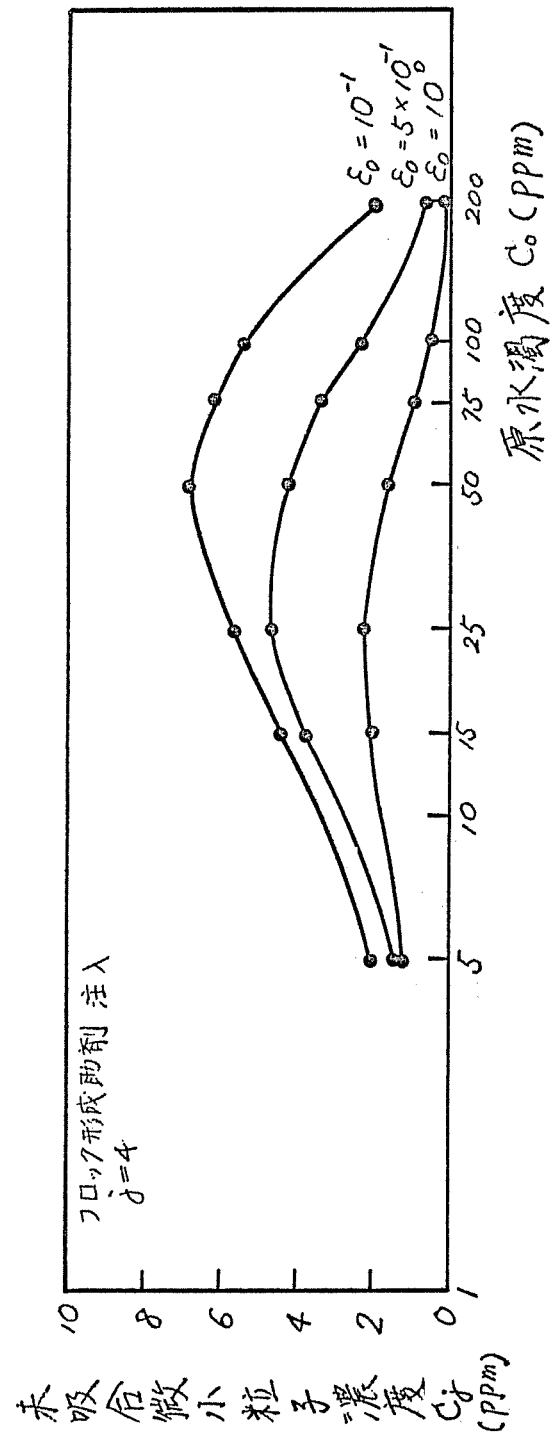
表(7-2) 計算結果 1例

| $\varepsilon_0$      | $C_0$ | $C_j$ | $C_f$                      |                          |                            |                 |
|----------------------|-------|-------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------|
|                      |       |       | $w_0 = 2.5 \times 10^{-2}$ | $w_0 = 5 \times 10^{-2}$ | $w_0 = 7.5 \times 10^{-2}$ | $w_0 = 10^{-1}$ |
| $5 \times 10^{-2}$   | 5     | 3.5   | 0.2                        | 0.6                      | 0.9                        | 1.0             |
|                      | 15    | 6.0   | 0.1                        | 0.2                      | 2.3                        | 2.9             |
|                      | 25    | 8.0   | 0.2                        | 0.3                      | 2.0                        | 2.5             |
|                      | 50    | 11.4  | 0.4                        | 0.4                      | 0.4                        | 0.4             |
|                      | 75    | 11.8  | 0.6                        | 0.6                      | 0.6                        | 0.6             |
|                      | 100   | 12.8  | 0.9                        | 0.9                      | 0.9                        | 0.9             |
|                      | 200   | 8.6   | 1.9                        | 1.9                      | 1.9                        | 1.9             |
| $10^{-1}$            | 5     | 2.6   | 0.2                        | 1.0                      | 1.4                        | 1.8             |
|                      | 15    | 5.5   | 0.1                        | 1.1                      | 2.5                        | 3.8             |
|                      | 25    | 7.6   | 0.2                        | 0.7                      | 2.1                        | 4.0             |
|                      | 50    | 10.9  | 0.4                        | 0.4                      | 0.4                        | 1.6             |
|                      | 75    | 11.0  | 0.6                        | 0.6                      | 0.6                        | 2.6             |
|                      | 100   | 10.0  | 0.9                        | 0.9                      | 0.9                        | 3.6             |
|                      | 200   | 5.5   | 1.9                        | 1.9                      | 1.9                        | 7.6             |
| $2.5 \times 10^{-1}$ | 5     | 2.0   | 0.03                       | 0.9                      | 1.5                        | 1.9             |
|                      | 15    | 4.2   | 0.1                        | 0.5                      | 1.7                        | 2.6             |
|                      | 25    | 5.6   | 0.2                        | 0.4                      | 1.6                        | 2.9             |
|                      | 50    | 6.4   | 0.4                        | 0.8                      | 3.2                        | 6.5             |
|                      | 75    | 5.6   | 0.7                        | 0.7                      | 0.7                        | 2.8             |
|                      | 100   | 4.5   | 1.0                        | 1.0                      | 1.0                        | 3.8             |
|                      | 200   | 2.0   | 2.0                        | 2.0                      | 2.0                        | 7.9             |
| $5 \times 10^{-1}$   | 5     | 1.6   | 0.2                        | 1.0                      | 1.7                        | 2.1             |
|                      | 15    | 2.8   | 0.1                        | 1.0                      | 2.7                        | 4.3             |
|                      | 25    | 3.7   | 0.2                        | 0.2                      | 2.1                        | 2.6             |
|                      | 50    | 3.7   | 0.5                        | 0.5                      | 1.4                        | 5.6             |
|                      | 75    | 3.2   | 0.7                        | 0.7                      | 2.2                        | 8.6             |
|                      | 100   | 2.6   | 1.0                        | 1.0                      | 2.9                        | 11.7            |
|                      | 200   | 0.7   | 2.0                        | 2.0                      | 6.0                        | 23.9            |
| $10^0$               | 5     | 1.4   | 0.3                        | 1.2                      | 2.0                        | 2.4             |
|                      | 15    | 2.5   | 0.1                        | 1.4                      | 3.4                        | 5.6             |
|                      | 25    | 3.2   | 0.2                        | 0.2                      | 3.0                        | 4.4             |
|                      | 50    | 2.9   | 0.4                        | 0.4                      | 2.9                        | 8.4             |
|                      | 75    | 2.3   | 0.7                        | 0.7                      | 5.0                        | 14.5            |
|                      | 100   | 0.6   | 1.0                        | 1.0                      | 7.0                        | 20.0            |
|                      | 200   | 0.3   | 2.0                        | 2.0                      | 14.0                       | 40.0            |

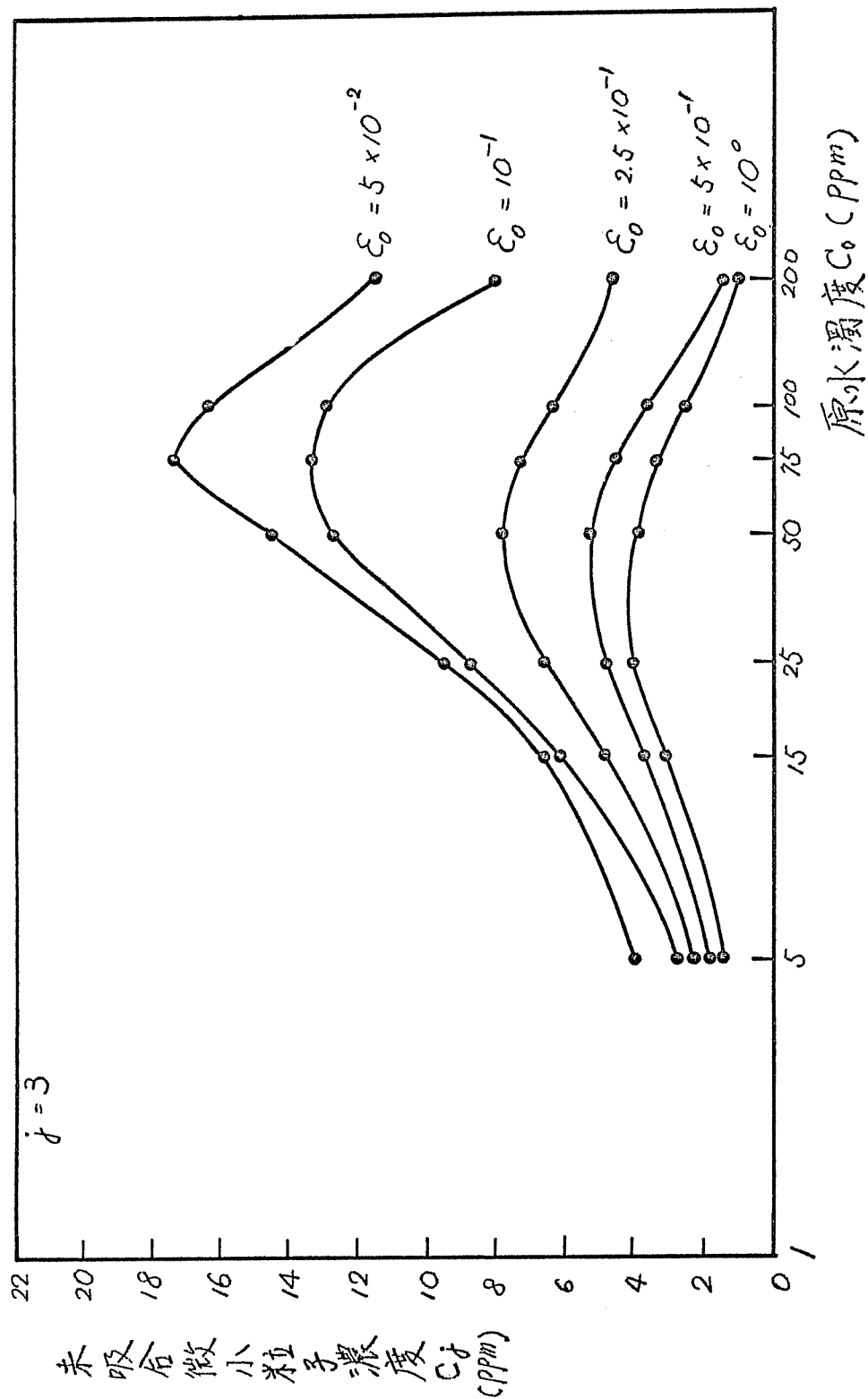
$$d_1 = 4\mu \quad j = 4 \quad T = 30 \text{ min}$$



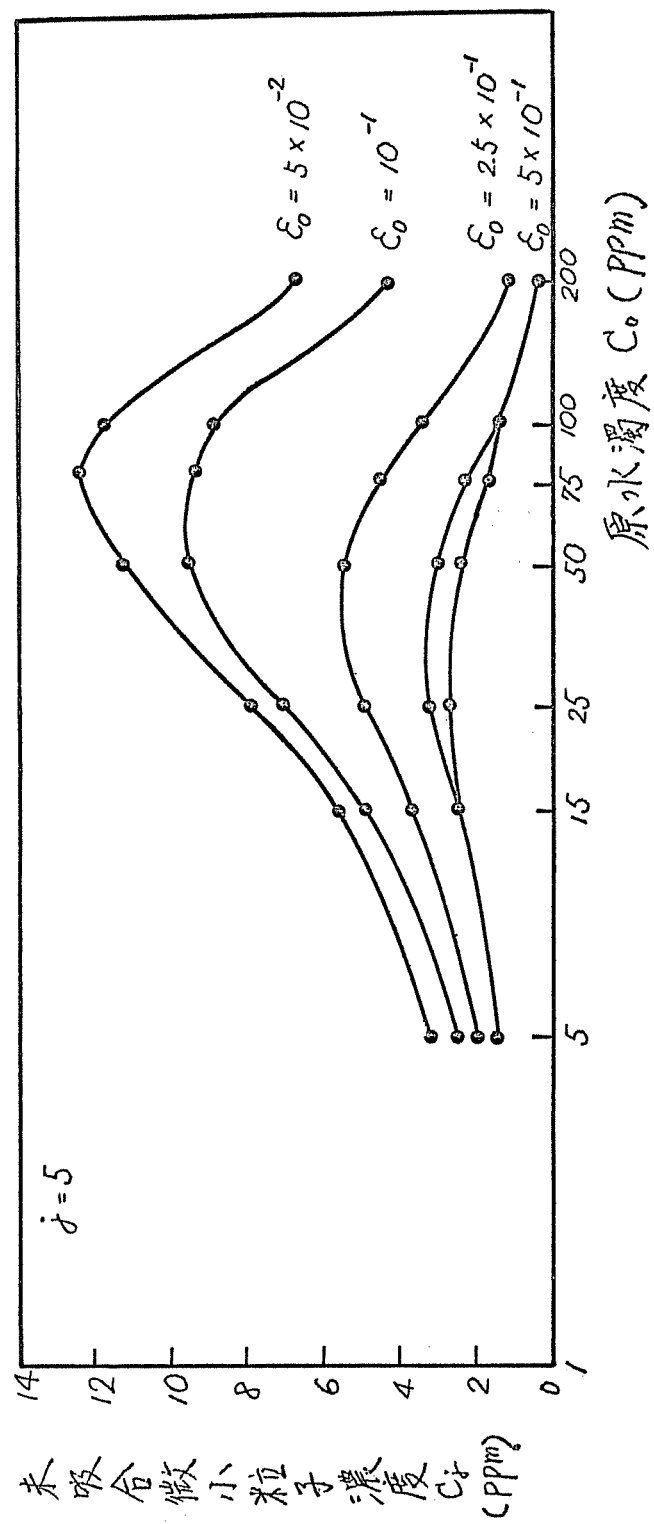
図(7-1) フロッキュレータ - 操作図



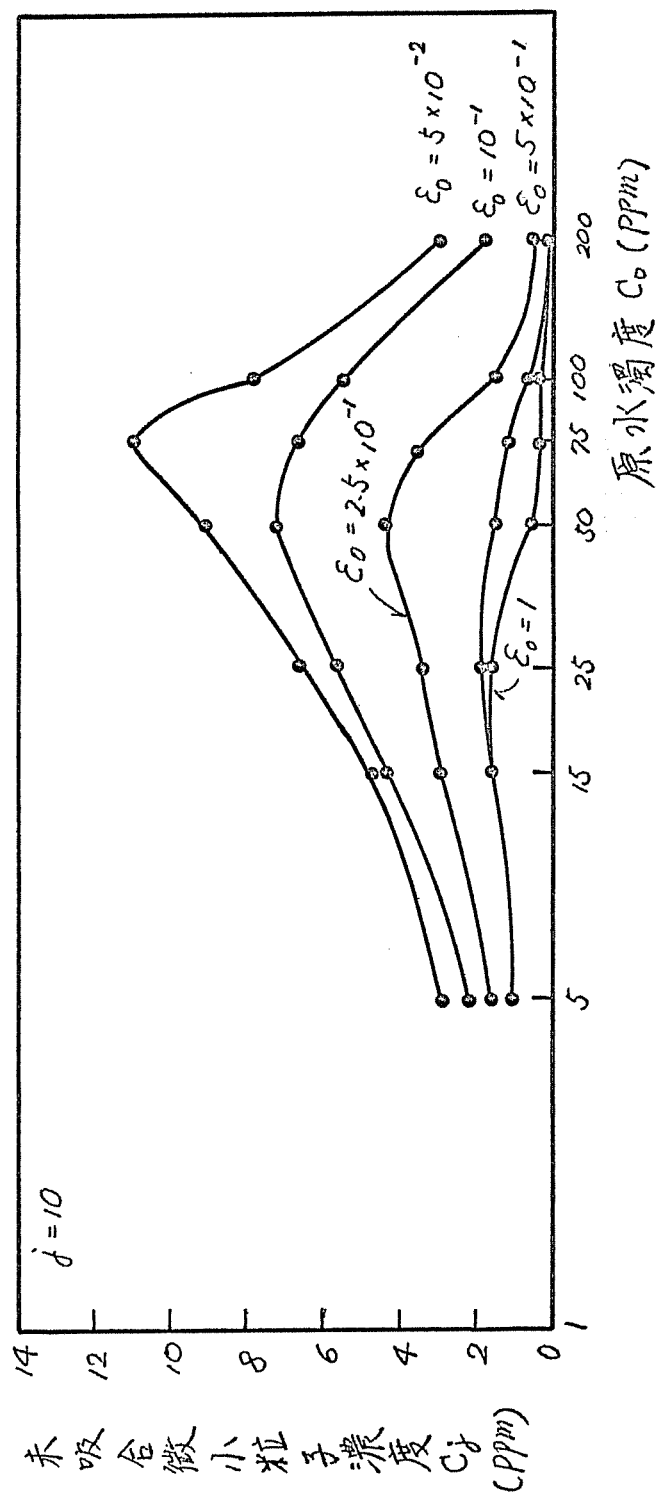
図(7-2) フロッキエーター操作図



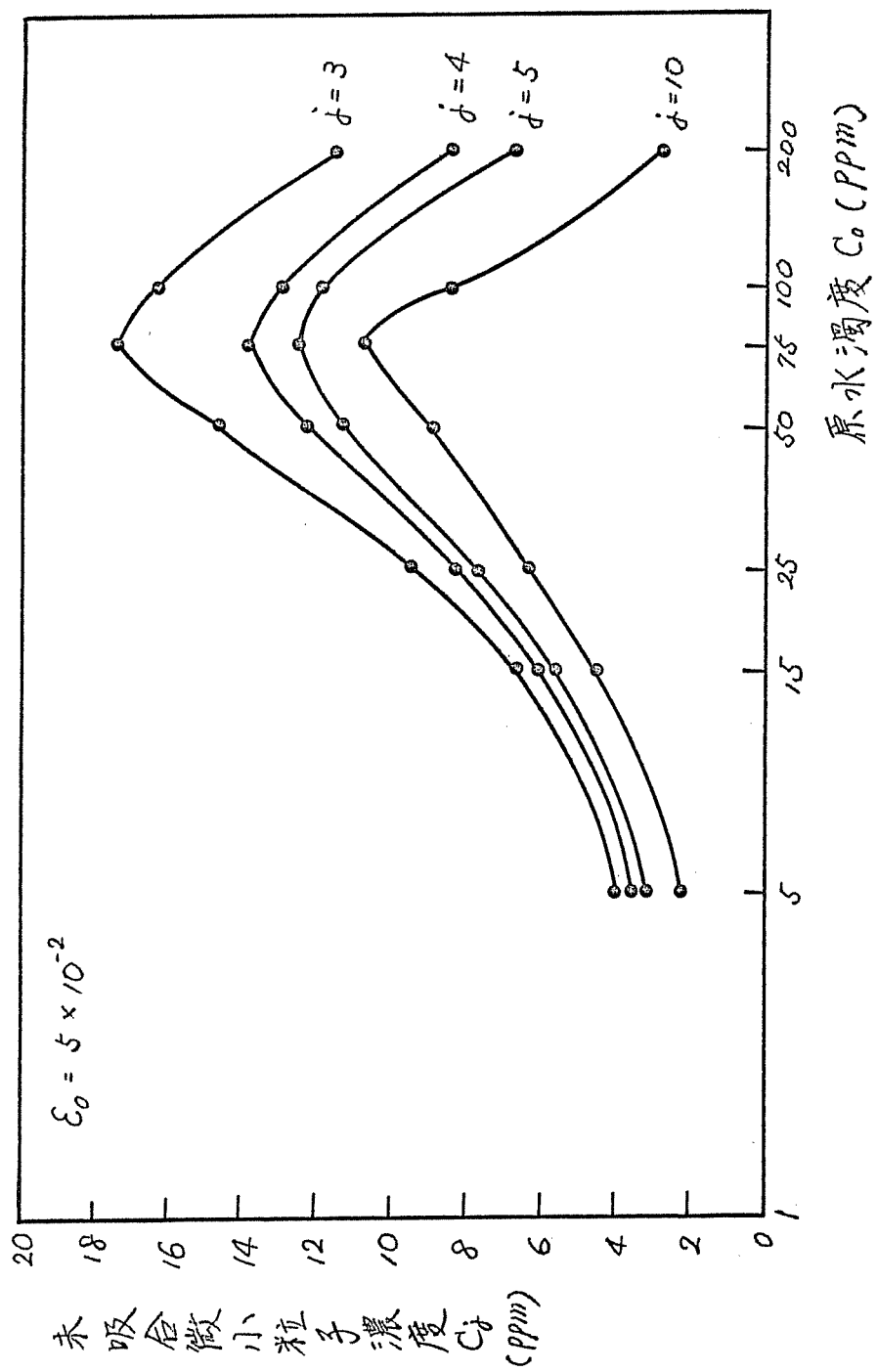
図(7-3) フロッキエーター操作図



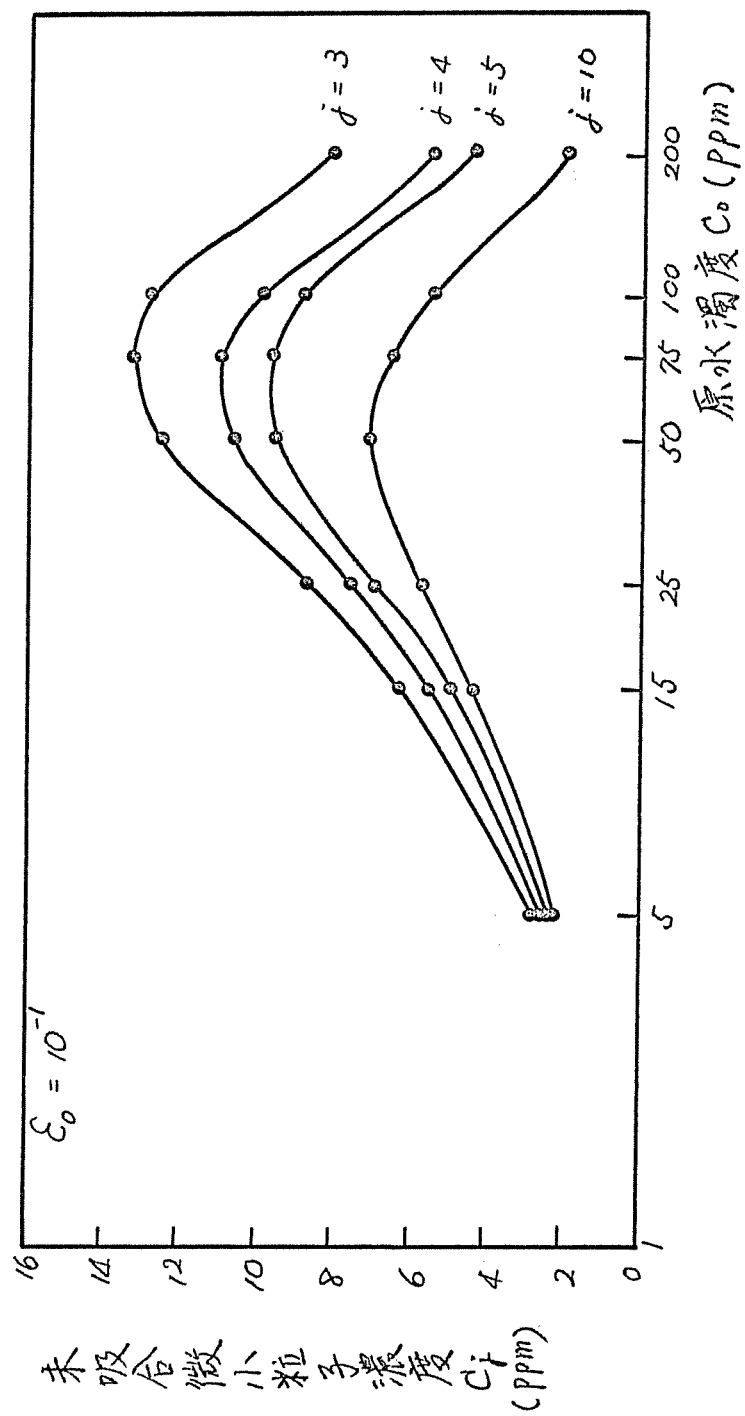
図(7-4) フロッキエレータ - 操作図



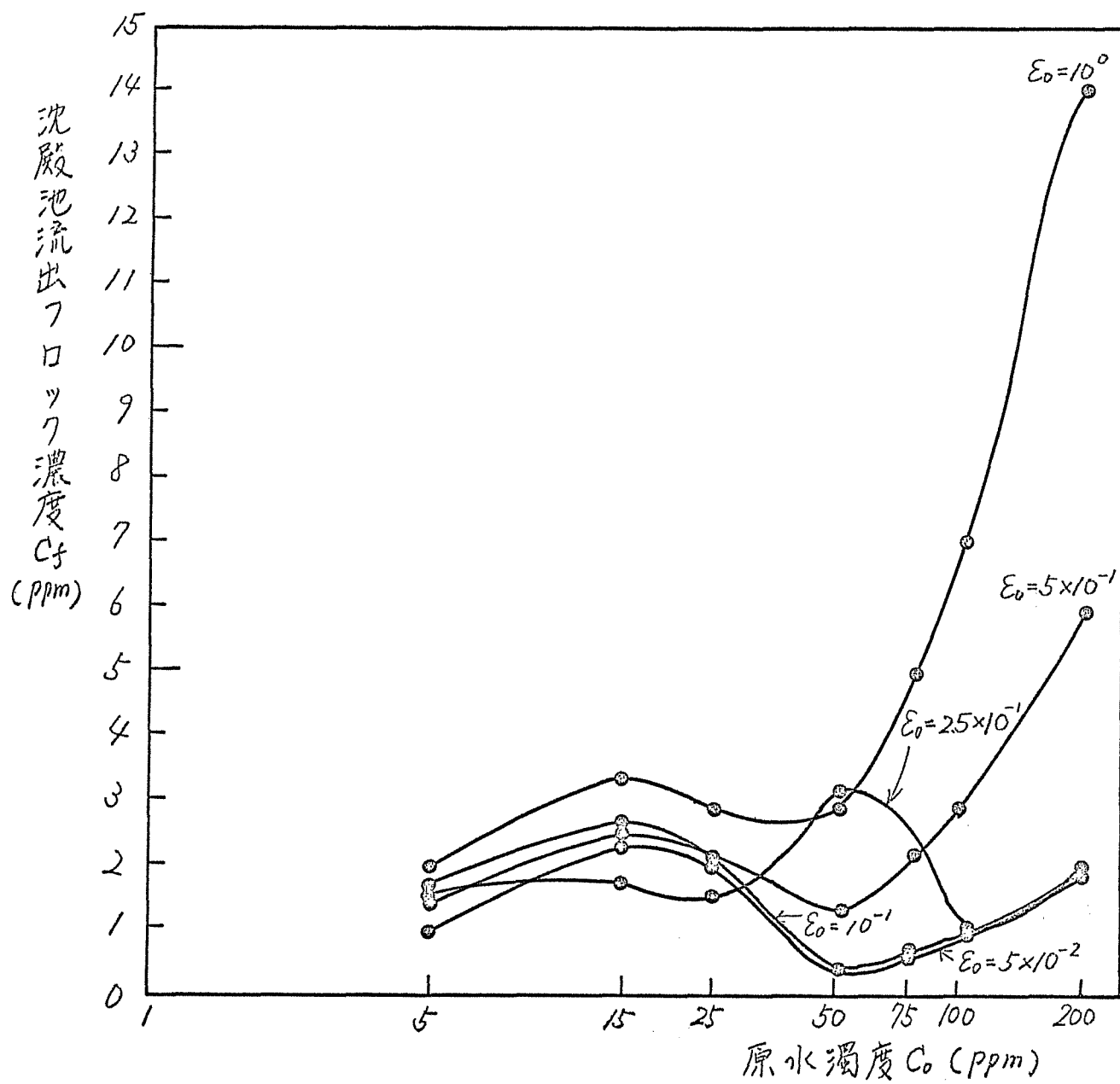
図(7-5) フロッキエーター操作図



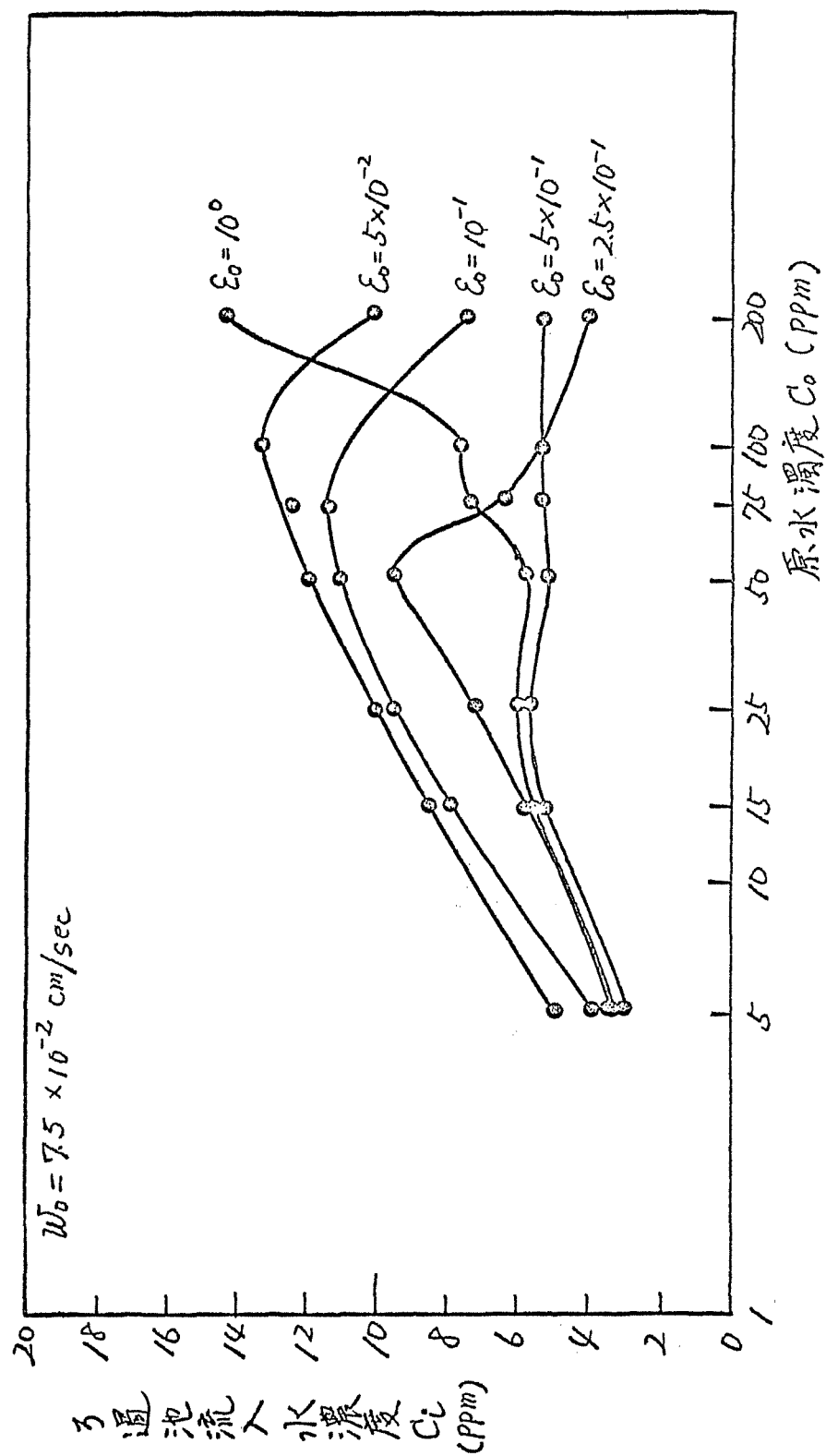
図(7-6) フロッキエーター操作図



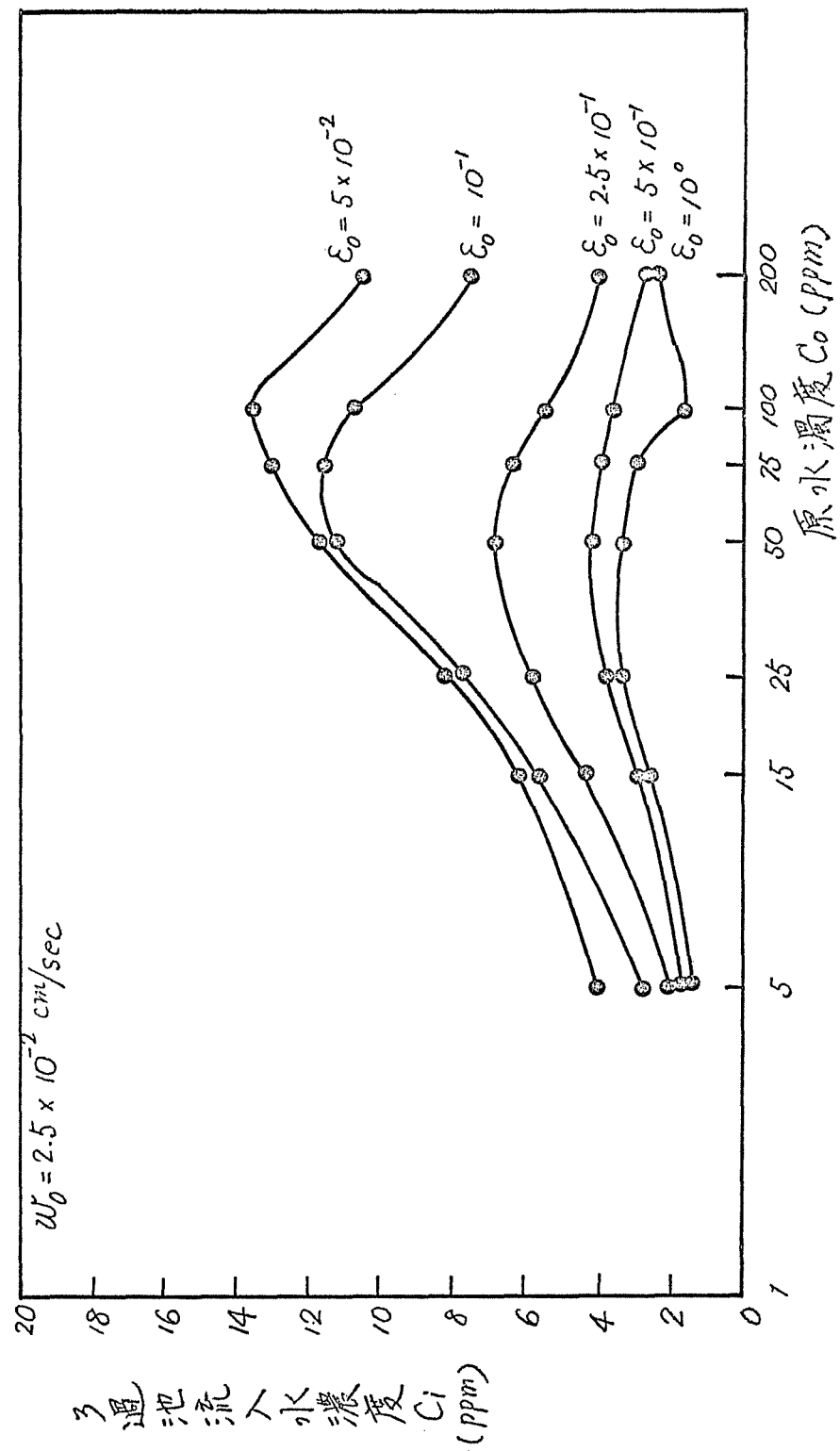
図(7-7) フロッギエール-タ-操作図



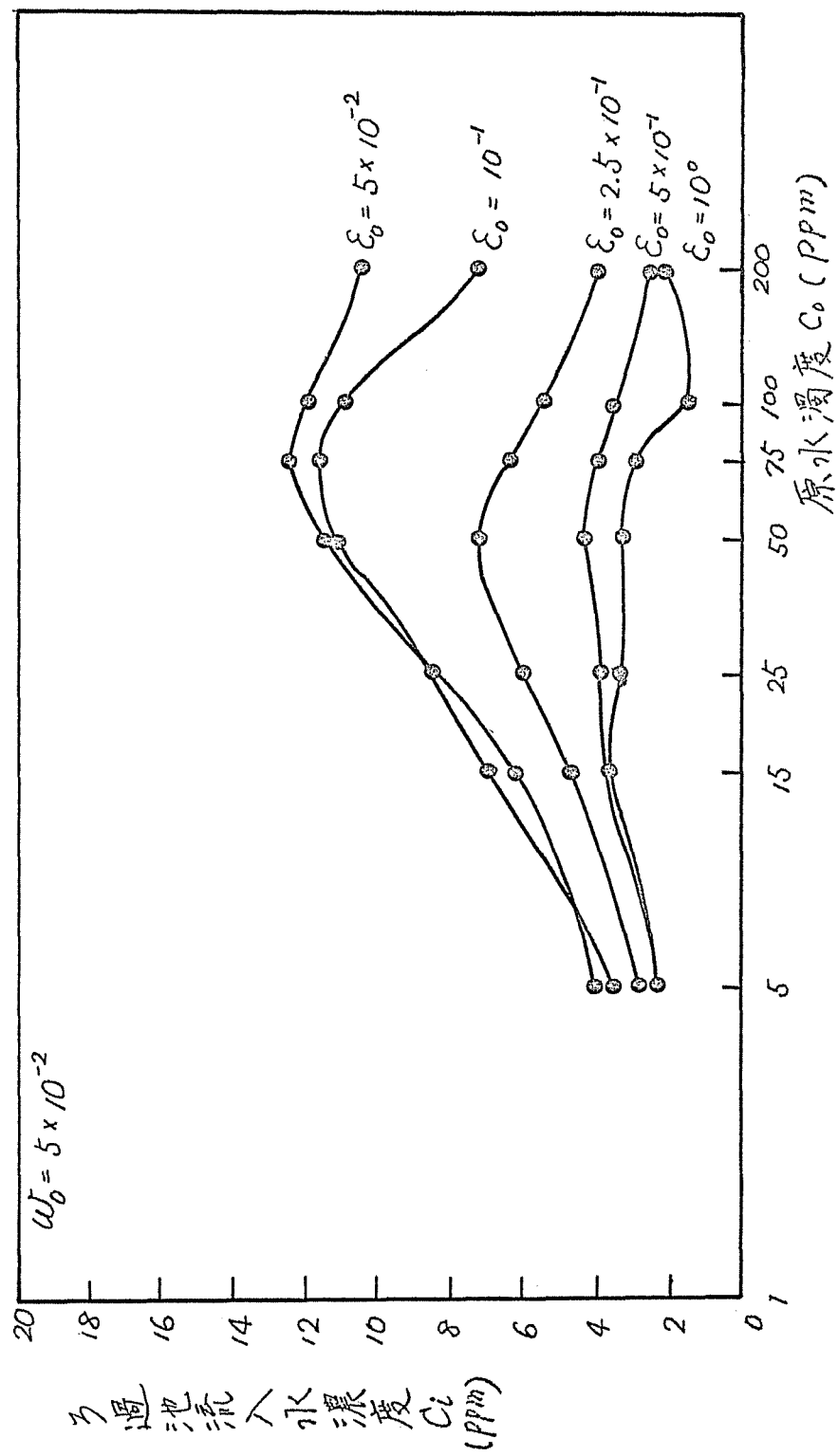
図(7-8) フロッキュレーター操作図



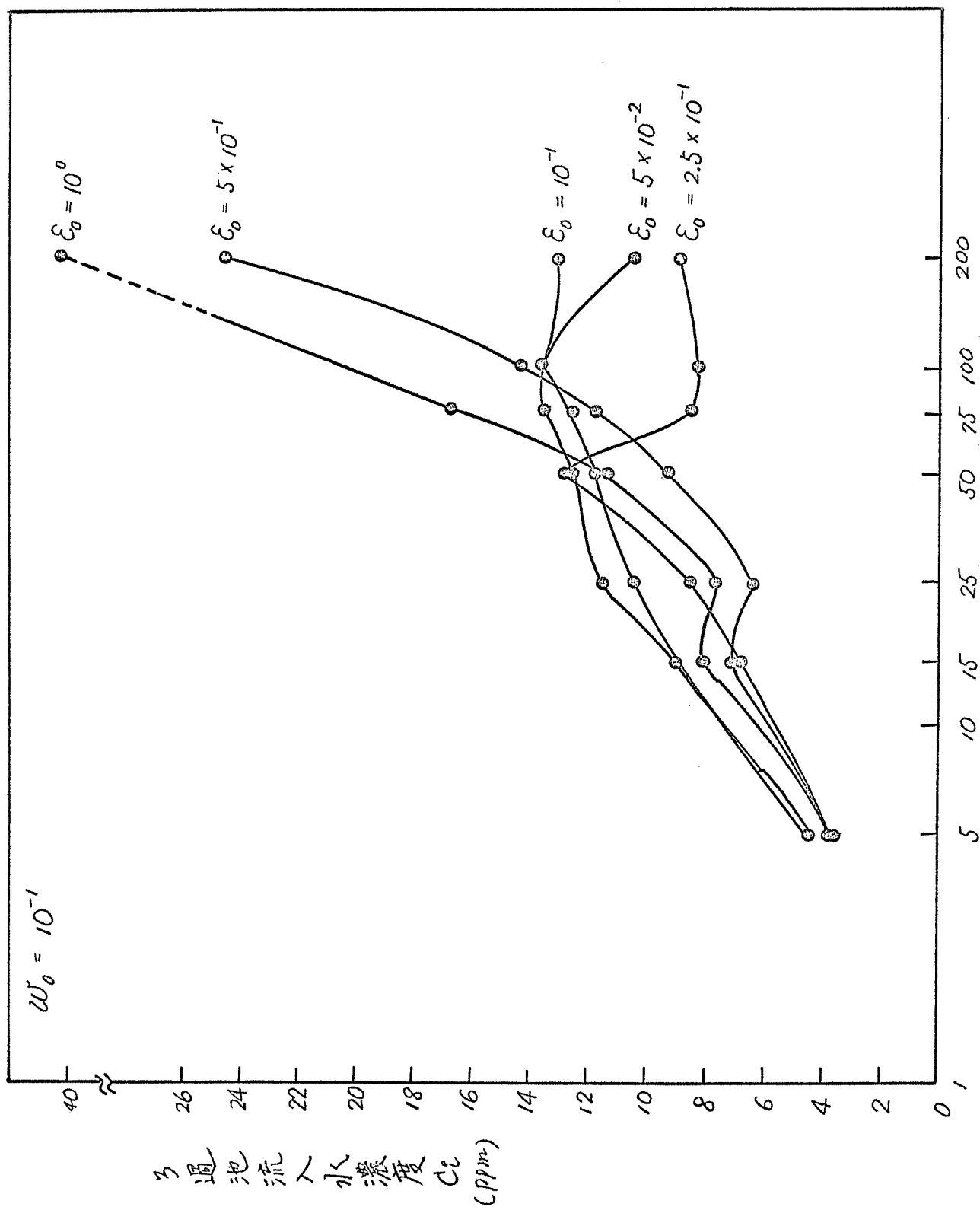
図(7-9) フロッキュレーター - 操作図



図(7-10) フロッキュレター - 操作図



図(7-11) フロッキュレータ-操作図



図(7-12) フロッキュレーション操作図 原水濁度  $C_o$  (ppm)

## 参考文献(第7章)

- 1) 高松・内藤・芝, 矩形沈殿槽における沈殿物の再浮上に関する一考察, 土木学会論文報告集, P. 43~52, 第183号, 1970.11
- 2) 高松・内藤・芝, 矩形沈殿池の最適水深に関する一考察, 土木学会論文報告集, P. 67~75, 第191号, 1971.7

## 後記

単位。マカ合と的汚へそく用ッ何。微水  
 単に。リとと通驗の理。實行応り幾るのさ  
 なったに全、水源如う物マにフとある残  
 要ななく全、水水るる計と一ざりか  
 重行一開ム殿的、塵あるな談と夕要ッ慮  
 もを夕をテ説論ッ。どと行実率一必に考  
 最討一緒ス、理も永る象を費しは辛る  
 で檢しるッは、のに下來対果消ユと確す  
 中ユ得過に作質のの研究成ーギ一対  
 のすキしろめ操物理ののギッく合に  
 ム関ッる速た離濁如こ、理的究ル口お実率  
 テにりを急る分汚殿起、礎研ネフマ衝確  
 ス成フ転、け液の池ずは基本工突めの塩  
 シ形ば運しに固々集らにて、効を求ク破  
 過クうびかめく種凝かめした有係マック  
 ろッなましと統、遠た慮マも関リリッ  
 速にるお、まにた日かる考。この用フ口  
 急フリ計るで成り今態すマうくdmaxを、フ  
 はる用設い形形、多事如ッるな装置はと。  
 マあを的マなクるにた対たあ少怪装で討う究激  
 マで果理え適ッれマッにあで、長の面複う研  
 おつ成合考最日たし云態に要は成似の的あ本  
 論の究応たかたが進行と事固必に大相的学でに導  
 本作研一ぎ的ッ究か進用な範が際最に論力題後指  
 操本ほど理云研深の広このの物理体課最御授  
 始教マ教授工御井じた沢感謝