



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
Citation	北海道大学. 博士(工学) 甲第812号
Issue Date	1972-03-25
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/32619">http://hdl.handle.net/2115/32619</a>
Type	theses (doctoral)
File Information	0812.pdf



[Instructions for use](#)

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	測定値ま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 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 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慮しない場合	88
3-3-2	過大成長フロックの破壊を考慮した場合	90
3-4	フロックの密度変化を考慮した場合の フロック形成基本式	91
3-4-1	フロック形成基本式へのフロック密度 関数導入	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 $S$ 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 $\epsilon$ 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 (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 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 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 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 (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 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-----208

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 (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 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 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 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 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 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 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 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故に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。この様な理由にまっつ、*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うち使用されて来た。操作上の特長として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、表面に負電を帯びていて粒子同志が互いに反撥し合っている状態にある。安定状態にあるこれらの多価金属イオンが添加されると、その水分子は加水分解・重合した状態でけん濁粒子表面に吸着される。この水分子の高分子化した多価金属イオンは粒子表面の電荷を中和し、粒子を安定に存在せしめたり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防ぐために至る過程が凝集(*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。

着目して見るとけん濁粒子が粘土等の負に帯びていて粒子同志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*)と呼ばれクーロン力による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る凝集剤とけん濁粒子間の結合力は非常に強い。

一方、外力が大きいほど、粒子間の衝突頻度が増える。水中で進む粒子は、周囲の粒子と頻りに衝突し、この衝突によるエネルギーの増減が、粒子の運動に大きく影響する。

上の議論から、流体中の粒子の運動は、個々の粒子の相互作用の結果として生じる。この相互作用は、粒子の位置、速度、および周囲の粒子の密度に依存する。

1917年に von Smoluchowski<sup>2)</sup> は、コロイド粒子の凝集速度を、静止流体中でのブラウン運動と衝突頻度から導出した。この式は、粒子の衝突頻度を、単位体積中の粒子数の積に、衝突の幾何学的要因を乗じた形で表す。

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

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

----- (1-2)

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

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 Smoluchowski 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ある場合には rapid coagulation とは別れ、Smoluchowski は衝突の内のある割合のみが合一できると云った場合には 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 Smoluchowski 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> も Smoluchowski 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、この点については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ある微小粒子を光学濁度として測定したり、あるいはコーンタウカウンター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 Birkner と Morgan<sup>6)</sup>、Argaman<sup>7)</sup>、Christman<sup>8)</sup> らが研究を行なった。

1921年 Langelier は凝集・フロック形成による除濁を行なう試みを水処理に応用し、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あるが定量的には何らの取扱も行なっていない。

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

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

ここで、 $\epsilon$  : 単位時間に単位体積の流体中で矢向するエネルギー量 ( $\text{erg/cm}^3 \cdot \text{sec}$ )、 $\mu$  : 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。フロック形成に最適なGの範囲として、米国各地における実験値から20~70 1/secの値をCampは提唱した<sup>(1)</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23000~210000の範囲が適当であるという述べられている。

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εに等しい)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>(2)</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 ( $g/cm^3$ )、損失水頭 (cm)、T: 平均滞留時間 (Sec)、 $\rho_w$ : 水の密度 ( $g/cm^3$ )、A: 攪拌翼面積 ( $cm^2$ )、r: 攪拌翼半径 (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 (r.p.m)、V: 攪拌槽中の水の体積 ( $cm^3$ )。

最近になって、丹保にあって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自身も式(1-4)を乱流下においても使用しようとするであろうと何等かの検討も行なわずに示唆し、一般の水処理のプラン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た。G値の定量的適用は相対的攪拌強度としてのみ限定されるべきである<sup>(3)</sup>。

また、Campの理論はスカラー量εにまつ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られる。すなわち、乱流中には種々の大きさを持つた渦が混在し、それらの渦にまつた粒子群の衝突が起こりしかも衝突する粒子の大きさにまつた衝突現象に關与する渦の大きさも異なることを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ぬ。

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、 $GT$  値を提唱し実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った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完全に含まれ、粒子の運動を流体そのものの運動によっ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) のように求めた。<sup>15)</sup>

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

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



るものウツ見  
 ずにも口を  
 関めた例  
 にかつた  
 成るかれれ  
 形えなさわ  
 クら得成私  
 ッとい形か  
 ロにたと慮  
 の的行く考  
 の性を除の  
 往定用をマ  
 既を通究の  
 象の研つ  
 の現でのに  
 うに味干成  
 よ草惹若組  
 天をな度あ  
 来式的粒で  
 マ度量の難  
 べ速定。そ  
 述突する、  
 に術しれ性  
 上の用巾物  
 以究使思の  
 研みわく出

1-2 本論文の内容

重要な準を  
 重基転か  
 の諸運ら  
 るた・明  
 りあれ計を  
 おでら設筋  
 れ究えみ道  
 理研考一う  
 知るととな  
 水り当一行  
 る関安レマ  
 るにキユリ  
 に成的キ用  
 ム形験ッを  
 テク終口標  
 スッ口を指  
 ッ口来天な  
 過フ従いの  
 うるは、マ  
 速あはれ理  
 急ぞ所なま  
 は作るなる  
 文操すマし  
 論位とっ化  
 本単的ま理  
 な目に合し

研究の持度  
 のし。密し  
 往とるク察  
 既にうあッ  
 とよど口理  
 。義しのフ  
 る定にむた  
 リの力がた  
 っ現明論は  
 立成をマみ  
 り形義口と  
 成ク意つこ  
 へにクエリ  
 かにキユリ  
 成的キ用  
 ム形験ッを  
 テク終口標  
 スッ口を指  
 ッ口来天な  
 過フ従いの  
 うるは、マ  
 速あはれ理  
 急ぞ所なま  
 は作るなる  
 文操すマし  
 論位とっ化  
 本単的ま理  
 な目に合し

疑るの疑る  
 の口し無を  
 んフ慮のこ  
 ぶを考つこ  
 Le21点を加  
 り本行過の  
 お成マ成的  
 で形じ形義  
 論ク裁クマ  
 礎口度口マ  
 基フ密フマ  
 ののみ果値  
 成保そ果値  
 形丹マ結  
 成普なるの  
 形、要フ率  
 クし必期費  
 ッ理に初消  
 フを設結果  
 はタ、結果  
 ンダ、結  
 ンダ、結

表示度の  
 濃度の  
 個群  
 用の提濃群  
 標を程を数  
 標を程を数  
 標を程を数  
 標を程を数  
 標を程を数  
 標を程を数  
 標を程を数  
 標を程を数  
 標を程を数  
 標を程を数



## 参考文献 (第1章)

- 1) 丹保颯仁, フロク形成過程の基礎的研究 (I), 水道協会雑誌, 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

フロック物性の研究は、成実プロセスの最適化を目的として行われる。ここでは、フロックの形成過程、物性、および処理方法について述べる。

フロックの形成は、溶液中の粒子が互に衝突し、凝集して大きくなることで起こる。この過程は、粒子の大きさ、形状、および表面特性に大きく依存する。また、溶液中のpH、イオン強度、および攪拌速度もフロックの形成に重要な影響を与える。

フロックの物性は、その凝集状態によって変化する。一般的に、フロックは多孔質であり、密度が低く、沈降速度が遅い。また、粒子間の空隙が多く、流体の透過性が高い。これらの特性は、フロックの処理方法（沈降、浮上、ろ過）に大きく影響する。

フロックの処理方法は、その物性によって異なる。沈降法では、重力を利用してフロックを分離する。浮上法では、空気や炭酸ガスなどを注入してフロックを浮上させる。ろ過法では、ろ過材を利用してフロックを捕捉する。また、凝集剤を使用してフロックの凝集を促進させる方法もある。

フロックの物性を評価するために、凝集率、沈降速度、浮上速度、ろ過速度などの指標が用いられる。また、粒子の大きさや形状を測定するための装置（レーザー粒度計、顕微鏡）も開発されている。

フロックの形成過程をモデル化するために、質量平衡式や運動方程式が用いられる。また、数値シミュレーションも広く行われている。これらのモデルは、フロックの形成過程を予測し、最適な処理条件を決定するのに役立つ。

フロックの物性と処理方法の関係を理解することは、水処理工程の最適化に不可欠である。また、環境問題の解決にも貢献している。

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

フロックの含水率  $e$  と密度  $\rho_f$  の関係が分かれば式(

2-1) にまつて片方の未知の値を知る事ができる。例  
 えば、 $\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$  (水中にけん濁し、 $\rho_w = 1.00$  とす  
 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 $\rho_f$ の大略の値は表(2-1)のま  
 うである。

今迄云わねた通り、 $\rho_f$ の値は、 $\rho_s$ が1.03程度<sup>1)</sup>とかなり、水率  
 $e$ が96~98%とかなり、 $\rho_f$ の値は、 $\rho_s$ が1.03程度<sup>1)</sup>とかなり、水率  
 も個々のフロックの目安程度<sup>1)</sup>とかなり、 $\rho_f$ の値は、 $\rho_s$ が1.03程度<sup>1)</sup>とかなり、水率  
 し、 $\rho_f$ の値は、 $\rho_s$ が1.03程度<sup>1)</sup>とかなり、 $\rho_f$ の値は、 $\rho_s$ が1.03程度<sup>1)</sup>とかなり、水率  
 工程の理論的取扱を生成させ、 $\rho_f$ の値は、 $\rho_s$ が1.03程度<sup>1)</sup>とかなり、 $\rho_f$ の値は、 $\rho_s$ が1.03程度<sup>1)</sup>とかなり、水率  
 うなめ、 $\rho_f$ の値は、 $\rho_s$ が1.03程度<sup>1)</sup>とかなり、 $\rho_f$ の値は、 $\rho_s$ が1.03程度<sup>1)</sup>とかなり、水率  
 し、 $\rho_f$ の値は、 $\rho_s$ が1.03程度<sup>1)</sup>とかなり、 $\rho_f$ の値は、 $\rho_s$ が1.03程度<sup>1)</sup>とかなり、水率  
 ら、 $\rho_f$ の値は、 $\rho_s$ が1.03程度<sup>1)</sup>とかなり、 $\rho_f$ の値は、 $\rho_s$ が1.03程度<sup>1)</sup>とかなり、水率  
 ら、 $\rho_f$ の値は、 $\rho_s$ が1.03程度<sup>1)</sup>とかなり、 $\rho_f$ の値は、 $\rho_s$ が1.03程度<sup>1)</sup>とかなり、水率  
 ら、 $\rho_f$ の値は、 $\rho_s$ が1.03程度<sup>1)</sup>とかなり、 $\rho_f$ の値は、 $\rho_s$ が1.03程度<sup>1)</sup>とかなり、水率  
 ら、 $\rho_f$ の値は、 $\rho_s$ が1.03程度<sup>1)</sup>とかなり、 $\rho_f$ の値は、 $\rho_s$ が1.03程度<sup>1)</sup>とかなり、水率

次に、フロック形成条件における若干の主要因子を支配する  
 与るフロック強度の成長率をみる。

## 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

フロックは水中に浮遊し、水中に沈降する。沈降速度は、 $v = \frac{2}{9} \frac{r^2 (\rho_s - \rho_w) g}{\mu}$  の式で表され、 $r$  はフロックの半径、 $\rho_s$  はフロックの密度、 $\rho_w$  は水の密度、 $g$  は重力加速度、 $\mu$  は水の粘度である。この式から、沈降速度はフロックの半径の二乗に比例する。したがって、沈降速度を測定すれば、フロックの半径を求めることができる。この方法を、静水中に逆光照射し、フロックの影をスクリーン上に写し、その影の径を測定する方法である。

単粒子沈降条件を得るために、図(2-1)のよう装置を用いて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  
装置の概略は図(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ント板でできている。内部の観察が容易なようにしている。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テ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ものになっている。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のガラス管を挿入し、袋ナットを取り付け、鉄製のフタを閉め、静水中で単粒子沈降状態を維持できるものにする。温度計を付し、測定中の温度と同様に記録した。なお、槽底に直径3cmの穴をあけ、静水沈降管内に流入するフロックの数を測定した。

(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)のようフロックの寸法と形状を測定し、おまびび超降接写カメラを予めガラス管から所定の距離に立って測定粒子を捕え



手順(6) フロット管の内径の沈降速度と粒径の測定は上述のよう  
 にして、まず、約20cmのフロット管の位置を正確に定め、その中心を正確に5cm沈降する時間、形状は円形、直径は約2cm、長さ約20cm、重量約10g、密度約1.5g/cm<sup>3</sup>とする。測定結果は表(2-2)と表(2-3)のよう  
 に記される。

#### 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ト管の寸法と沈降速度が求められ  
 ると、適当な単粒子の沈降速度公式に得られた値を代入  
 して、単粒子の終末沈降速度を算定することができる。  
 単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 cm/sec<sup>2</sup>),  $C_D$ : 抵抗係数 (無次元),  $\rho_s$   
 $\rho_w$ : それぞれ粒子と水の密度 (g/cm<sup>3</sup>),  $d$ : 粒子の直径  
 (cm)。



式(2-2)中の抵抗係数 $C_D$ は図(2-3)のようになり、粒子直径を長さの元に採ったレイノルズ数にまつて変化する値である。そこで、我々の考えまわりの粒子ほどのような抵抗係数を採るかを知らぬにまつて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水(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 $K$ は粒子の形状にまつて異なるが、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りまつて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。

$$\psi = \frac{\text{対象とする粒子と同体積の球の直径}}{\text{対象とする粒子の直径}}$$

$$= \frac{d_{avg}}{d_s} \left( \frac{1}{n} \right)$$

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。

$$n = \frac{(\text{対象とする粒子の表面積}) / (\text{対象粒子の体積})}{(\text{等径の球の表面積}) / (\text{等径の球の体積})}$$

$$= \left( \frac{\pi d_s^2 / \psi}{\pi d_s^3 / 6} \right) \left( \frac{\pi d_{avg}^3 / 6}{\pi d_{avg}^2} \right) = \frac{d_{avg}}{d_s \psi}$$

沈降速度の計算に当つ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形なものでありフロックが成長するにつれて変化する。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、本論では一応正円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)にまつ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のまつて与えられた図(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、これらも合わせると各々の $\psi$ 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 $\psi = 0.7 \sim 0.9$ の範囲ではそれぞれ $C_D$ 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。

$$w = \frac{4}{3} \frac{g}{K} \frac{\rho_s - \rho_w}{\mu} d_s^2$$

$$= \frac{g}{K'} \frac{\rho_s - \rho_w}{\mu} d_s^2 \text{ ----- (2-4)}$$

$\psi = 0.7, 0.8, 0.847, 0.9$  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)の測定値から以下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) 水中にけん濁してあ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った。①については、上水・工業用水処理対象となるのは主として河川水中にけん濁してあ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)の水質を示してあるような北海道大学自家用水道水と札幌市水道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) を用いて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。

すべまの実験条件に ついては図(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, その寸法によつて密度も異なるので粒径と密度の関係を数式化しておかぬならぬ。

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もので,  $\rho_e$  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  $ds = 0.965 df$ ,  $a \cdot K_p$ : 凝集条件によつて決まる定数値であり, 次元は水を水 ( $g/cm^3$ )  $\cdot$  (無次元),  $a$  は式(2-6) の直線が  $ds = 1 cm$  を切る値を示す。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。以下の式の中ではこの 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家法による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 20 ppm, 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 50 ppm, 硫酸アルミニウム 30, 40 ppm 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、 $PH=7.0 \sim 9.0$  と云っ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われて良好であろう。

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 40~80 r.p.m. のデータがすべて同一直線上にあることを見なせるので、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見なされる。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、凝集剤添加量、凝集剤の種類、フロック形成補助剤がフロック密度に与え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) 凝集剤としてホ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 比によって表わし一括表示することとした。

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

ただし、アルミニウム注入率は硫酸アルミニウム、PAC のいずれの場合についても  $Al^{3+}$  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 T 比 1 : 12 のつりま表(2-9), A L T 比 1 : 60 のつりま表(2-10)のような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 T 比が 1 : 10 のつりまの表(2-11), A L T 比が 1 : 100 のつりまの表(2-12)のような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 T 比が 1 : 20 の表(2-13), A L T 比が 1 : 50 の表(2-14)のような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た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 T 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 T 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、実用の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 T 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 T 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 T 比が小さく

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

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

5) 同じ A L T比であれば硫酸アルミニウムによるフロック  
クと P A Cによる形成されるフロックは同一密度関数が  
示され差はない。

P A Cによる生成したフロックの沈降性が可成り大きく  
あり、低い A L T比でのフロック凝集・沈降性は同一粒  
径であり、高い A L T比でのフロック凝集・沈降性は同一  
粒径より大きい。P A Cによる生成したフロックの沈降性  
は、低い A L T比でのフロック凝集・沈降性より大きい。

6) A L T比が 1: 10, 1: 20 と云った場合、A L T比が  
PPM以下の微量の場合はフロック形成補助剤が、A L T比  
が 1: 50 程度のときはフロック形成補助剤の影響も無視  
できなくはない。

フロック形成補助剤は A L T比が大きいほど、通常  
の条件下、その効果を発揮し、フロック形成を促進する。  
また、フロック形成補助剤の濃度を下げると、フロック  
の凝集度が低下する。また、フロック形成補助剤の濃度  
を増加すると、フロックの凝集度が向上する。

以上述べたように、フロック密度を支配する主要な  
因子は、設計・運転に際しては、 $d$  と  $K_p$  の関係に  
注意を払う必要がある。

この実験的考察から、 $d$  と  $K_p$  の関係は、 $d$  が  
増加すると  $K_p$  も増加する。また、 $d$  が一定の  
場合、 $K_p$  が増加すると  $d$  も増加する。この  
関係を式で表すと、 $d$  と  $K_p$  の関係は、  
$$d = a \left( \frac{ds}{d^*} \right)^{-K_p} \quad (2-8)$$

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

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  $\rho_e = \rho_s - \rho_w$  となるわけ  
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  $K_S$  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、 $d^* = d_1 \doteq 4 \times 10^{-4} cm$  (カオリンの直径)とな  
らなければならない。この条件は  $K_S \doteq 0.9$  の時に満たされるが、  
それ以上の  $K_S$  に対しては  $d^* > d_1$  となる。

式(2-1)によつ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

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

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)によつて求められた  
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。

例として 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  $K_S$  と  $d^*$  を用い  
て式(2-11)の右辺を計算しその結果が  $0.05$  となるはず  
ならぬ。

A L T 比 1 : 50 の時は、 $K_S = 1.03$ ,  $d^* = 10 \times 10^{-4} cm$  であ



り図(2-17) (ALT比 1:50 のフロック密度関数のフロッ  
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フロッ  
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、

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

同様にしても、 $1 - e = 0.03$  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  
ック径のフロックのものであるから、 $100 \mu$  以下のフロックに  
ついては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ついて検討を行なうこととする。

图(2-14)の回歸直線を小粒径側に外押しして行くとカオリ  
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  
小増分に対する含水率の低いフロックでは、同じ含水率の  
比べると小さい。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  
した場合には  $(0.83/0.17) \doteq 5$  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  
れるような勾配の異なる二本の回歸直線で構成されて  
いる。勾配の異なる回歸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いる。  
領域1: フロック径が小さい場合でフロックの含水率が



大間隙水。

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

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

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 ( $\text{cm}$ )、 $d_i$ : 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 ( $\text{cm}$ )、 $k_1$ 、 $k_2$ : 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を球として求めるので  $k_1 = k_2$  とする)

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。

$$P_{ei} = i(P_s - P_w) / (d_i/d_1)^3 \text{-----} (2-15)$$

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。

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

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

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ならば式(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れ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 ツ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る点に着目して、乱数を用いたツミュレーションによるフロックをモデル的に形成させるの構造を明らかにしようとする試みは、最初に Vold によつてなされた。Vold の採用したツ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個づつフロックの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、このツ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

— *And* 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。

Gemmill 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、フロック形成過程を正しく再現しえな  
 ない以上、Gemmill 等の結果は定性的にほとんどもかく定量的  
 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、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  
 方向性を持たないのので、二次元に置き換えても支障はなく



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まゝる乱流拡散に近づき、衝突の律速段階が粒子近傍のマイクロ拡散にあると云った仮定に立つて、何ら理論と矛盾する所はない。ツ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の座標(X, Y)を示す数値である。

表(2-18)のデータ(X<sub>i</sub>, Y<sub>i</sub>)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つてゐる。その他の番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)の関係において式(2-16)の仮定が成立することが示され、その指数  $\beta$  は図の回帰直線の勾配がほぼ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つて決められ  $\beta \doteq 2.1$  となり、係数  $\alpha$  は  $\alpha \doteq 1$  となつた。

したがつて、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、 $\rho_s \doteq 2.65 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_w \doteq 1.00 \text{ g/cm}^3$ ,  $d_1 \doteq (3 \sim 4) \times 10^{-4} \text{ cm}$  であるから、式(2-23)より式(2-6)の定数  $a \cdot K_F$  はそれぞれ、 $a \doteq (1.1 \sim 1.5) \times 10^{-3}$ ,  $K_F = 0.9$  と決められる。

前述の通り  $a \cdot K_F$  は A L T 比の関数であり、実験によつて求められた  $a \cdot K_F$  と A L T 比の関係は図(2-20)のまうに与えられた。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て論を進めた。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  $a \cdot K_F$  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。

いわゆ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、著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一個づつ取込まれて行くプロセスが考えられる。図(2-30)に示されるまうに、フロックグラウンケッ生成時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へ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の空気を送り曝気を行つた。表(2-19)に示されるま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、水温の变化によつて生物相が変化することを防ぐためである。

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稀释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)は上述の人工下水にカオリンを 20, 40, 50



PPM 加之長（薬品の溶解と同時に添加した）もの、北大衛  
生工学科下水工学研究室の人工下水、札幌市の真駒内、釧  
成川両処理場の活性汚泥につりまを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。

前者につりまは前節までで詳細に述べた。本節では  
後者につりま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。

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りま  
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（二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、

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

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

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

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

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

ここで、 $k_3 : k_2 d_f^{*\frac{2}{3} k_p} \left\{ \left( \frac{g}{cm^3} \right)^{\frac{2}{3}} \right\}$ ,  $d^*$  : 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  
のよう表わさる。

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

ここで、 $\Delta f$  : 直径  $d$  の両端に働く動圧強度差 ( $g/cm \cdot sec^2$ )  
 $k_4$  : 比例定数 (無次元),  $\rho_w$  : 水の密度 ( $g/cm^3$ ),  $|v_1' - v_2'|$   
:  $d$  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  $d_f$   
が乱流のマイクロスケール  $\lambda_0$  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  
で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、後述するよう通常フロック形成条件  
で最大成長フロック径  $d_{max}$  が乱流のマイクロスケール  $\lambda_0$   
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攪拌強度下における最大成長径を規定する乱水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、

$$k_3 d_{max}^{2(1-\frac{k_5}{3})} \sigma = k_6 \rho_w \frac{\epsilon_0}{\mu} d_{max}^4$$

$$\therefore d_{max} = k \left( \frac{\mu}{\rho_w} \right)^{\frac{3}{2(3+k_5)}} \epsilon_0^{-\frac{3}{2(3+k_5)}} \text{-----}(2-34)$$

ここで、 $k$ : 比例定数 ( $\text{cm}^{\frac{3}{3+k_5}}$ )。

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 (ALT比などの等しい) に対しては攪拌強度  $\epsilon_0$  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、示しうる。

$$d_{max} = K \varepsilon_0^{-\frac{3}{2(3+K_3)}} \text{-----} (2-35)$$

$$K = k \left( \frac{\rho \mu}{\rho_w} \right)^{\frac{3}{2(3+K_3)}} \text{-----} (2-36)$$

前節で明らかたされたように、浄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  $K_3$  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  $d_{max}$  の関係を求めた。図(2-32)は著者、丹保ら、小笠原<sup>(9)</sup>、Angaman<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 Angaman のデータはパドル攪拌によるものであり、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となる。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)にまつて相対的に表示した。



る。

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

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、(1)凝集の際の水質、PH は実用の範囲内ではフロック密度  
に影響を与えない、(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  
く通常用いられる水質ではフロック形成補助剤の添加量  
がフロック密度に比例し、(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  $T$  比にまつその値が変化する。  $A$  と  $T$  比は  $a \cdot K_f$   
の関係は回(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  
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  
によってフロックが形成される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  $i$  との間は式(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、実験によって求められた  
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行く部分、おまび(2)水の  
みが存在して行く空隙部分。

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。

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

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

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

式(2-15)中の*i*と  $(d_i/d_1)$  は式(2-22)のようた関係にあるので、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から式(2-10)を求め、左辺と右辺を別個に計算しても良い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、葉品池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るので、式(2-5)と式(2-6)から式(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。

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

$d^*$ ;  $K_p$ と A L T 比の関係は表(2-15)で与えられている。

$K_B$  は 1.0 ~ 1.5 と云った範囲にあるので、

$$W \propto ds^{1.0 \sim 0.5} \text{-----} (2-31)$$

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)の実験値を代入して各々のA:L: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、

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

A:L:T比 1:20では、

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

A:L:T比 1:(50~100)では、

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

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 $e$ (%)	フロック密度 $\rho_f$ (g/cm <sup>3</sup> )	フロック有効密度 $\rho_e$ (g/cm <sup>3</sup> )
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	沈澱速度	ペロ-ズの長さ	倍率	実径(d)	$d^2$	$(d\xi)^2$	$\mu$	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)
- 沈澱速度 : (cm/sec)
- 接写ペロ-ズ長 : (cm)
- 倍率 : 接写ペロ-ズ長-倍率直線より求めた最も多量フロックの倍率
- 実径(d) :  $d_{ang}$  フロックの測定径( $\times 10^{-3}$ cm)
- $\xi$  :  $d_s/d_{ang}$   $\psi = 0.847$  に対しては  $\xi = 0.965$
- $d_s$  : 等価球径( $\times 10^{-3}$ cm)
- $(d_s)^2$  : ( $\times 10^{-2}$ 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)濃度 ppm	硫酸アルミニウム注入率 $[Al(SO_4)_3 \cdot 18H_2O]$ 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)濃度 ppm	ホ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* [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 ≐ 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 ≐ 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 ≐ 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 [Al] ppm	pH	図中の記号
20	1.67	8.0	△
50	4.17	7.0~9.0	○
500	41.7	8.0	□

表(2-13) ALT比  $\div 1/20$

白陶土濃度 ppm	アルミニウム濃度 [Al] ppm	pH	図中の記号
50	0.83	8.0	●
500	8.3	8.0	■

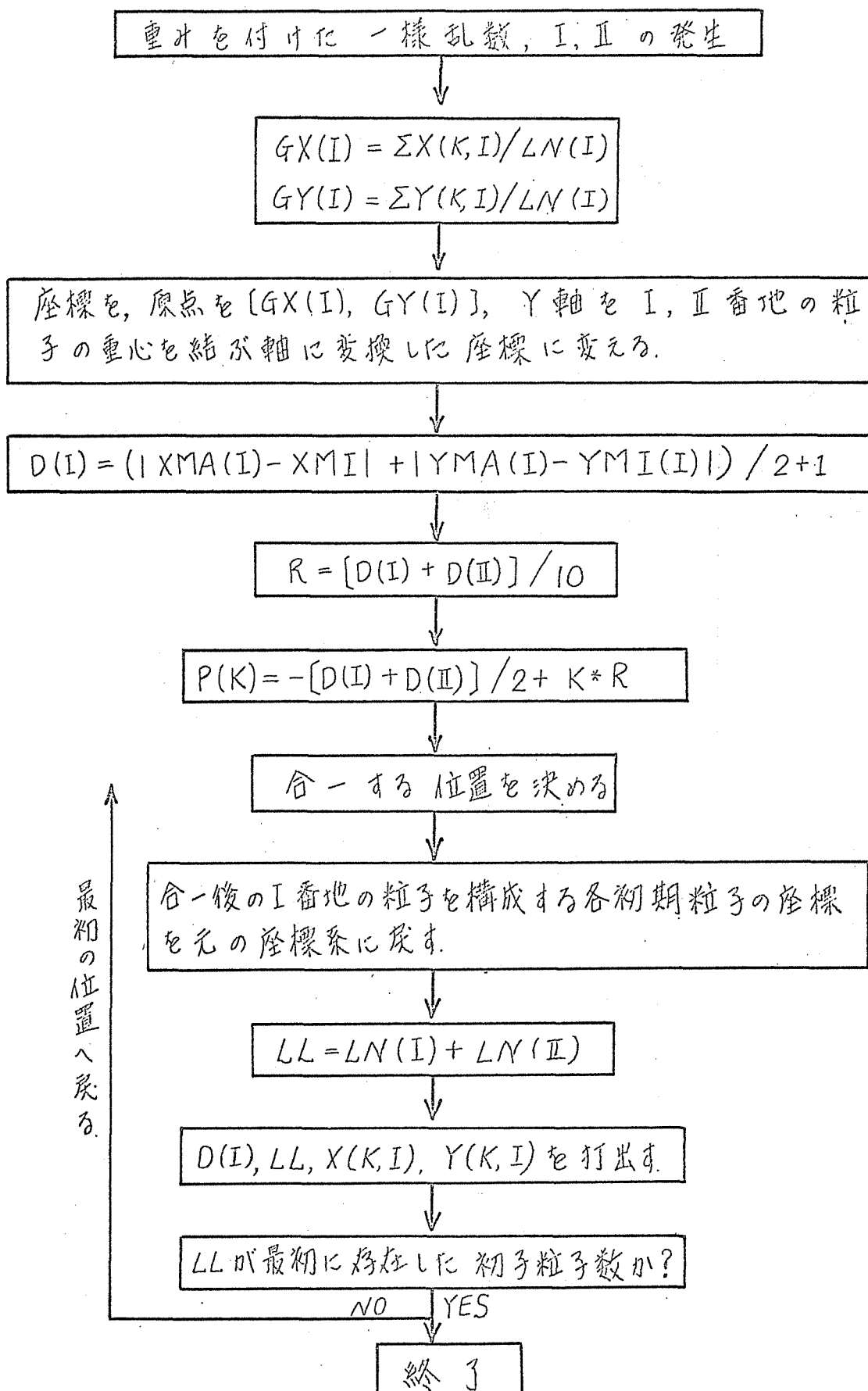
表(2-14) ALT比  $\div 1/50$

白陶土濃度 ppm	アルミニウム濃度 [Al] ppm	pH	図中の記号
50	5	6.0~10.0	△
150	15	6.0~10.0	○
500	50	7.0	●
1000	100	7.0	□

表(2-15) A L T 比と  $d^*$  の関係

A L T 比	K <sub>s</sub>	$a$ (g/cm <sup>3</sup> )	$d^*$ (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



最初の位置へ戻る。



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*ZK+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

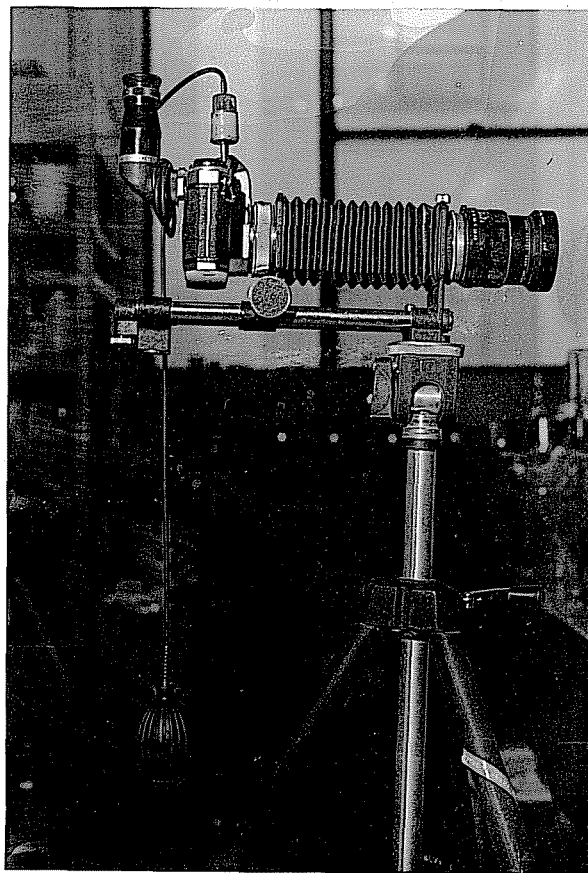
$LL$ : 合一後のI番地の粒子に集合している初期粒子数. II  
番地においては番号  $I$  を  $II$  に変えると上記の記号がそのまま  
使用される.

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

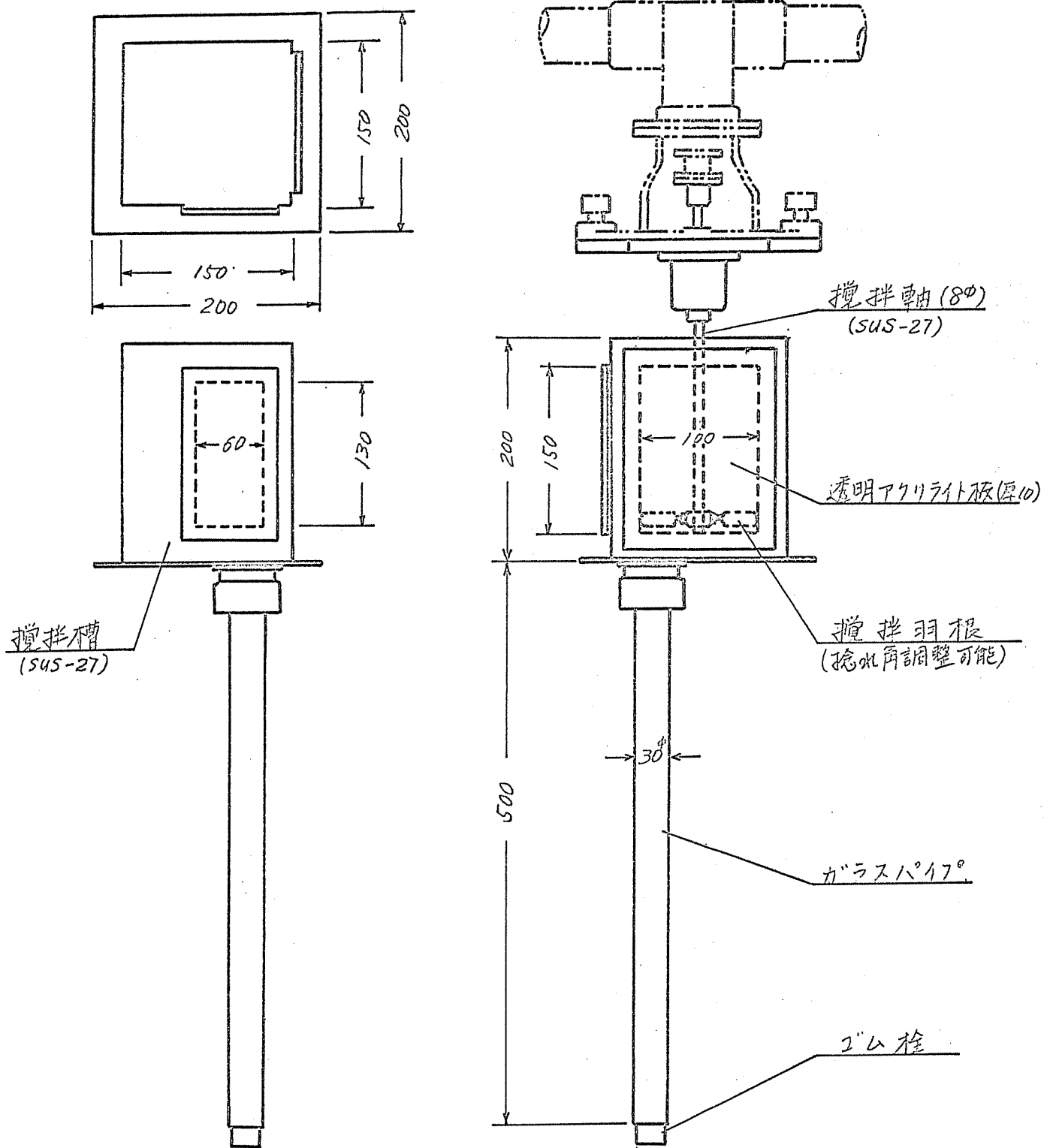
29 階地, 初期粒子集合数37個, フロック相対径10.61, 合一前の重心の座標  $[X=0.8996 \times 10^3, Y=0.3068 \times 10^3]$   
 $[X_1=0.9000 \times 10^3, Y_1=0.3000 \times 10^3], [X_2=0.8989 \times 10^3, Y_2=0.3011 \times 10^3]$ .....  
 $[X_6=0.8906 \times 10^3, Y_6=0.3058 \times 10^3], [X_7=0.8924 \times 10^3, Y_7=0.3053 \times 10^3]$ .....



写真(2-1) フロック密度測定用カメラ

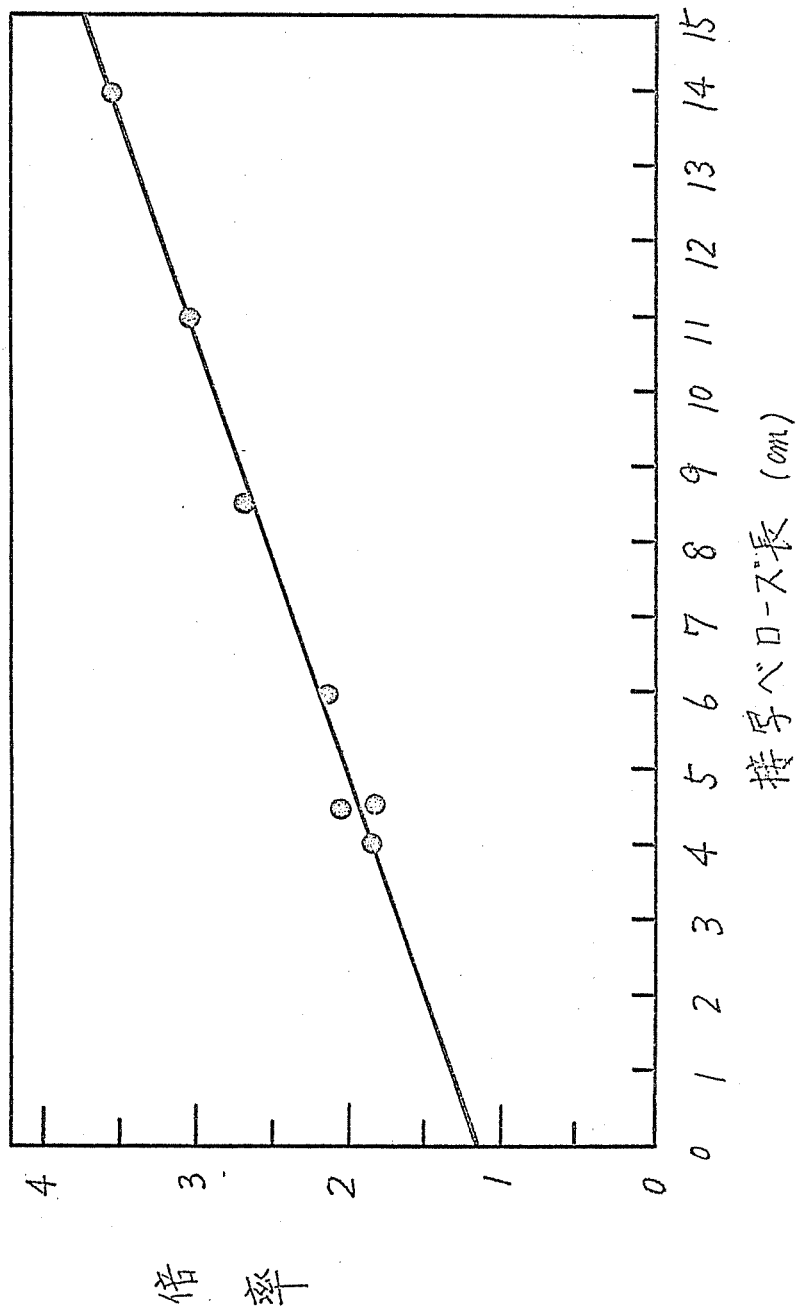
表(2-19) 7ロック強度指標  $f(\sigma_i)$  と 7ロック比強度  $\sigma_i/\sigma_0$

I			II		III	IV	V
補助剤	硫酸アルミニウム 40ppm		$f_e$ の関係		$d_{max}$ ( $S_i=20ppm$ )	$f(\sigma_i)$	$\sigma_i/\sigma_0$
	AL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 $\gamma$ -9 <sup>ppm</sup>	1:30	9.3	$11 \times 10^{-4}$	1.18	0.093	13.38	1.96
活性个イ酸 1ppm	1:30	8.9	$50 \times 10^{-4}$	1.32	0.090	16.72	2.46
了工7ロック 0.2ppm	1:30	9.3	$21 \times 10^{-4}$	0.97	0.245	160.1	23.3
PAC 40ppm (硫酸アルミニウム 換算)	1:30	9.3	$8 \times 10^{-4}$	1.17	0.092	18.71	2.74



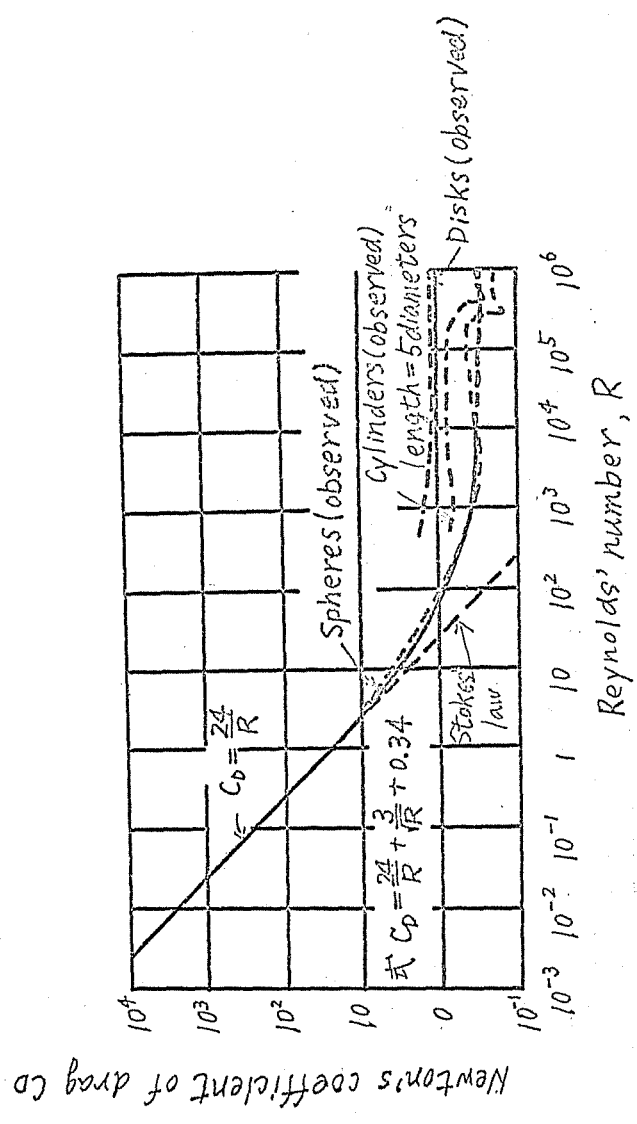
図(2-1) フロック密度測定装置

(縮尺 1/5, 単位 mm)

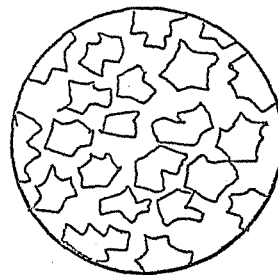
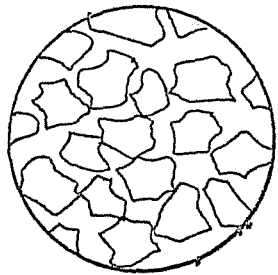
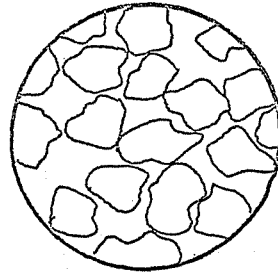
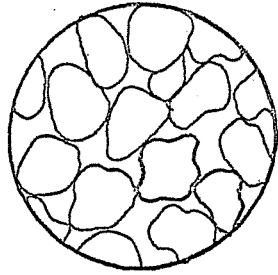


図(2-2) 接写ベローズ長と撮影倍率の関係

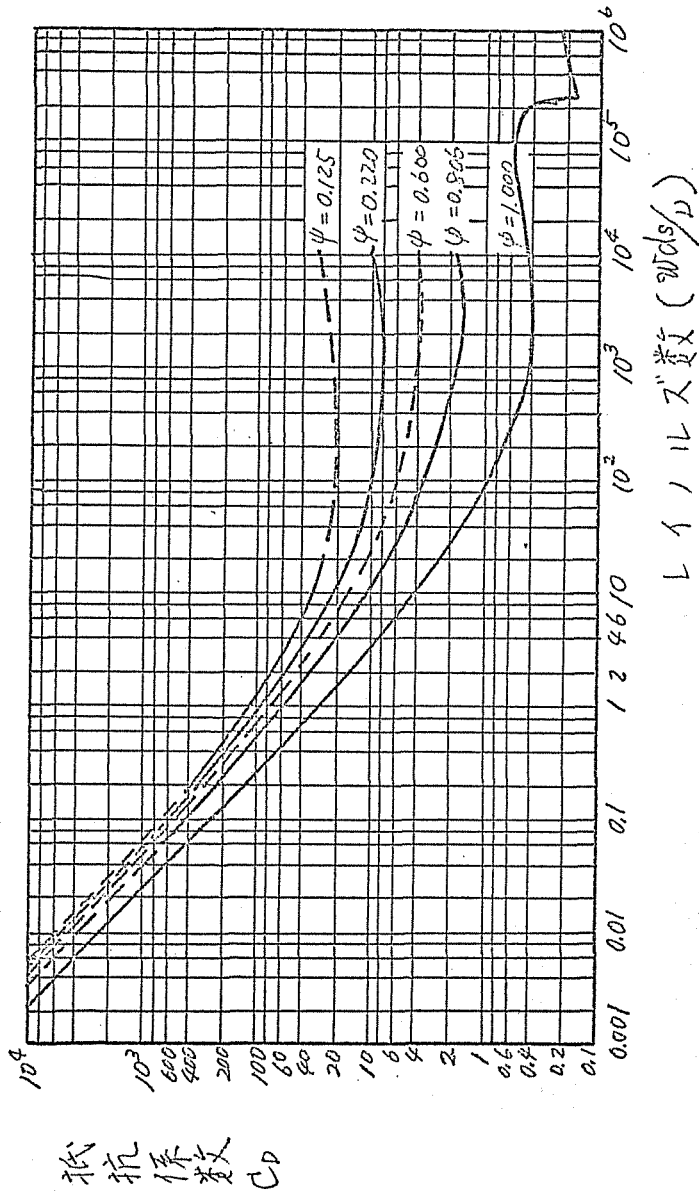




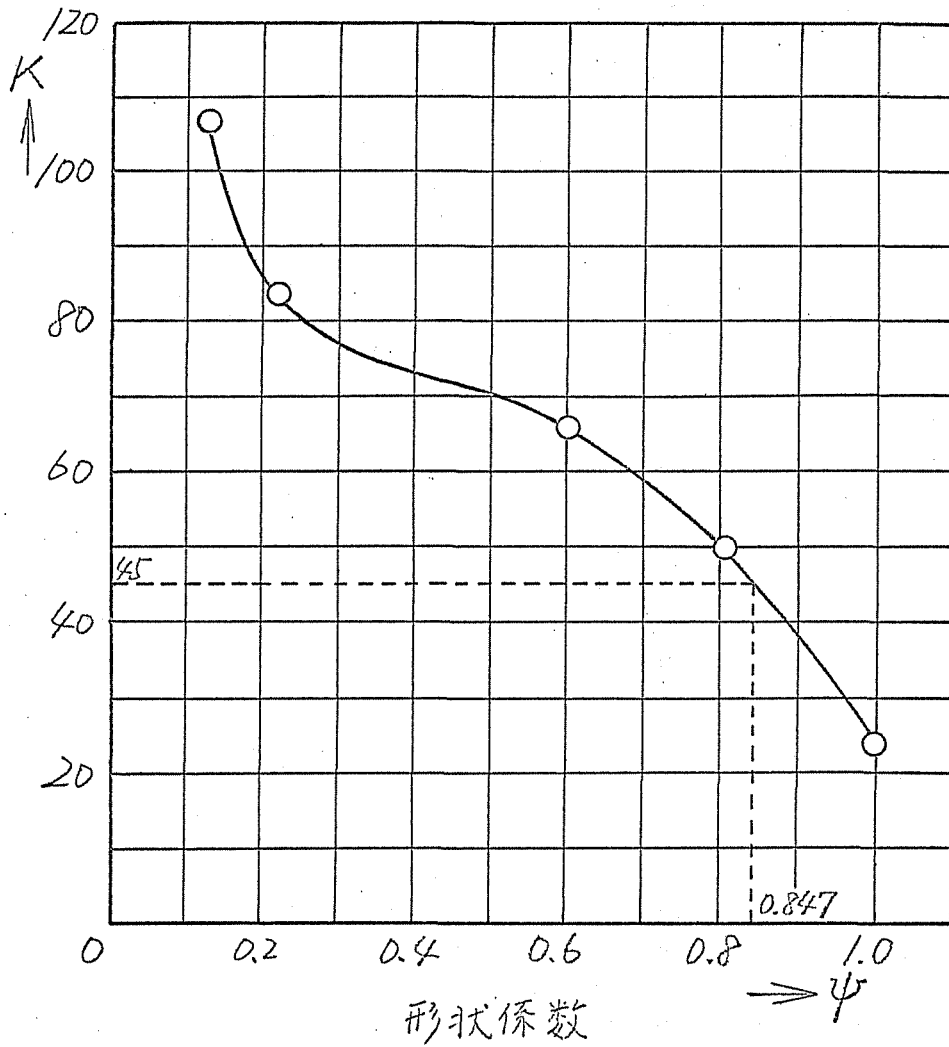
図(2-3) レイノルズ数と抵抗係数の関係



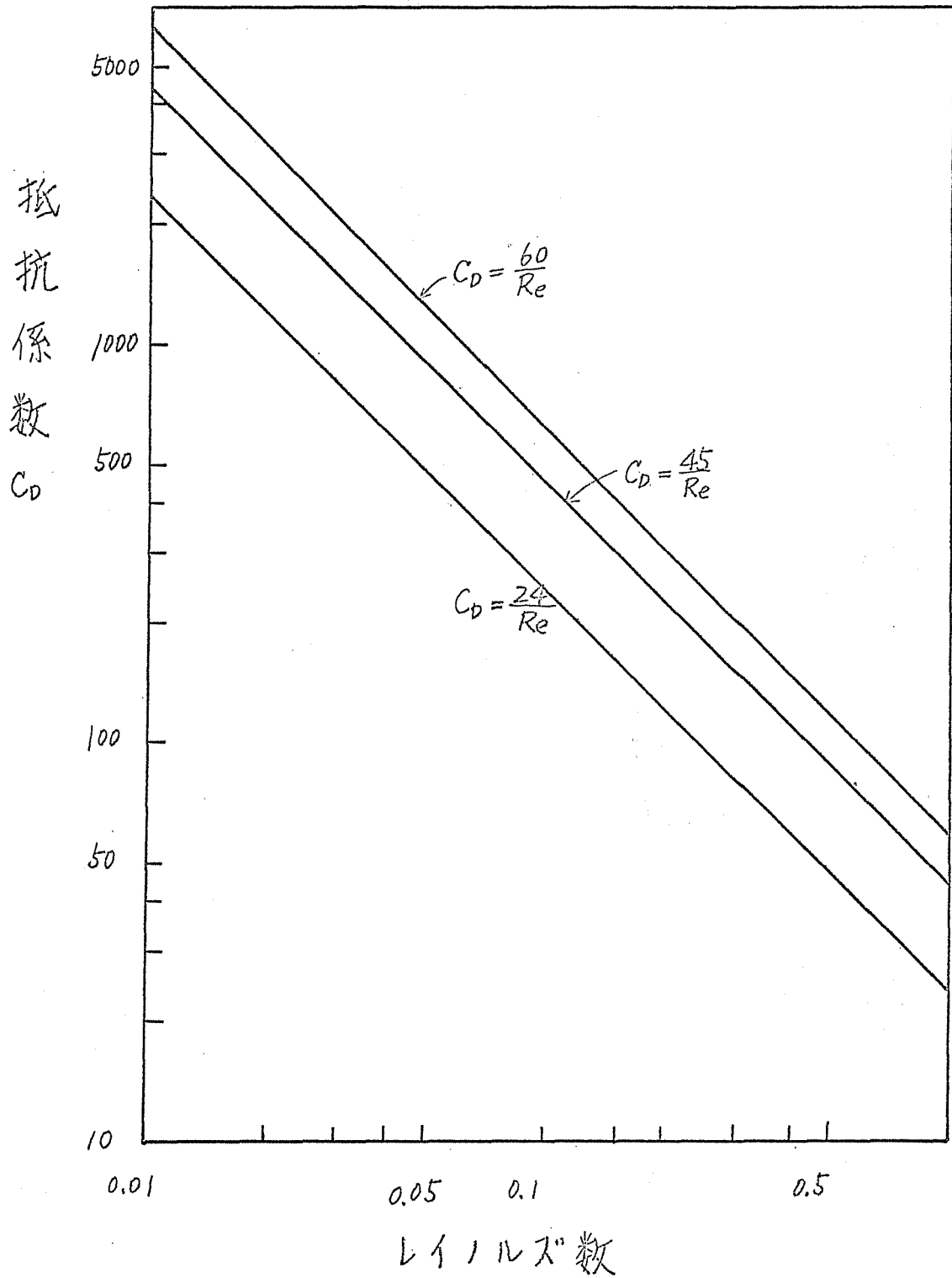
图(2-4) 粒形と形状形数( $\psi$ )



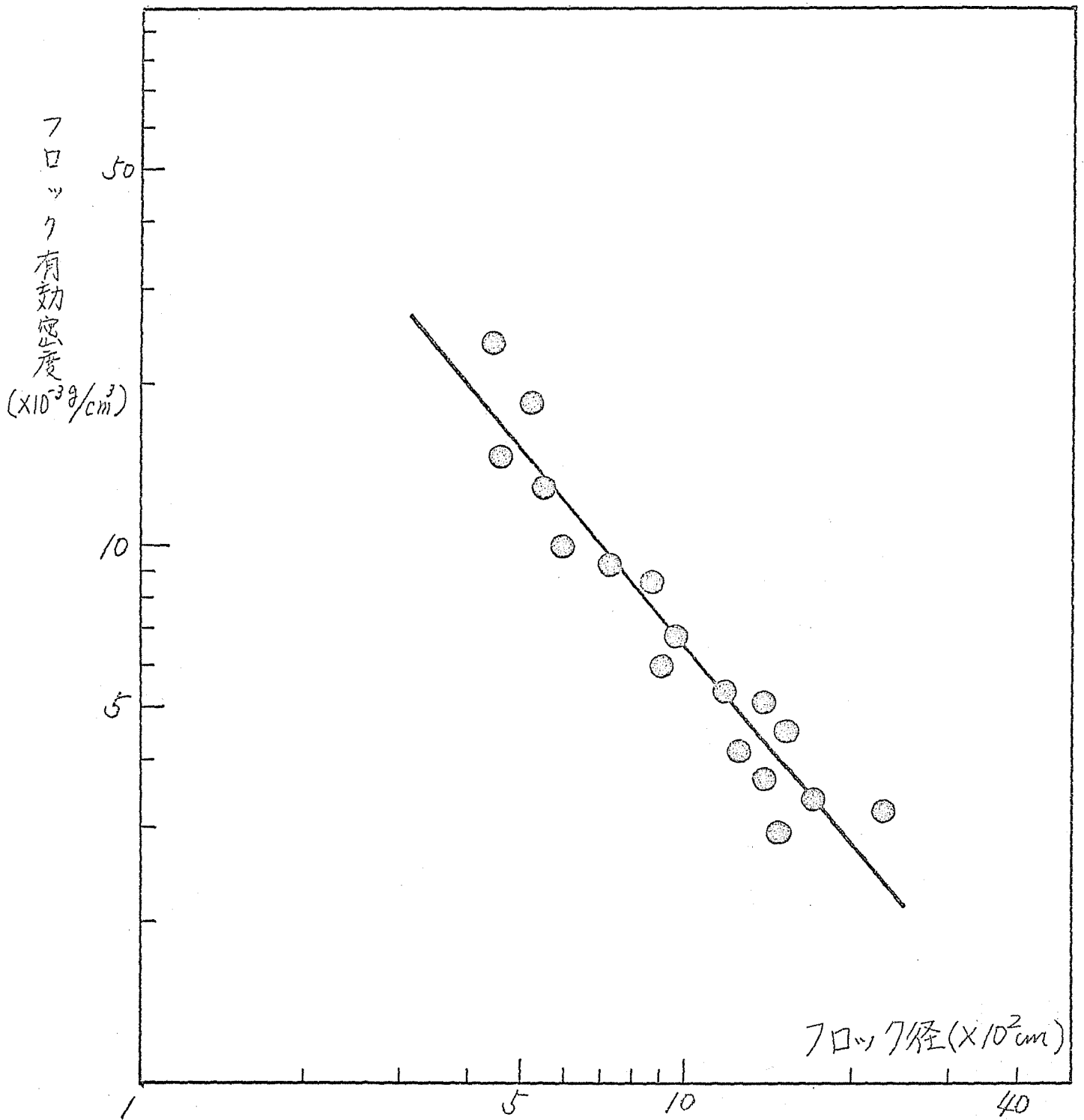
図(2-5) 種々の形状係数でのレイノルズ数と抵抗係数の関係



図(2-6) 形状係数とKの関係

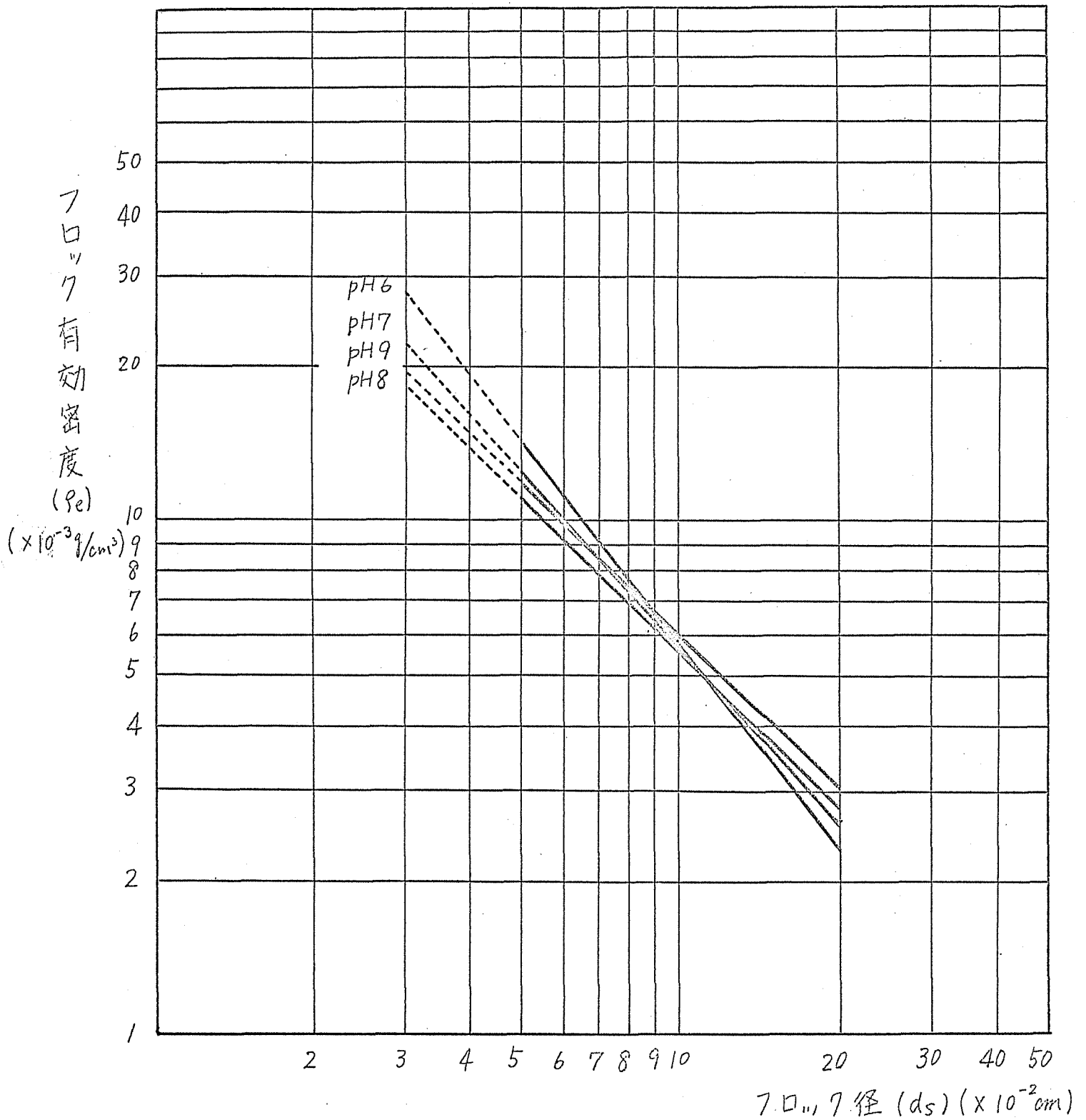


図(2-7) スト-クス領域におけるレイノルズ数と抵抗係数の関係



濁度 50ppm, PAC 2ppm, pH 7

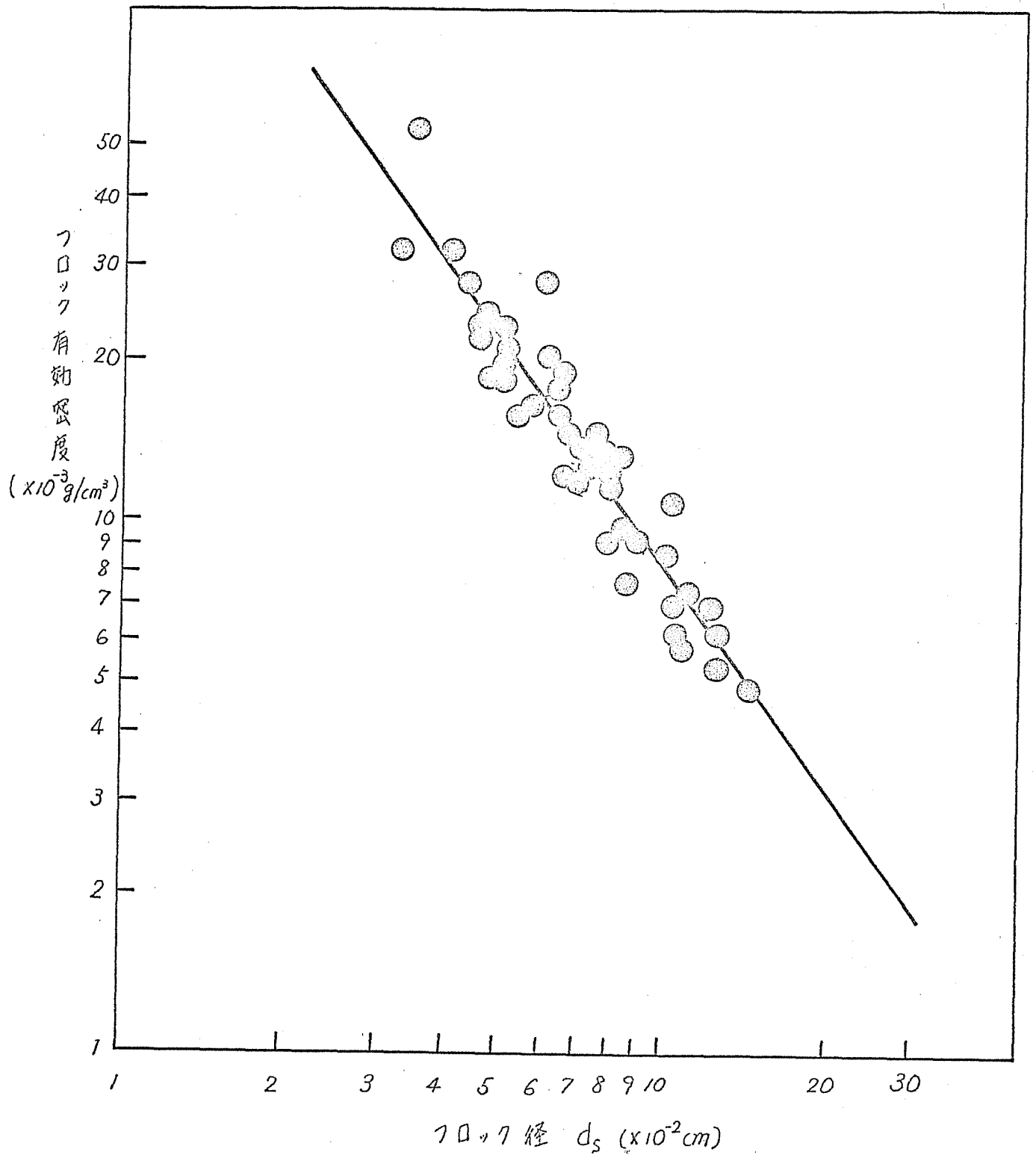
図(2-8) フロック径とフロック有効密度の関係



フロック密度関数のプロット

(濁度 20ppm、ホリ塩化アルミニウム 1ppm)

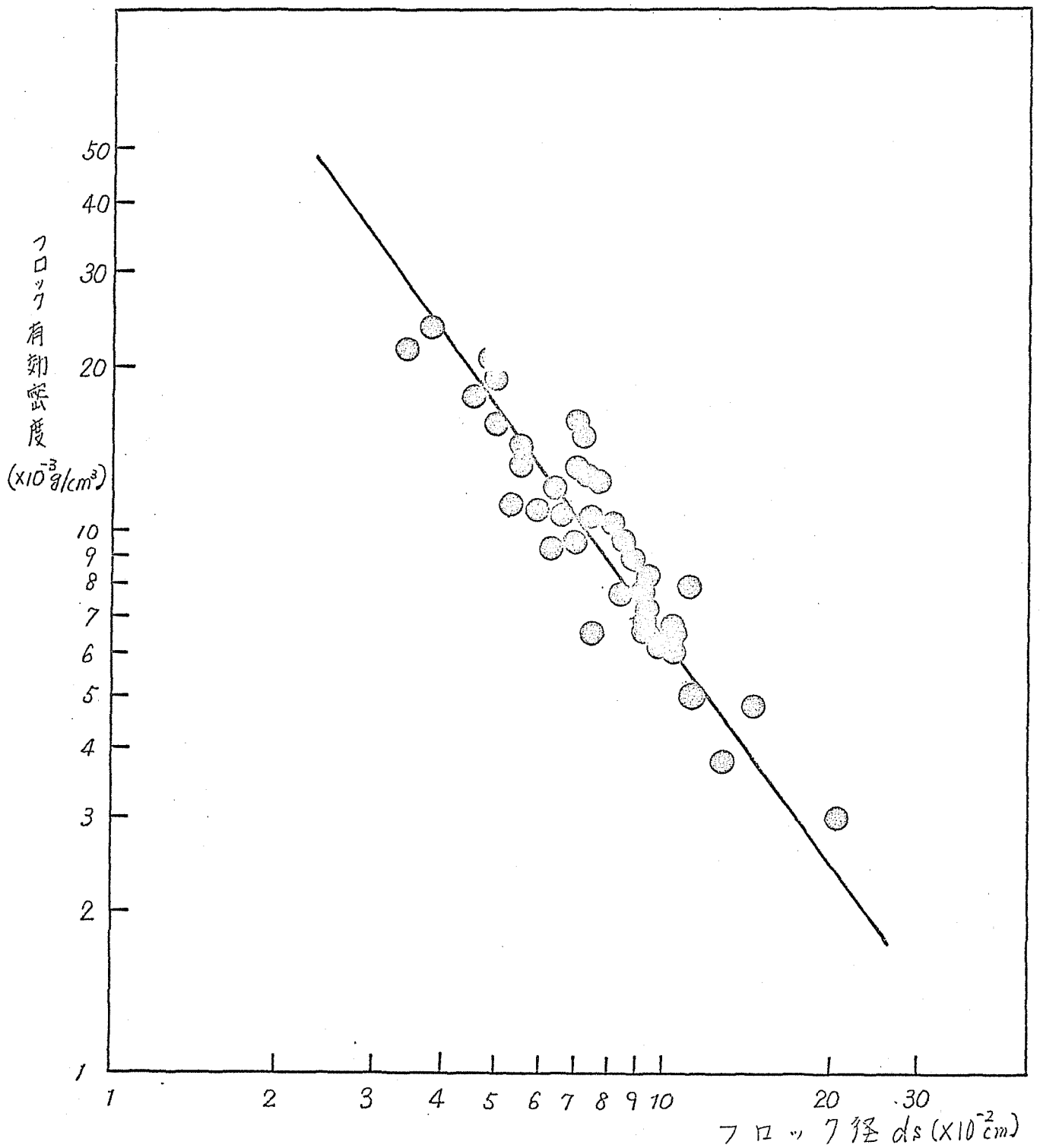
図(2-9) フロック密度に対する凝集pHの影響



図(2-10) フロック密度 $\kappa$ 及び凝集 $pH$ の影響

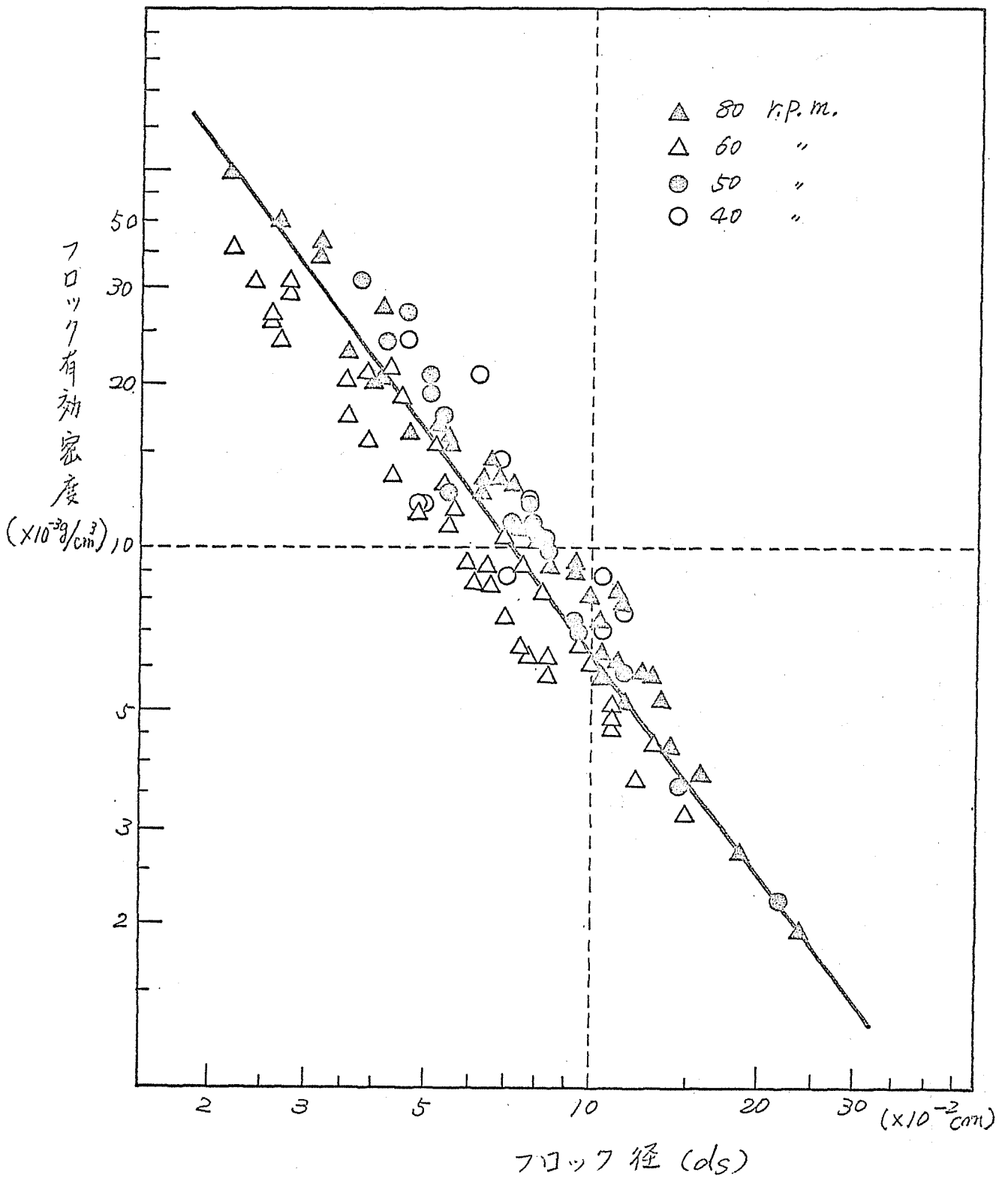
(濁質濃度 50 ppm, 硫酸アルミニウム 30 ppm の  
 $pH = 7.0 \sim 9.0$  の測定値をまとめたもの)



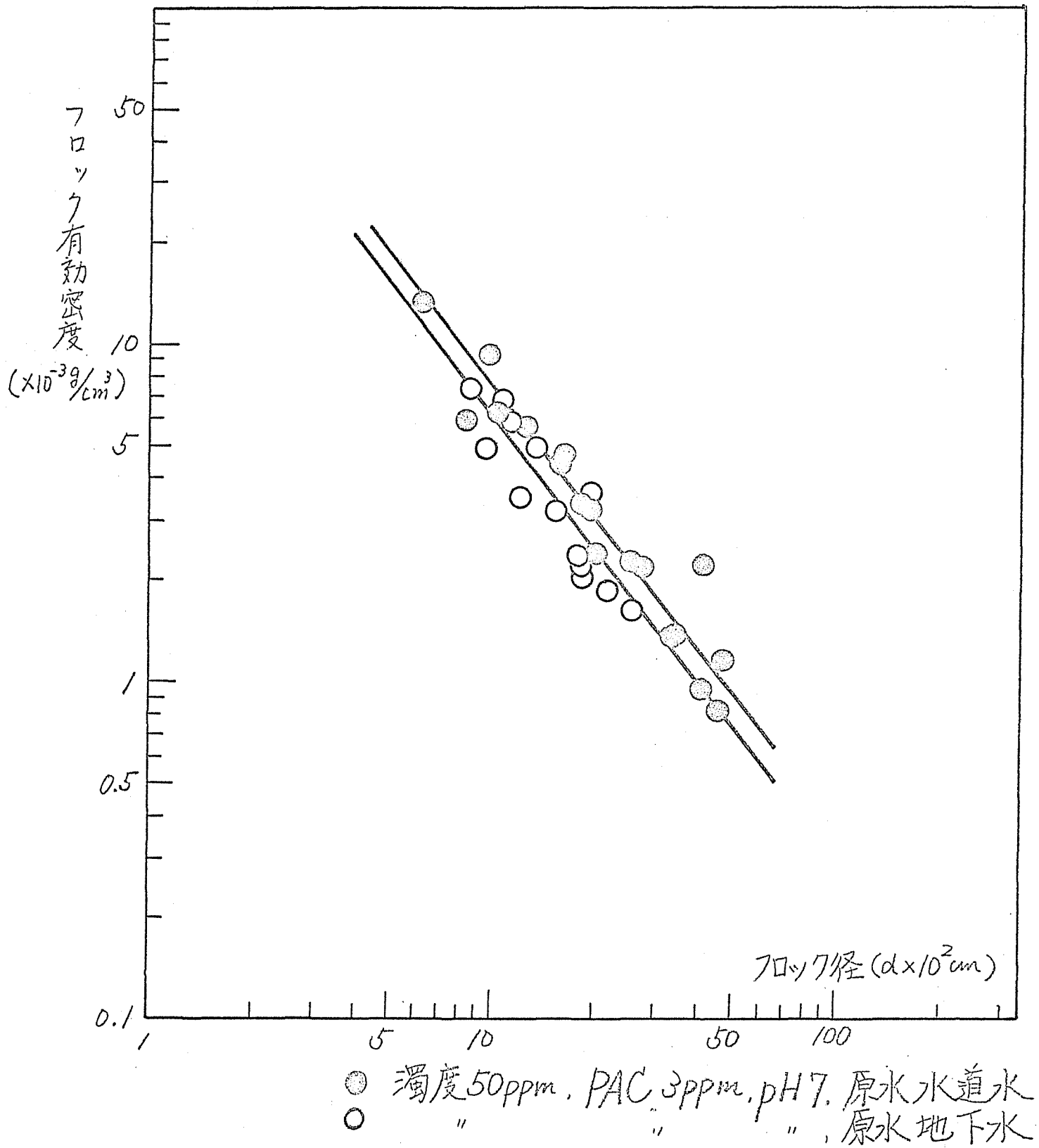


図(2-11) フロック密度に及ぼす凝集 pH の影響

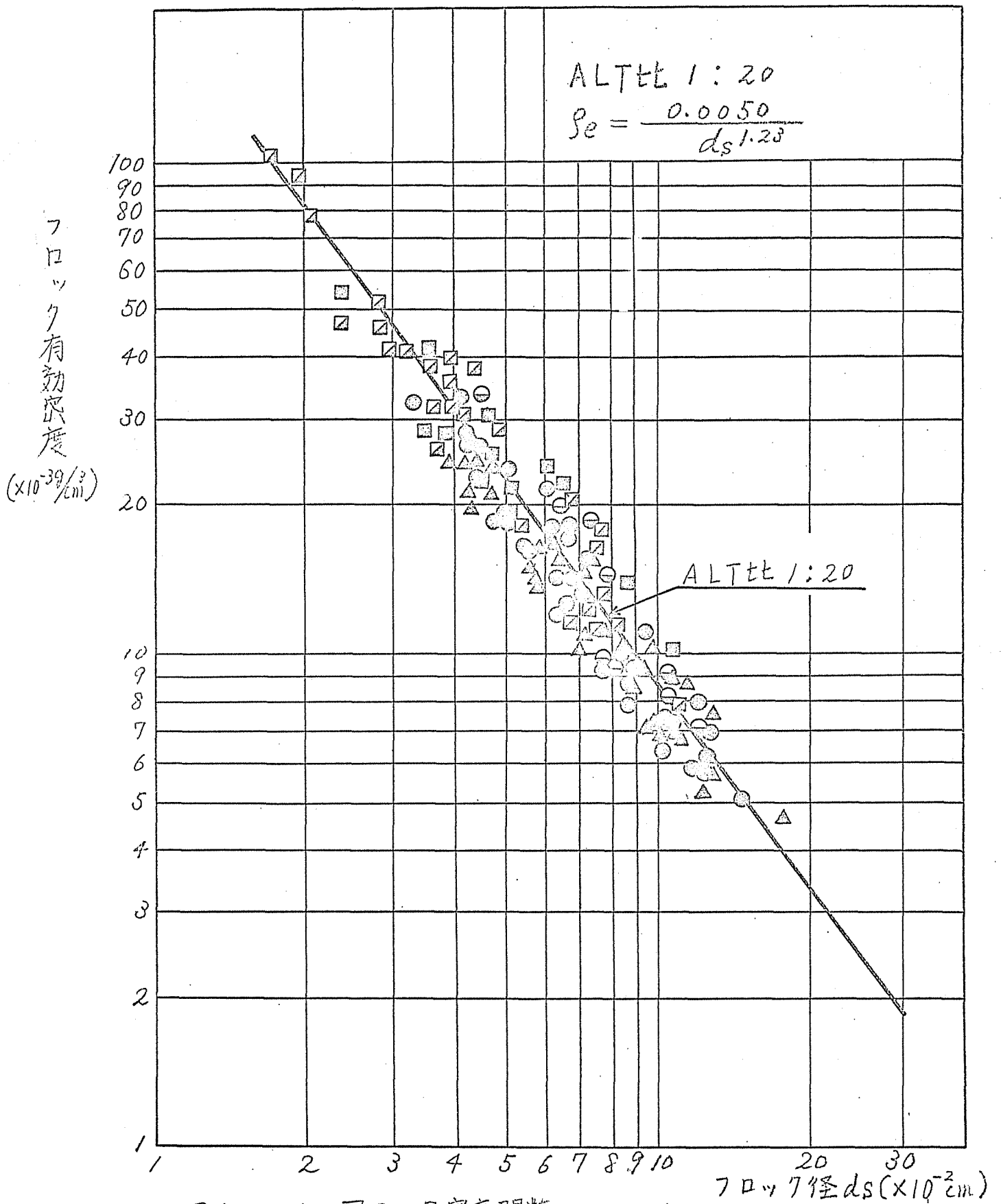
(濁質濃度 50ppm, 硫酸アルミニウム 40ppm の)  
 pH=7.0~9.0 の測定値をまとめたもの



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

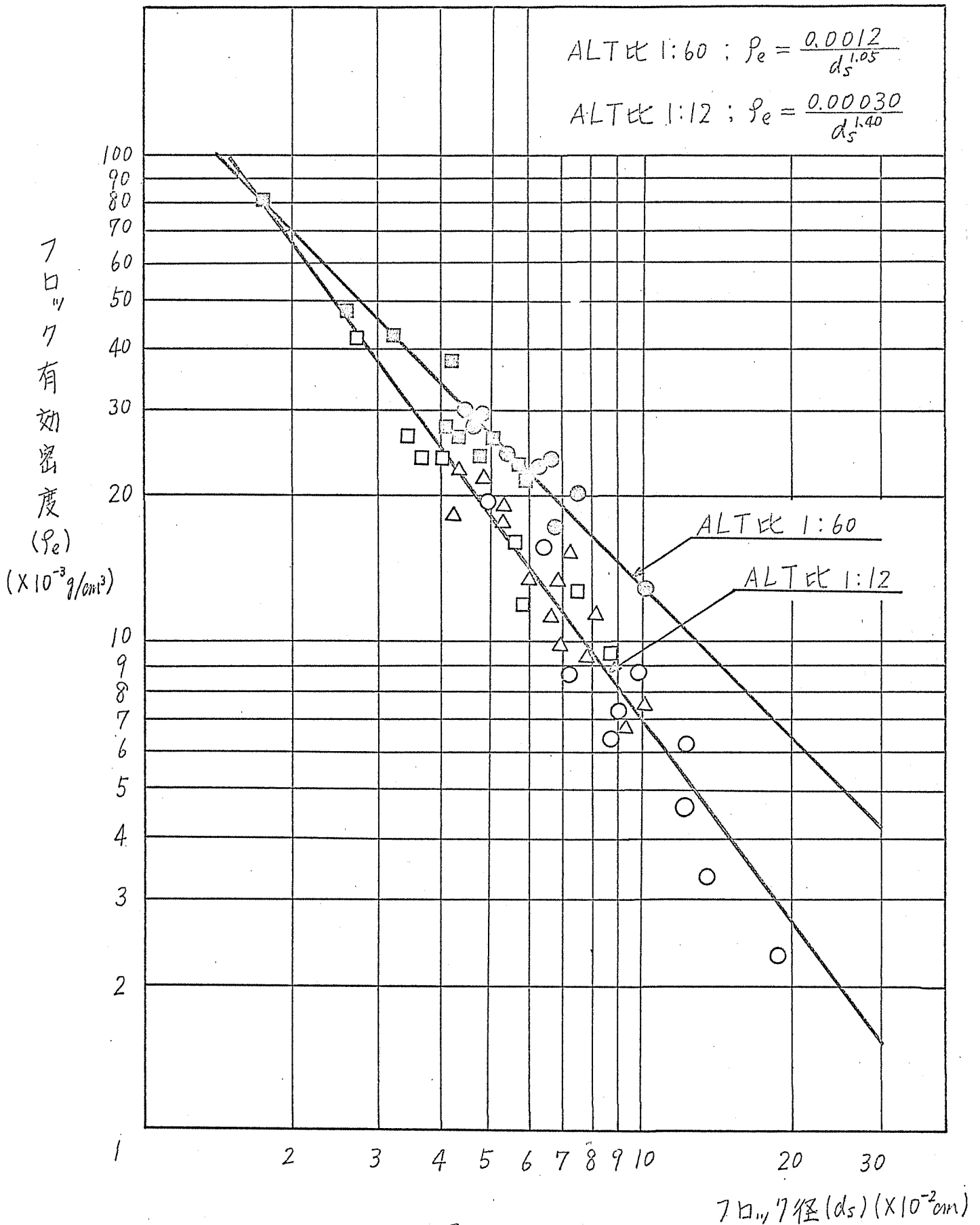


図(2-13) フロック密度に及ぼす原水水質の影響



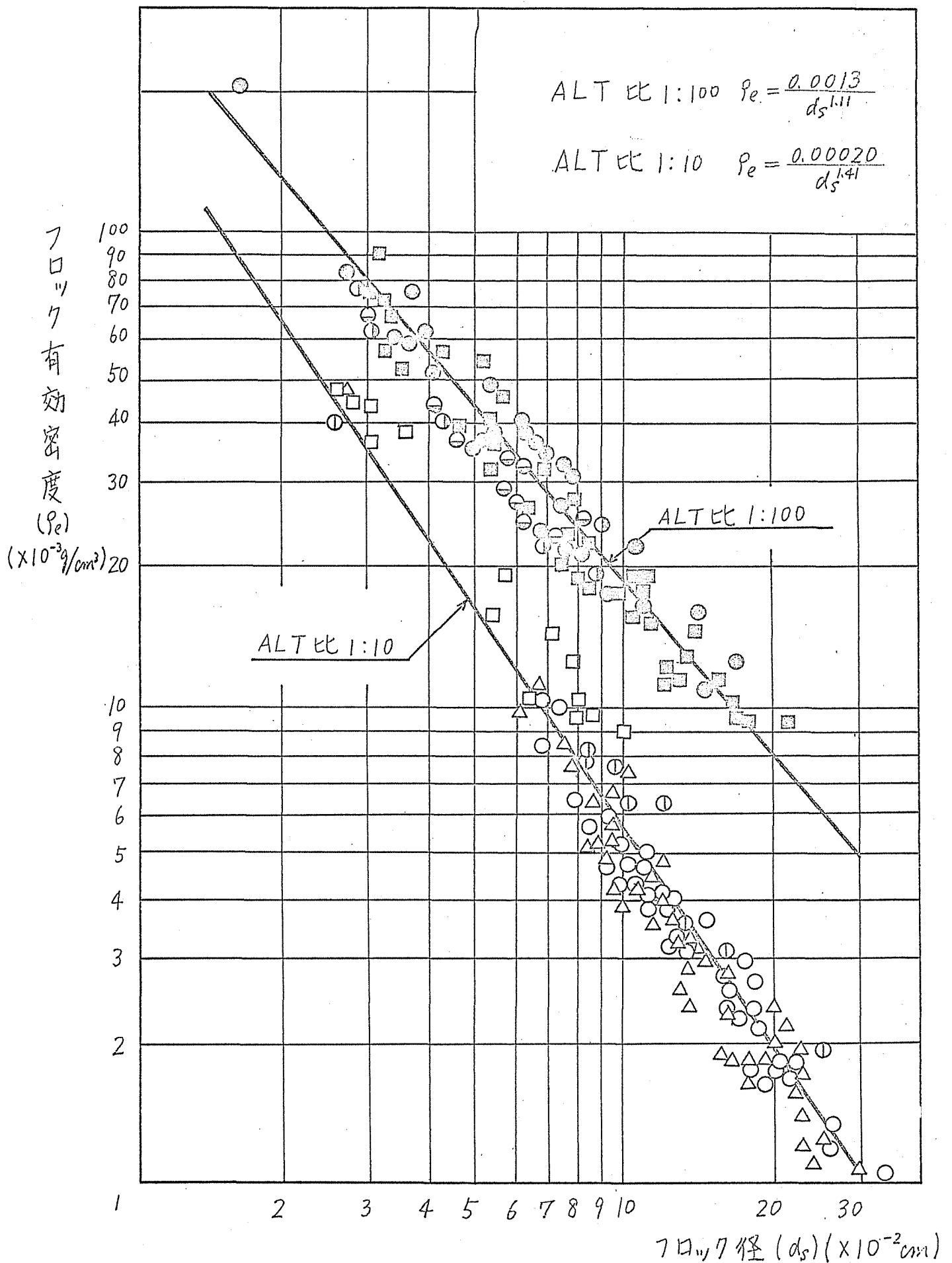
図(2-14) フロック密度関数のプロット

(硫酸アルミニウム ALT比 1:20)

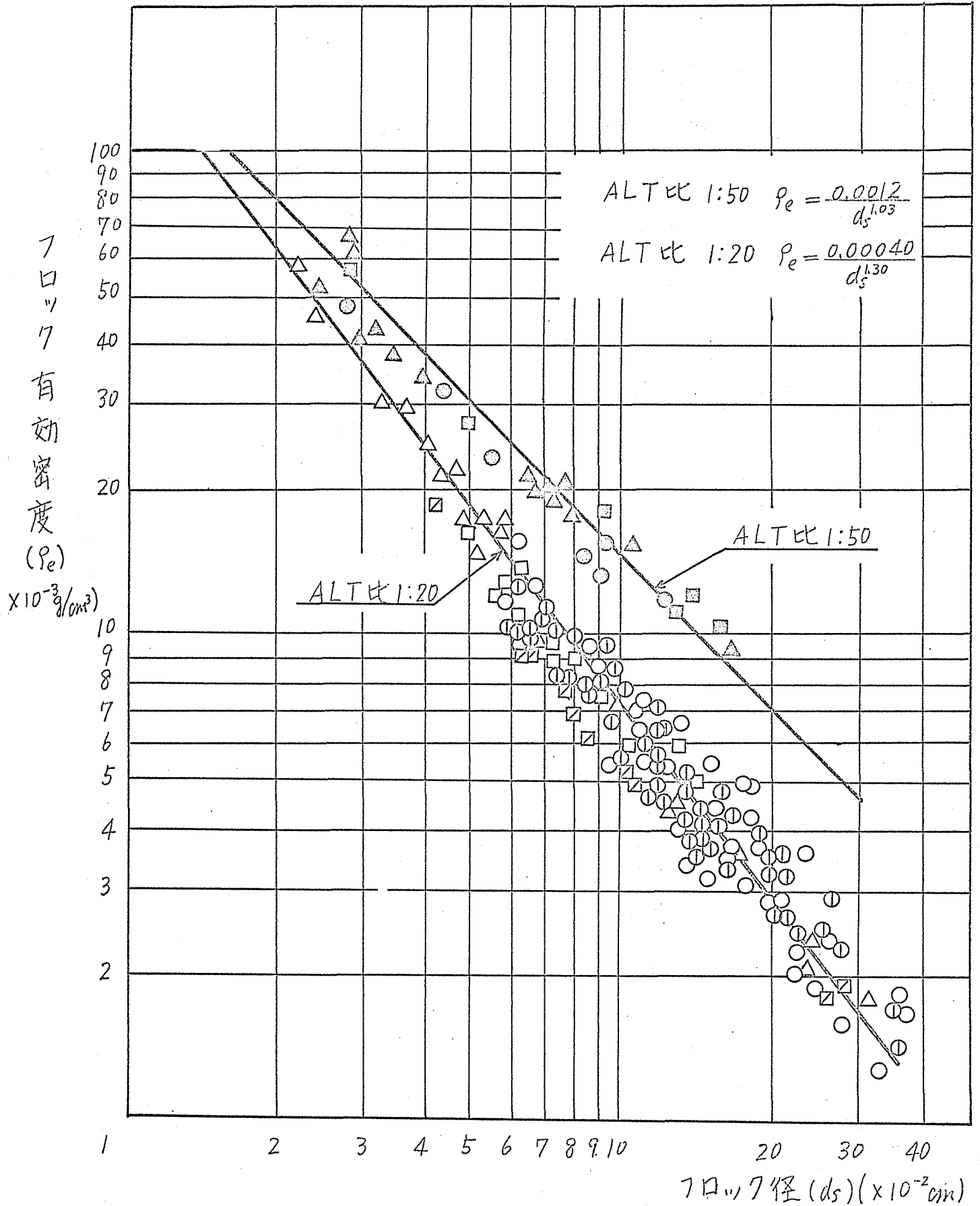


図(2-15) フロック密度関数のフロッット

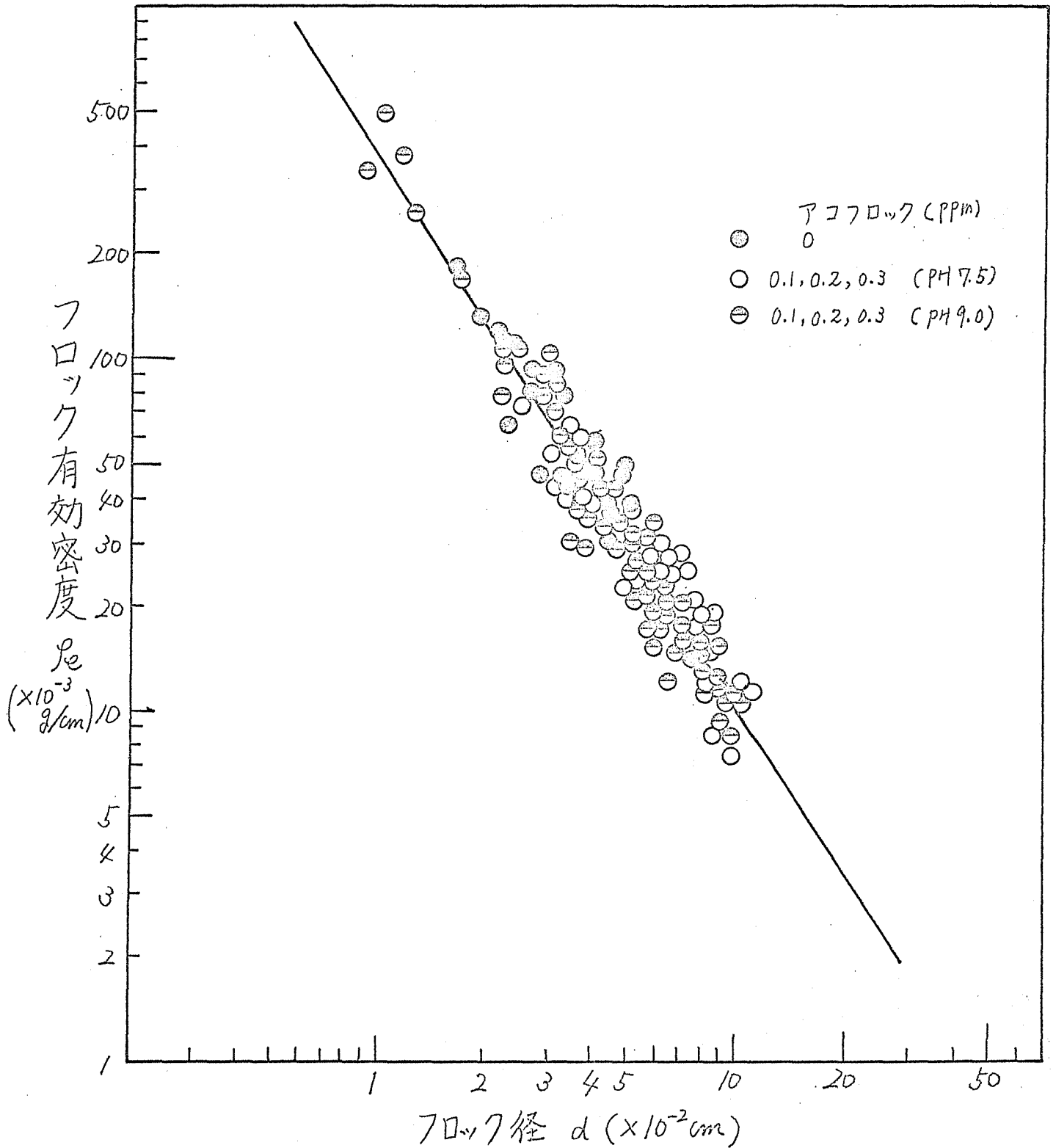
(硫酸アルミニアム ALT比 1:60, ALT比 1:12)



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

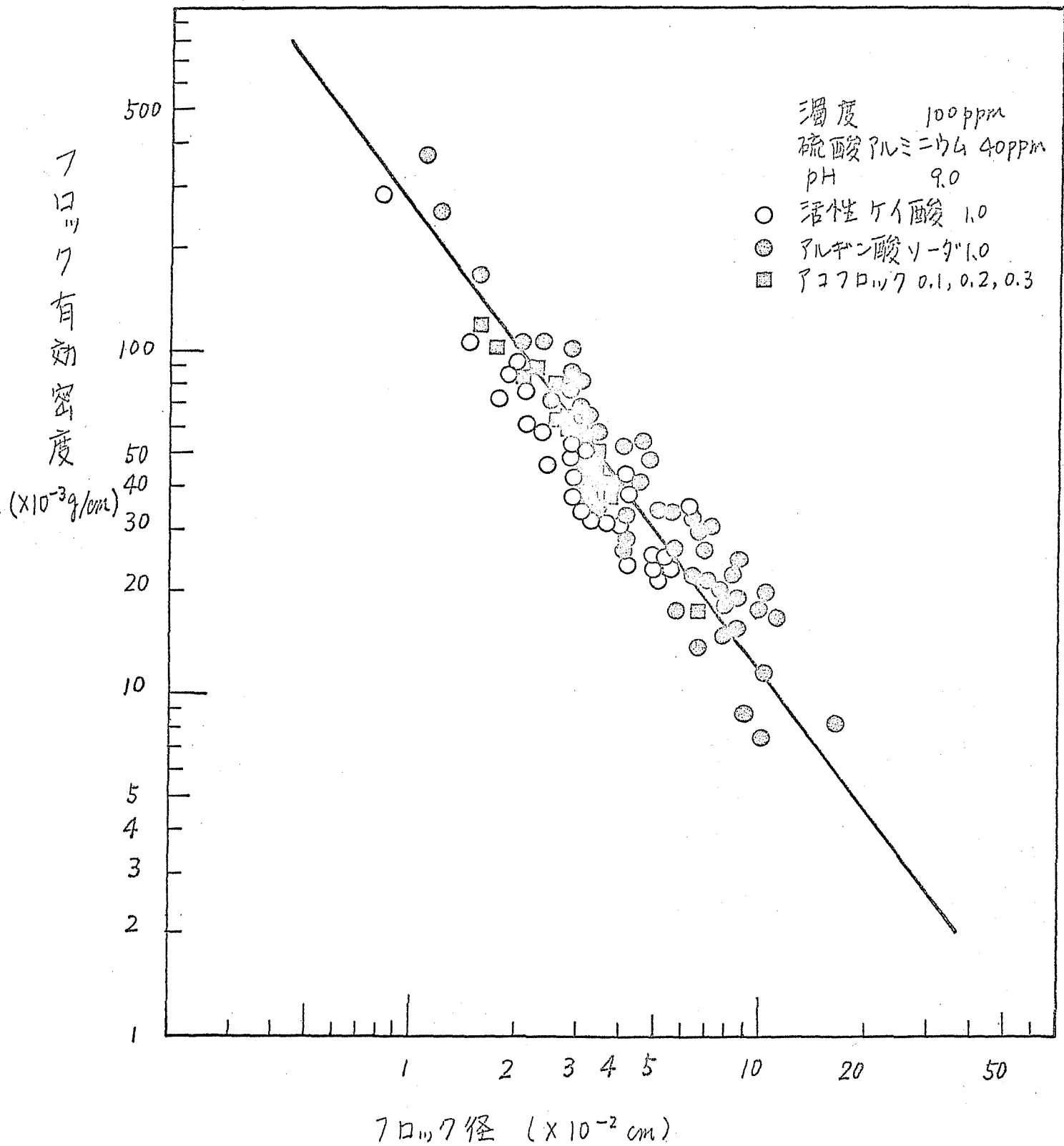


図(2-17) フロウ密度関数のフローット  
 (ポリ塩化アルミニウム ALT比 1:50, ALT比 1:20)

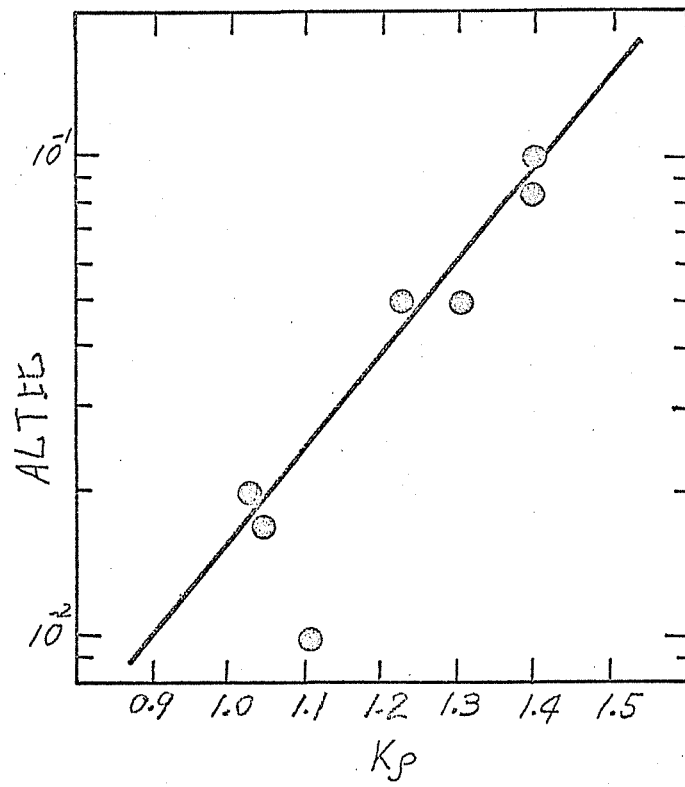
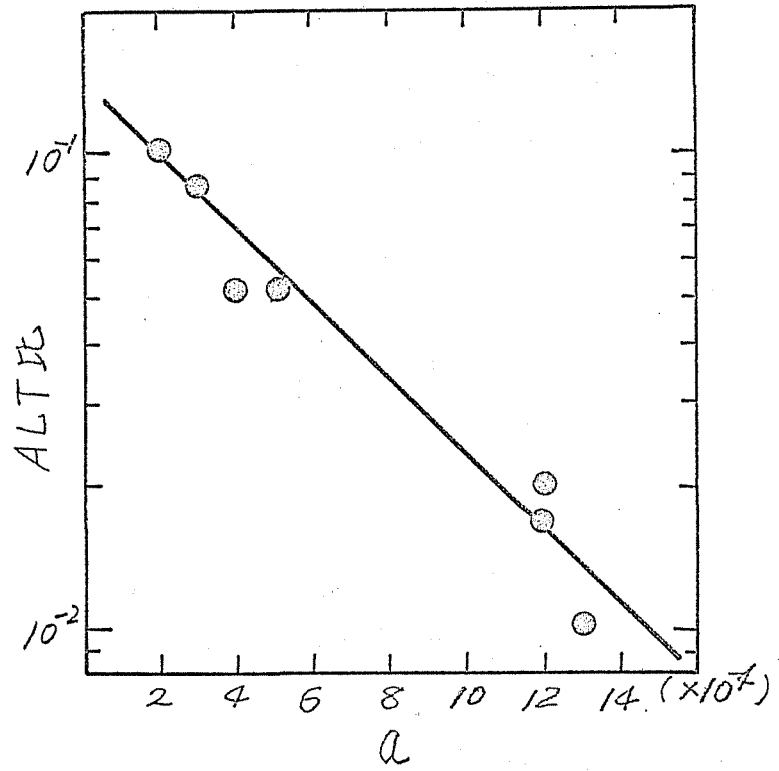


図(2-18) フロック密度に及ぼすフロック形成補助剤の影響  
 69

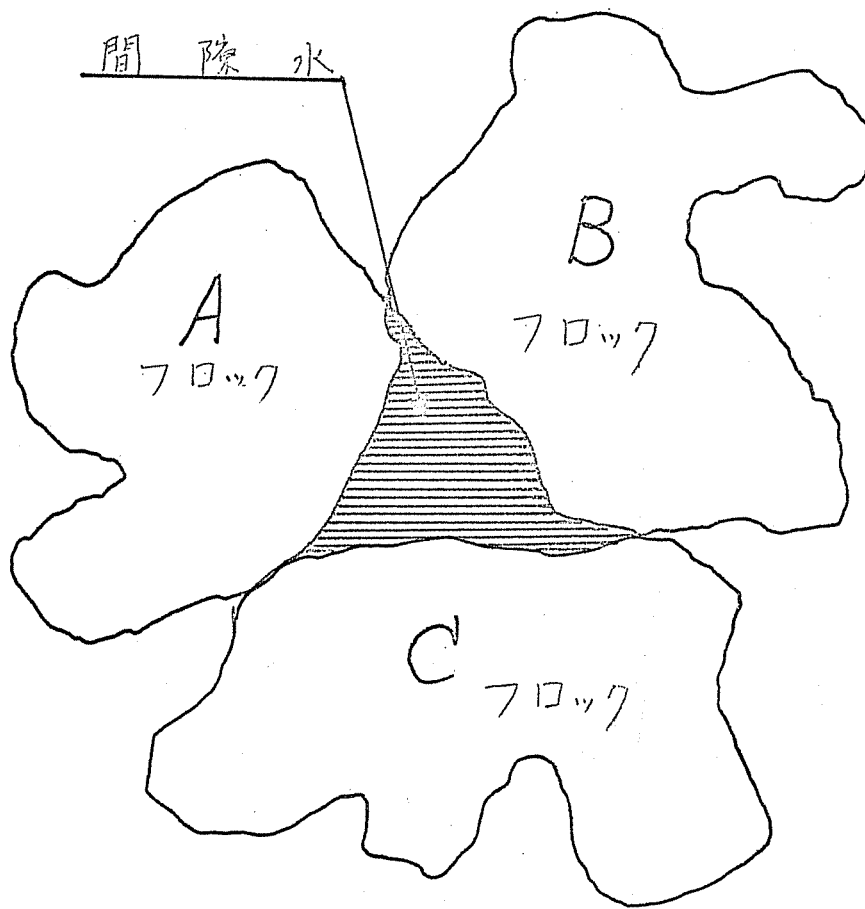




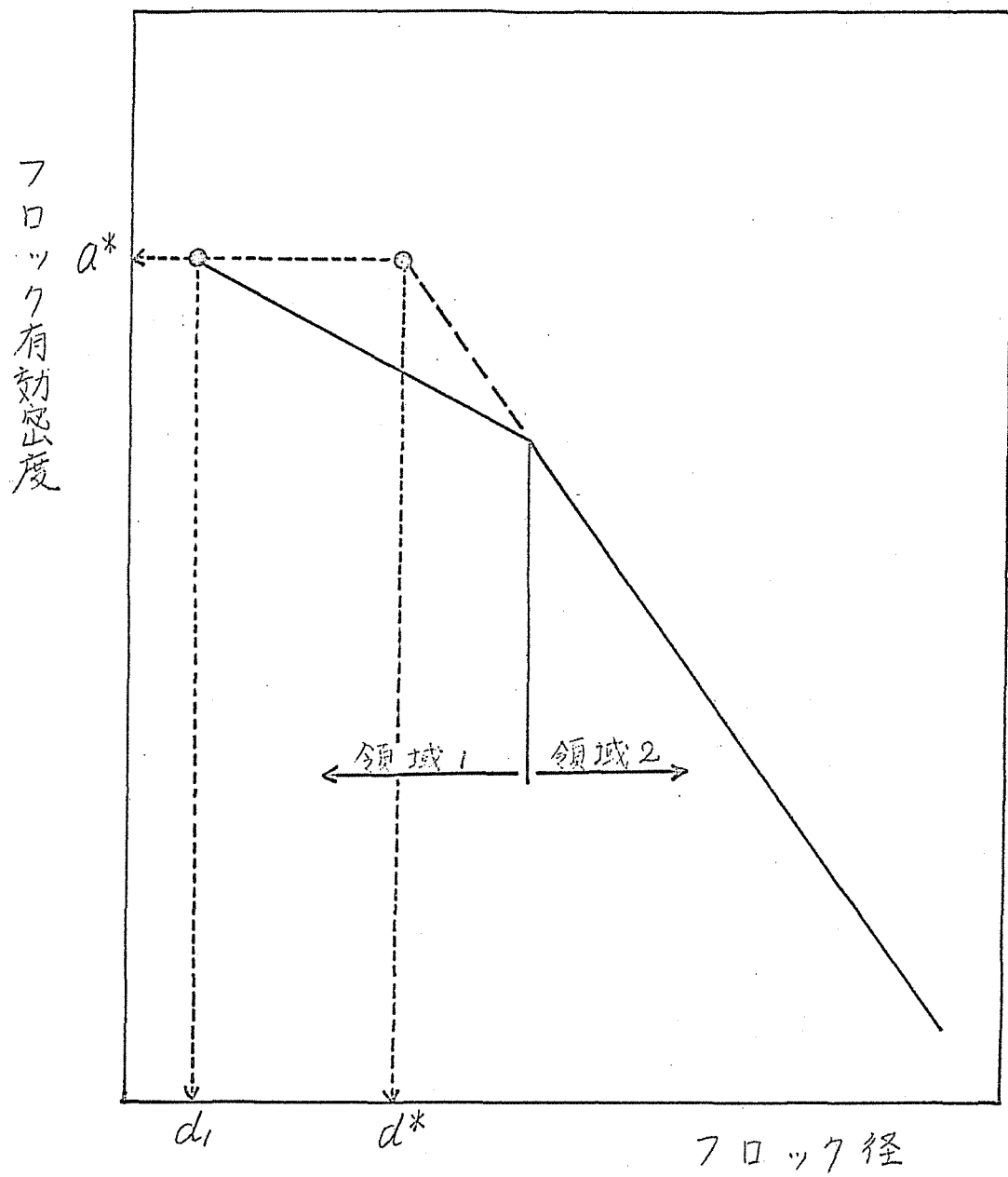
図(2-19) フロック密度 $\kappa$ 及ぼすフロック形成補助剤の影響



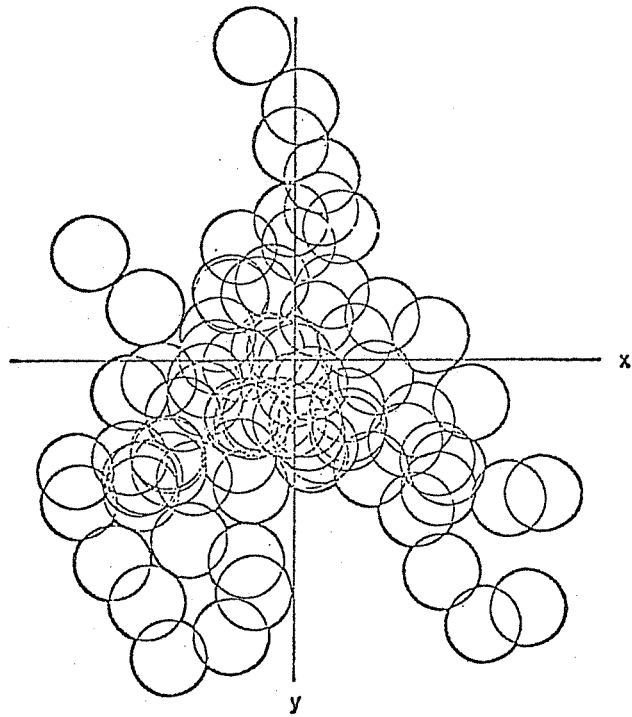
図(2-20) ALT比と密度関数の定数  $a, K_p$



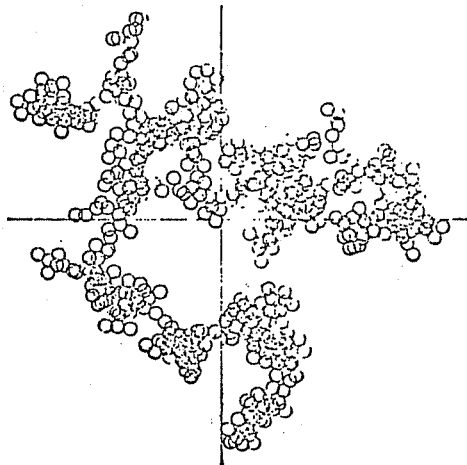
図(2-21) ブロックの結合模式図



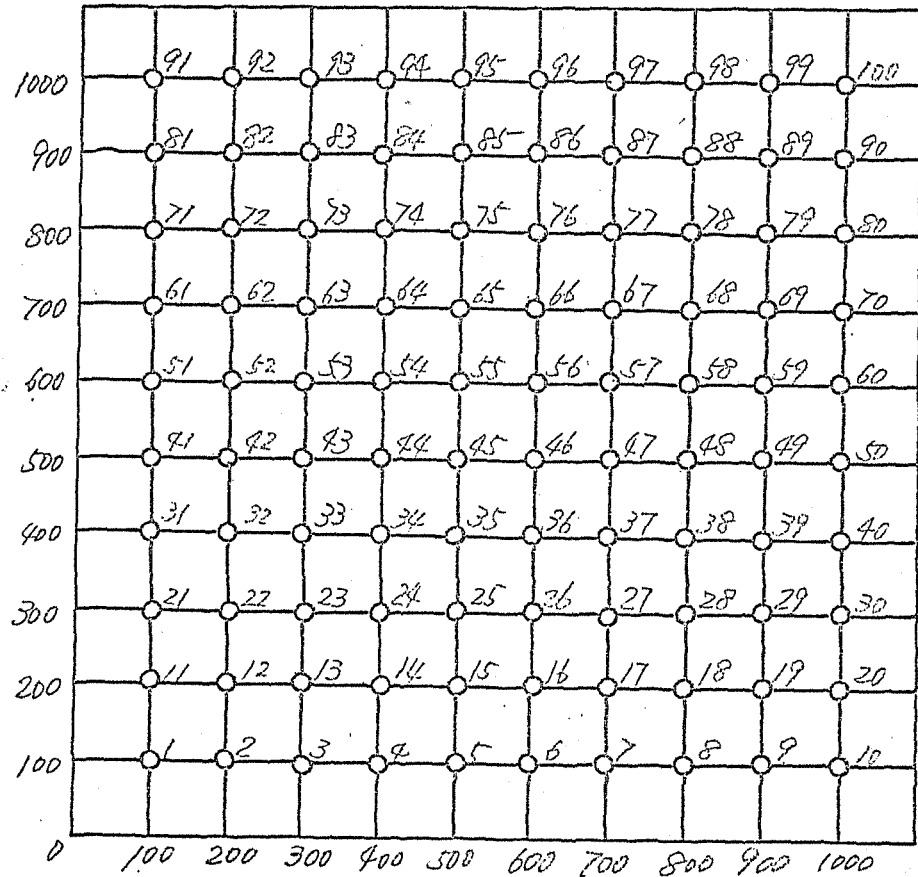
図(2-22) 小粒径側のフロック密度関数



図(2-23) Voldのモデルフロック

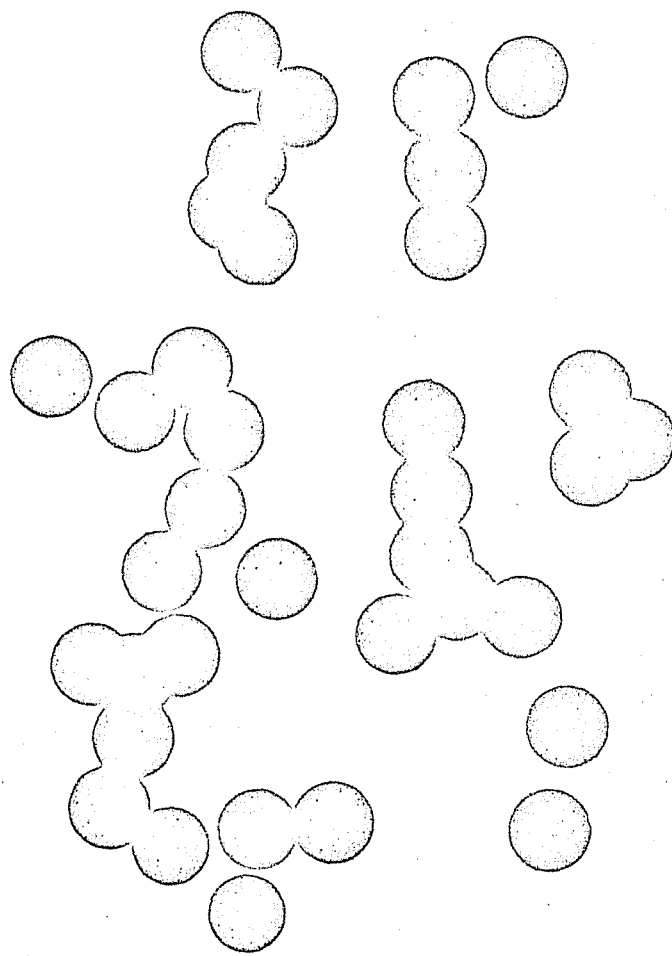


図(2-24) Sutherlandの  
モデルフロック

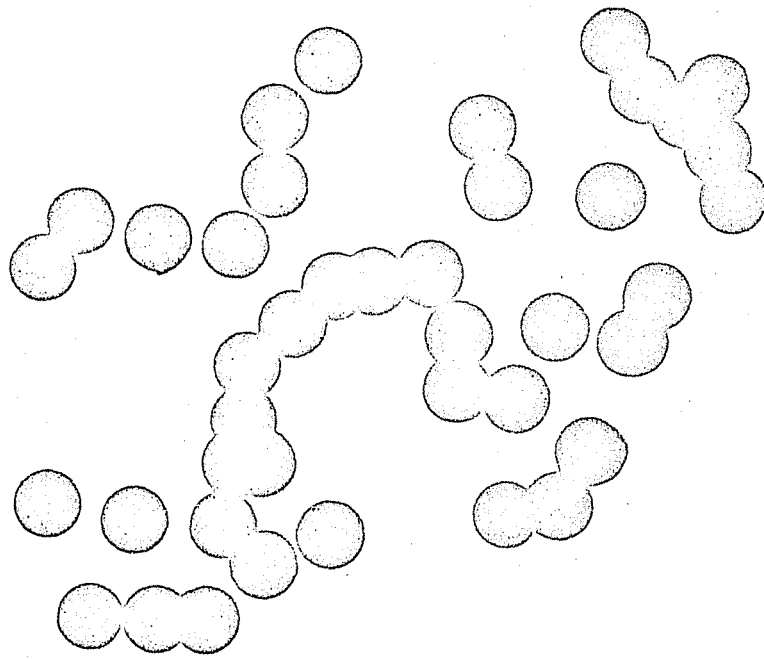


図(2-25) モデルの格子着地

{座標(100, 1000)は91番地, (300, 500)は43番地と表ゆす。}

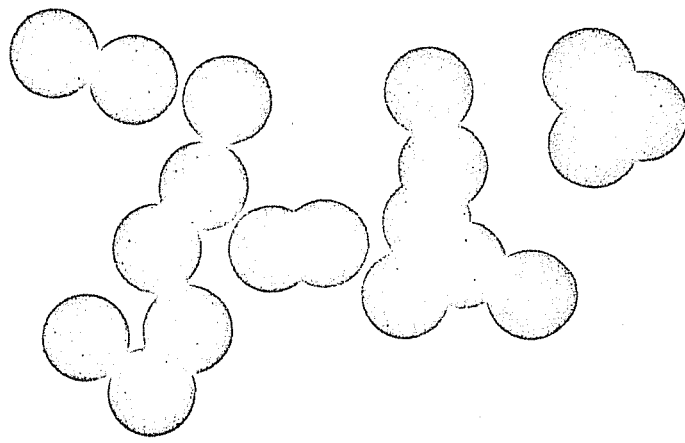


図(2-26) 表(2-18)のデータによるモデルフロッグ  
37個の初期粒子で構成されている。

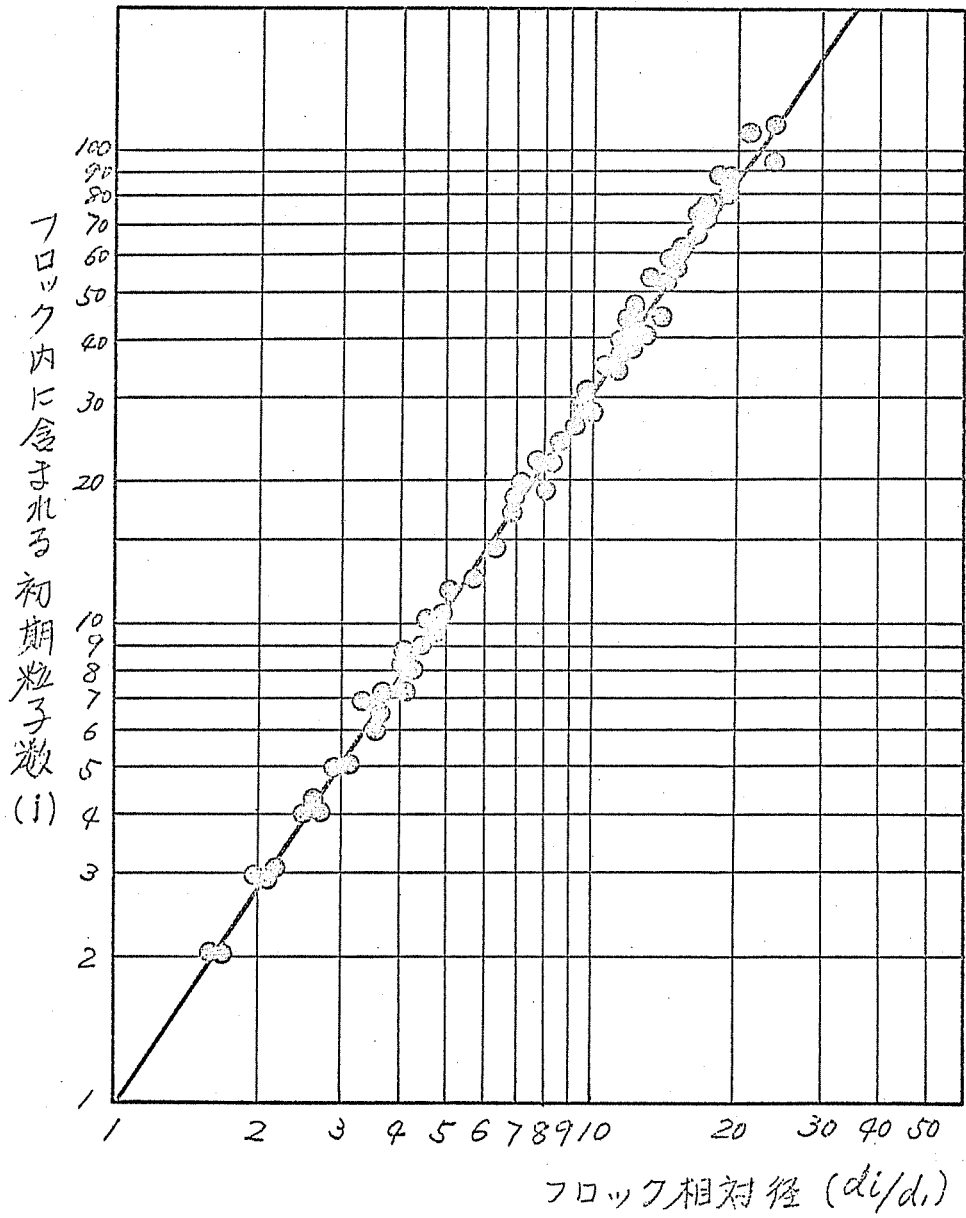


図(2-27) モデル7ロッド  
44個の初期粒子で構成されている。

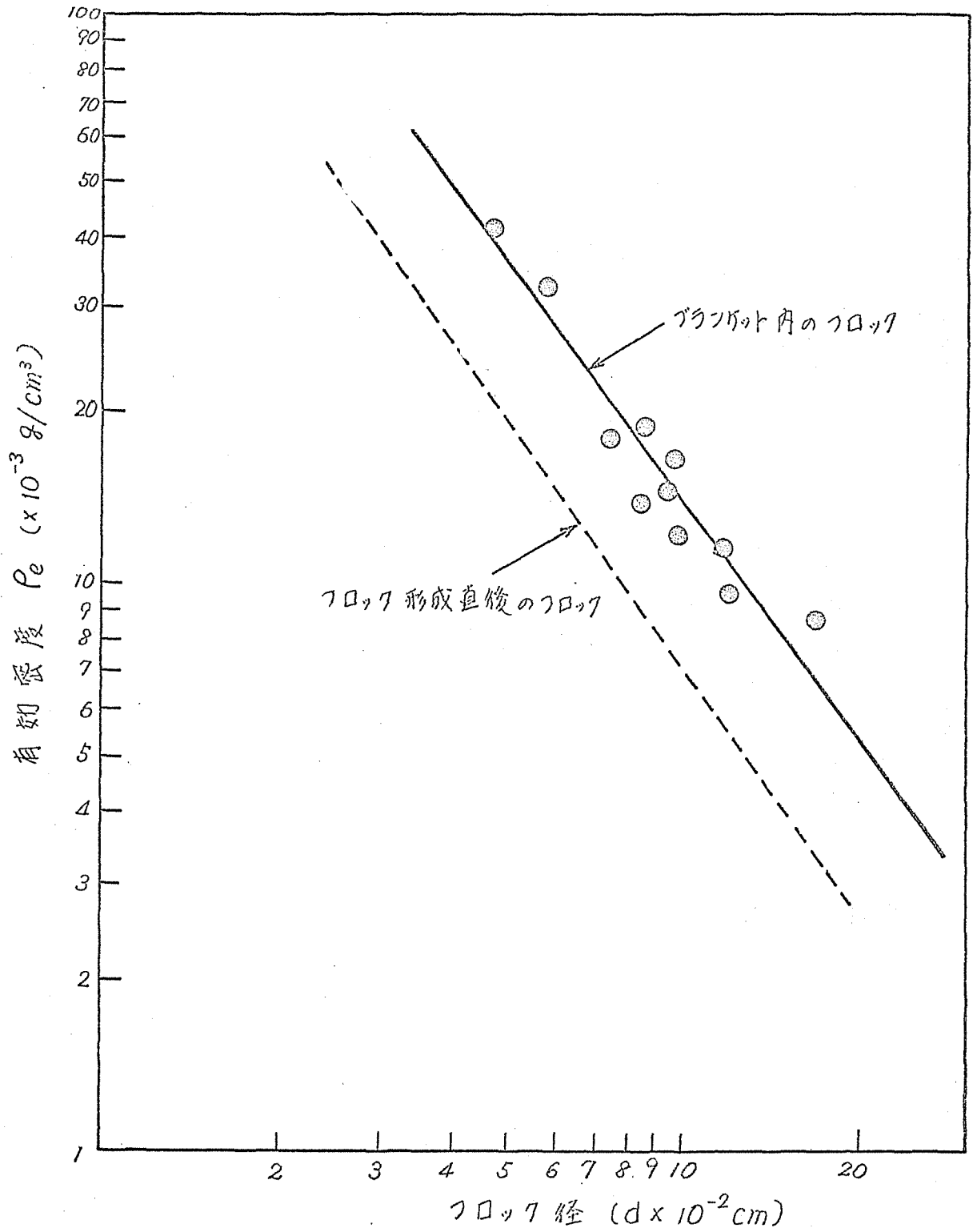




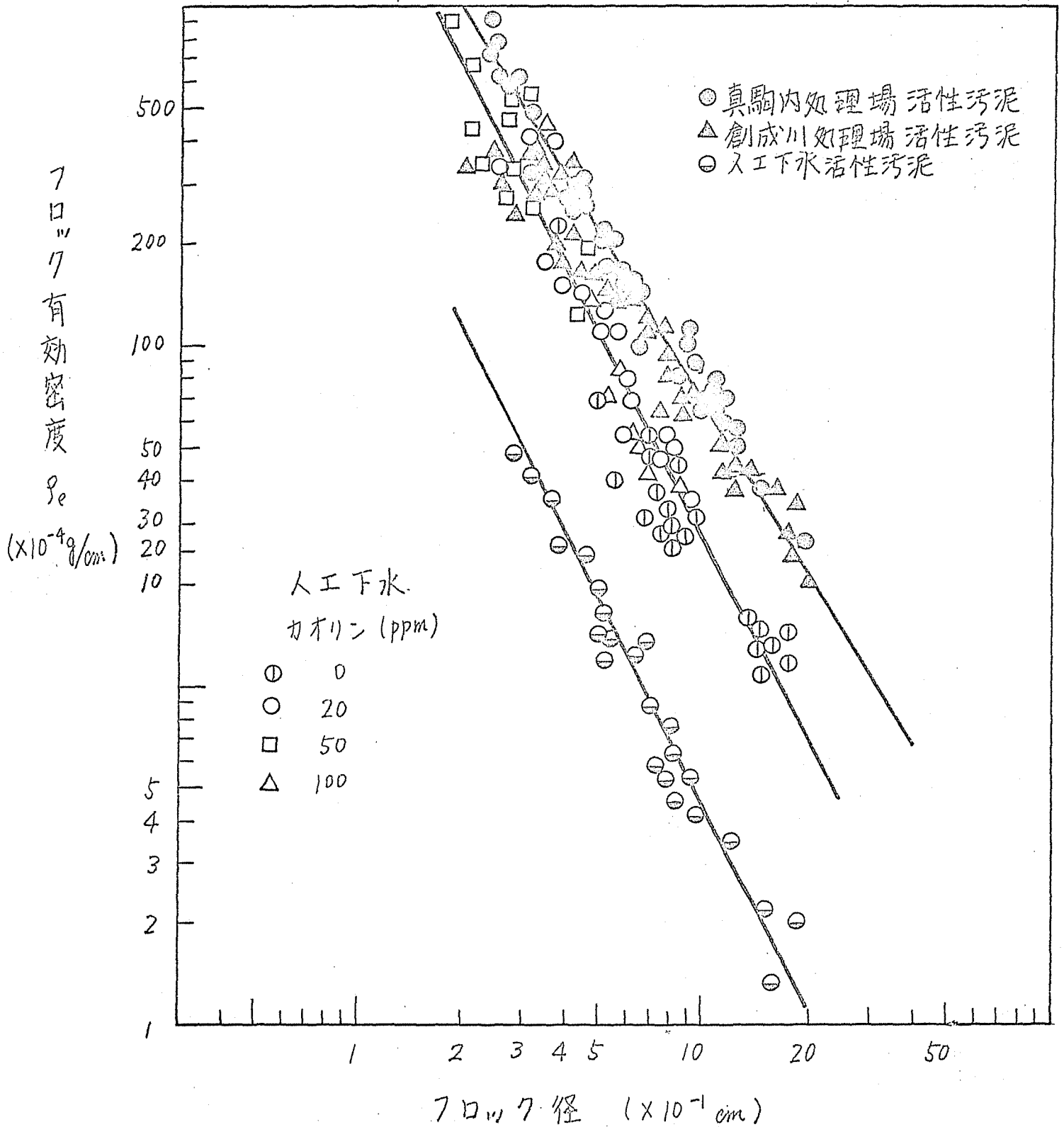
図(2-28) モデル7ブロック  
19個の初期粒子で構成されている



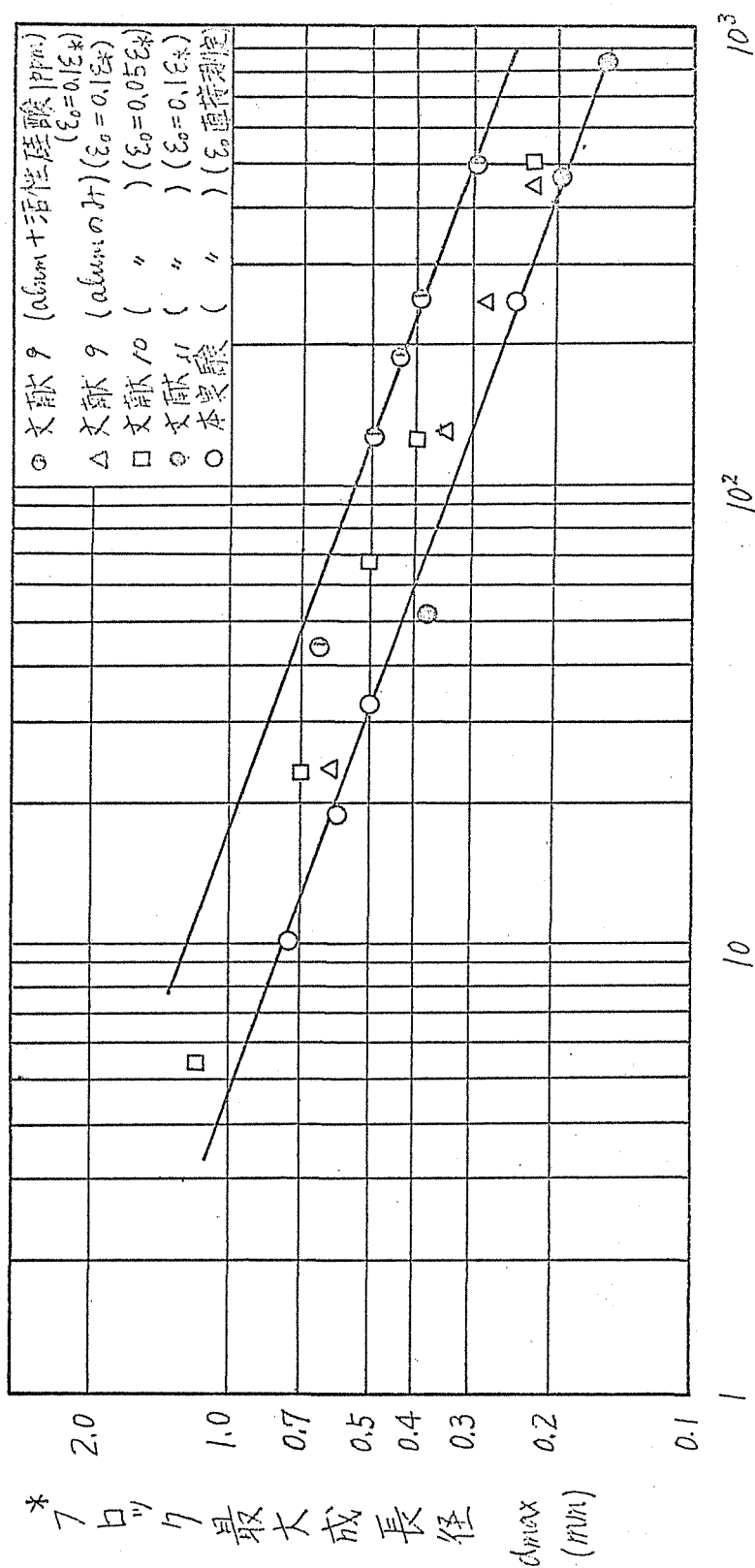
図(2-29) フロック相対径とフロック内に含まれる初期粒子数の関係



図(2-30) フロックフロックにおける密度関数



図(2-31) 生物フロックの密度



\* フロックの最大成長径  $d_{max}$  (μm)

\* 注) フロックの最大成長径は、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ックの最大成長径

## 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-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・小嵯原, 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粒子は、凝集操作により、凝集し、沈降する。この物理的現象は、流体運動に由来する。G. Levic は、この現象を理論的に説明し、設計に役立つ。ここでは、本章では、理論的観点から、フロック形成過程を詳しく説明する。この過程は、流速、粒子径、沈降速度などによって決まる。ここでは、主要なパラメータを挙げて、理論的観点から説明する。

ここで、 $n$ ：単位体積中のフロック数、 $D_x, D_y, D_z$ ：大きさの異なるスケールの渦による各々  $x, y, z$  軸方向への拡散係数、 $W$ ：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

フロック形成池の起点断面におり、 $x$ （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  $dV = dx dy dz$  について、入る粒子個数の増減を示す基本式は次のようである。

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial n}{\partial y} \right) + \left( D_z \frac{\partial n}{\partial z} \right) \right\} - \frac{\partial (W \cdot n)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} (u n) - F(n) + G(n) \quad (3-1)$$

ここで、 $n$ ：単位体積中のフロック数、 $D_x, D_y, D_z$ ：大きさの異なるスケールの渦による各々  $x, y, z$  軸方向への拡散係数、 $W$ ：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

積体積 体積 單位 單位 時間 時間 位置 位置 速度 速度 距離 距離 質量 質量 力 力 運動 運動 速度 速度 距離 距離 質量 質量 力 力 運動 運動 速度 速度 距離 距離 質量 質量 力 力 運動 運動

渦項の示す運動は、右の項と異なり、粒子の大きさによる進退の相対性は、より小さい。また、分子の運動は、流体の速度に比べて、相対的に小さい。このため、流体の運動は、粒子の運動に比べて、相対的に大きい。

### 3-2 乱流下の衝突関数

攪拌の粒子分布の不均質性は、流体の速度に比べて、相対的に小さい。このため、流体の運動は、粒子の運動に比べて、相対的に大きい。



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ング内でのフロック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ク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  $R$  を持つ大規模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。

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

境界条件として

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

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。

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

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

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 となる所を両方の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、 $\nu$  : 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)中の比例定数は例之は 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)のようになる。

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

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  $\varepsilon_0 \doteq 10^{-1} \sim 10^{-2} \text{ erg/cm}^3 \cdot \text{sec}$  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。

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

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節において明らかにされたように、最大フロック径  $d_{\text{max}} = \lambda_0$  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た場合

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)を近似的に単一粒度組成と考へる。フロック形成初期におこる初期粒子同志の衝突合一にょつて又倍大粒子が生成され、これら粒子間の組み合わせにょつて3倍, 4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つて、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。衝突合一にょつてもフロック密度が一定に保たれる場合の $i$ 倍粒子の体積が初期粒子の $i$ 倍となる場合を、

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

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

$$\begin{aligned} \frac{dN_{ij}}{dt} &= 12 \pi \beta \sqrt{\frac{E_0}{\mu}} \left( \frac{1}{2} d_i + \frac{1}{2} d_j \right)^3 n_i n_j \\ &= \frac{3}{2} \pi \beta \sqrt{\frac{E_0}{\mu}} (d_i + d_j)^3 n_i n_j \\ &\text{-----} (3-11) \end{aligned}$$

さらに式(3-10)から、 $d_i = i^{1/3} d_1$ ,  $d_j = j^{1/3} d_1$  とおき、 $A = \frac{3}{2} \pi \beta \sqrt{\frac{E_0}{\mu}} d_1^3$  とおくと結局式(3-11)は、

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

フロック形成過程中の任意時間におこる、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へる。

初期粒子の単位体積中の個数:  $n_1$   
 2倍粒子の " " " " :  $n_2$   
 $i$ 倍粒子の " " " " :  $n_i$

$i$ 倍粒子と $j$ 倍粒子の合一にょつて生ずる $R$ 倍粒子( $R = i + j$ )の増加と他の粒子との合一にょつて $R$ 倍粒子でなくなるものもを総計した、 $R$ 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。

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

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。

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

今、式(3-15)のようk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k得ることが出来る。

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

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

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

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、 $i=1$  の初期粒子が衝突一回によって最終的には  $i=\infty$  の1つの粒子になる場合を

扱っスル。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  
 が存在する事となる。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た場合

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。  
 この様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。

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

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,

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

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ま  
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  
が進行して行くところある粒度分布状態でフロック成長が停  
止し、それ以後は攪拌を続けると成長停止時の分布を維持  
することか示された。したがって、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には、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一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。

したがって、 $i$  倍粒子と  $j$  倍粒子の衝突合一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、現実によく似たフロック形成を論ずるために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ない。

今、直径  $d_1$  の初期粒子が  $i$  個集って構成される直径  $d_i$  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。

$$\frac{\pi}{6} d_i^3 = \frac{\pi}{6} d_1^3 i + V_w \text{-----}(3-20)$$

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  $V_w$  は元々初期粒子中に存在する水分は含まれない。したがって、 $i$  倍粒子の全含水の体積を示すものではない。

直径  $d_i$  および  $d_1$  の粒子の有効密度を  $\rho_{ei}$ 、 $\rho_{e1}$  として次のように定義する。

$$\begin{aligned} \rho_{ei} &= \rho_i - \rho_w \\ \rho_{e1} &= \rho_1 - \rho_w \end{aligned} \text{-----}(3-21)$$

ここで、 $\rho_i$ 、 $\rho_1$ ：それぞれ直径  $d_i$  と  $d_1$  のフロックの実密度 ( $g/cm^3$ )、 $\rho_w$ ：水の密度 ( $g/cm^3$ )。

したがって、 $i$  倍粒子の質量は次式で示される。

$$\frac{\pi}{6} (\rho_{ei} + \rho_w) = \frac{\pi}{6} d_1^3 i (\rho_{e1} + \rho_w) + V_w \rho_w \text{-----}(3-22)$$

式(3-20)より、

$$V_w = \frac{\pi}{6} d_i^3 - i \frac{\pi}{6} d_1^3 \text{-----}(3-23)$$

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 ~ 20 μ 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  
るのを添字 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ゐる場合には、i  
倍粒子の直径とそゝの中へ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へ取り込まれて  
形成されてゐる i 倍粒子と j 倍粒子の合への際の衝突半径  
 $R_{ij}^*$  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、

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

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、与えられた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、

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

ここで、

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

### 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る粒子群に対し式(3-29)が適用される領域、(3)両者が混在す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ひが可能である。

### 3-5 基本式中の特性値 $m$ $K_p$ $S$

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  $K_p$  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とは、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、

$$A^* = \frac{m}{t} = \frac{3\pi}{2\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} d_1^3 n_0 \dots \dots \dots (3-30)$$

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  $\sqrt{\epsilon_0/\mu} d_1^3 n_0$  に比例して増大することが知られる。

$\sqrt{\epsilon_0/\mu}$  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、 $\epsilon_0$  をフロック形成池全体で失われるエネルギー量  $\epsilon_x$  とも区別しなければならぬ点を加味して、次式のようにならぬ  $G^*$  値と  $G_0$  値を定義する。

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

$$G_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} \dots \dots \dots (3-32)$$

ここで、 $\epsilon_x$ : フロック形成池全体の総エネルギー消費率 (erg/cm<sup>3</sup>.sec),  $\epsilon_0$ : 有効エネルギー消費率 (erg/cm<sup>3</sup>.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>9)</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、 $d_1^3 n_0$  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  $C_0$  に比例する数値があり、凝集剤の注入率

が通常用いられる程度であれば、 $C_w$  は原水濁度  $C_T$  に近似的に比例するものと考えられる。しかし、 $\tau$ ,  $d_i^3 n_0$  の  $C_T$  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  $C_w$  (近似的には原水濁度  $C_T$ ) の積  $G^* C_w$  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  $G^* C_w t$  により表わされる。Camp の示した  $G$  の値に基い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われて来た理論的考察から、 $G^* C_w t$  の値により示されることと改めなければならぬ。しかし、 $\tau$ , フロック群が最大成長平衡をなす以上攪拌を続けるとフロック形成の進行は進行しないう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  $G^* C_w T^*$  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に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に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、フロックの衝突合一の過程において式(3-27)に示されるような衝突半径の増加となつて作用し、大粒径側の粒子の衝突速度を加速させるように働く。この倍粒子の衝突半径はフロックの密度変化がないう場合  $K_f$  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  $1.0 \sim 1.5$  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となる。しかし、 $\tau$ , フロックの粒度組成変化のパターンも異なるとして、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するに場合により著しく短縮される。

### 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り決まり、初期粒子径  $d_i$  との比  $(d_{max}/d_i)$  は  $m$  値とも  $K$  の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  $\tau$  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  $T$  はフロックの最大成長度を示

よため、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  $d_{max}$  粒子のつらみ式 (3-26) を変形して式 (3-33) によつて与えられる。

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

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

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  $d_{max}$  と攪拌強度指標  $G_0 = \sqrt{\epsilon_0/\mu}$  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  $S_m$  が用いられるか、考えられる凝集条件に対する  $K, K_F$  を与え求めなければ式 (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。

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

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

高速接触沈殿池の攪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攪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、高い攪拌強度の急速攪拌によつて形成され、フロック形成

攪拌器に流入して来る初期粒子群は一般に  $10^{-4} \sim 10^{-3}$  cm の範囲のほぼ一律の大きさをもつ微小粒子である。したがって、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  $d$ 、 $n$  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  $F$  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。

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

さらに次のような条件を考へて式 (3-36) 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もっており、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。したがって、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  $d$  の比が  $D/d \div 50 \sim 100$  であるから、近似的に  $\frac{1}{2}(D+d) \div \frac{1}{2}D$  とおける。  
 (4)  $D \gg d$ 、 $N \gg n$ 、 $N D^3 \gg n d^3$  であり前章において示されたように、フロックフランケ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も、初期フロックを吸収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、 $N D^3 = \text{const}$  とおることから出来る。したがって、式 (3-36) は式 (3-37) のように変形される。

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

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収は、初期フロッ

クの個数濃度に関する一次反応として取扱われる。成長平衡の  
 接触フロック形成におおまけは与搅拌条件下で成長平衡の  
 達してある既成母フロック群と微小な初期フロック群が衝突  
 突合するが、最大成長粒径  $d_{max}$  以下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ある。球  
 形である。しかし、実際にはフロックの形状は完全な球  
 形ではないので、 $d_{max}$  に達してあ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る  
 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  $\alpha_i D_i$  ( $0 < \alpha_i < 1$ ) と考へる  
 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表現し  
 たいので、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。

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

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

$\bar{P}$  の値は、トルクメータによる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って、母保等は  $\bar{P} = 1/40 \sim 1/45$  程度で  
 あると推定した。

安全側の数値として  $1/45$  を用いると式(3-38)は

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

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

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  $V_f$  のみによっ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一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

場合の吸合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。

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

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

----- (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まつて、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つて表示する。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—によつてもフロックの密度が一定に保たれる場合となる  $i$  倍粒子の体積が初期粒子の体積の  $i$  倍となつてゐる場合には、 $i$  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。

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

ここで、 $i$  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、与えられた攪拌条件下で  
 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)  $S$  倍粒子よりも大きくなる  $R$  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、この様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)による次式のようになる。

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

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

----- (3-48)

今、式(3-15')のようになフロック全量を1としてフロック  
 の組成を比率で示し、式(3-16)のようにな変数変換を行  
 なった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)のようにな得ることかできる。

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

$$m = \frac{3\pi}{2\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} d_i^3 n_0 t$$

$$\doteq 1.22 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} d_i^3 n_0 t \text{ ----- (3-16)}$$

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

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

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

式(3-29)は、過大成長フロックの破壊とフロックが衝突合一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 $R$ 個集って形成長水マいるフロックの個数比がフロック形成時間の経過につれ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一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へる場合には、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)を用いて算定できることかできる。

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

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

接触高速泥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ゐ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で単位体積中の個数がNの既成大形フロックと直径dで個数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F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。

上述の様を仮定をおくと、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2群の粒子の衝突合一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一一次反応として式(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有する割合を有してゐる点を考慮すると、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、トルクメータによる測定した総エネルギー消費率  $E_*$  より  $E_0 = 0.1 E_*$  とし求めた有効エネルギー消費率  $E_0$  を用いて  $\bar{p} = 1$  とし計算した  $K_c$  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、

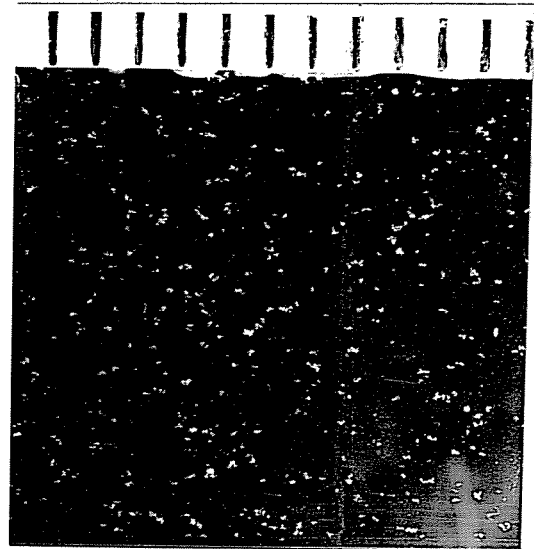
$$\frac{dn}{dt} = -\frac{1}{5\sqrt{15}} \sqrt{\frac{E_0}{\mu}} \nabla_f n \text{ ----- (3-40)}$$

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

ハナウに定められる。



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 $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ 注入率 ppm	粒度分布 (%)				平均粒径 ( $\mu$ )
	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	
微孔の径	$G^* \div 19 (1/sec)$	42 %	26	24.2	6.5	1.3
	$G^* \div 50 (1/sec)$	47.1 %	23.5	24.8	3.8	0.8

参考文献 (第3章)

- 1) Hinze, J.O., Turbulence, McGraw-Hill Book Co., p.142 - 246, 1959
  - 2) Batchelor, 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, 392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) この章の一部はまた下記の記事を参考がみである。  
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)に示される。さらには、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様か) が与えられれば、フロック形成過程は無次元指標  $m$  のみで従うことも明らかになる。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  $\sqrt{\epsilon_0}/\mu$  に比例する。また、 $S_m$  をどの値にとるべきかは次の表の光浴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(3-24)とす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し、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ぬ。

本節ではフロック形成基本式を数学的に解く代わりに、実験による変化し、理論式の実験的検証の展開を、フロック形成過程を普遍化する。この際、理論式で求めた基準を、得られた実験結果の理論計算と、理論計算の結果の理論計算より確か

## 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於て行なう。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 つに振り分けた子葉の夕ぐれで、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 枚づつ取り付けられている。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交面は厚さ5mmのアクリル板でできており、内部の観察と写真撮影が可能になっている。攪拌機の駆動は1/2HP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

本論文で用いられているフロック形成理論の値は、フロック形成槽のエネルギー消費率 $\epsilon$ を推定するに際しては、1) 直接にエネルギー損失を測定する方法と、2) 間接的に推算する方法とに分かれる。前者は、管路の場合のようにトルクメータを用いて、軸摩擦伝達損失の割合が、水流に比べて大きく、直接測定が困難である。後者は、管路の場合のようにトルクメータを用いて、軸摩擦伝達損失の割合が、水流に比べて大きく、直接測定が困難である。前者は、管路の場合のようにトルクメータを用いて、軸摩擦伝達損失の割合が、水流に比べて大きく、直接測定が困難である。後者は、管路の場合のようにトルクメータを用いて、軸摩擦伝達損失の割合が、水流に比べて大きく、直接測定が困難である。

間接的に推算する方法と、前者は、管路の場合のようにトルクメータを用いて、軸摩擦伝達損失の割合が、水流に比べて大きく、直接測定が困難である。後者は、管路の場合のようにトルクメータを用いて、軸摩擦伝達損失の割合が、水流に比べて大きく、直接測定が困難である。前者は、管路の場合のようにトルクメータを用いて、軸摩擦伝達損失の割合が、水流に比べて大きく、直接測定が困難である。後者は、管路の場合のようにトルクメータを用いて、軸摩擦伝達損失の割合が、水流に比べて大きく、直接測定が困難である。



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

$$\frac{n}{n_0} \doteq \exp\left(-\frac{1}{5\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} V_f t\right) \text{-----} (3-42)$$

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、 $n/n_0 \doteq C_T/C_{T_0}$  とおくことができる。式 (3-42) の両辺の対数をとると

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

$$\text{ここで、} k_{cl} = \frac{1}{5\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} V_f \log_{10} e \text{-----} (4-3)$$

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一本の直線上に並び、その勾配が式 (4-3) に示した  $k_{cl}$  を示す。 $k_{cl}$  が求められると式 (4-3) を変形した式 (4-4) によって  $\epsilon_0$  が計算できる。

$$\epsilon_0 = \frac{375 \mu k_{cl}^2}{(\log_{10} e V_f)^2} \text{-----} (4-4)$$

ここで、 $e$ : 自然対数の底  $\doteq 2.718$

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つて求め、式 (4-1) を用いて計算した。

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(216L)の水と濁水を満たす。(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6.5~10.0r.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 $D_i$ を求めたためのフロックの接写撮影を行なう。(6)次に1Lビーカーにカオリンをけん濁させ、ジャーテスターで250r.p.m.の攪拌を加えて所定量の凝集剤(硫酸アルミニウム)を加え、又~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をハ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 $R_{cl}$ と接写撮影によって得られた $\nabla f$ を用いて、式(4-4)から $\epsilon_0$ を求めることができる。実測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 $\epsilon_0$ の関係を描くと図(4-3)のようになる。エネルギー消費率 $\epsilon_0$ 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。

$$\epsilon_0 = \frac{P_0 g_c}{V} = K_e \rho n_r^3 d^{5/4} \left\{ \begin{array}{l} \text{-----} \\ \text{-----} \end{array} \right. \quad (4-5)$$

$$\frac{d^2 n_r}{V} > 10^4 \quad (\text{完全乱流条件})$$

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

大略攪拌槽の全動力消費量  $P$  は  $0.1 \sim 0.15$  程度を掛け係数値,  $g_c$ : 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 ( $\text{r.p.s} = \text{Rev}/60$ ),  $d$ : 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  $K_E$  を求めれ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については,  $n_r = 0.1 \text{ r.p.s}$  で  $\epsilon_0 \div 9 \times 10^{-2} \text{ erg}/\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$ ,  $\rho = 1 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,  $d = 25 \text{ cm}$ ,  $V = 216 \text{ l} = 2.16 \times 10^5 \text{ cm}^3$  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  $d^2 n_r / \nu = 7 \times 10^3$  となつた一般に云われてゐ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へる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  $\epsilon_0$  で特性を定義されたフロッキュレータに粒子径  $d_1$ , 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つ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  $d_1, n_0$  を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つても異なり  $100 \mu$  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)に示すような棒付スライドグラスに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  
 子がスライドグ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 $5\mu$ 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 $\mu$ 以上に反する  
 粒子が混存するようになる。表(4-2)は各々の初期粒  
 子生成条件での $d_1, n_0$ 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様と見なすことができないうで、  
 平均値をもつ $d_1, n_0$ 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  
 の水面下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(1/1000~1/3000)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プロに撮影する。  
 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 $2\mu$ 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。撮影されたフロク  
 群の1個を写真(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ときに、  
 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ク  
 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  
 クの半径を求めた。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) が計算される。

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

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

丹保らが先に用いた直接槽内のフロック深度の測定法(4-6)のばらつきを減らすために、撮影の結果から粒径の分布を求め、その平均値を用いて、式(4-6)の計算を行う。この場合、破壊の恐れがあるため、濃度のフロック群に注意を要する。

#### 4-2-3 フロック群粒度分布変化(フロック群成長)の追跡

前述のフロック形成過程を凝集させ、そのフロック形成の経過を追跡する。①フロック形成の開始を注ぎ、②調整量を注ぎ、③同時に緩速攪拌を行う。④フロック径が100μm以上、均径をフロック径として、50μm以下の粒子は、50μm以下の粒子と見做す。⑤フロック径が100μm以上、均径をフロック径として、50μm以下の粒子は、50μm以下の粒子と見做す。⑥フロック径が100μm以上、均径をフロック径として、50μm以下の粒子は、50μm以下の粒子と見做す。⑦フロック径が100μm以上、均径をフロック径として、50μm以下の粒子は、50μm以下の粒子と見做す。⑧フロック径が100μm以上、均径をフロック径として、50μm以下の粒子は、50μm以下の粒子と見做す。⑨フロック径が100μm以上、均径をフロック径として、50μm以下の粒子は、50μm以下の粒子と見做す。

のものに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  $50 \mu$  まで分級し, 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,  $K_p \div 1.25$ ,  $A = 4 \times 10^{-2}$  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  $f_f = 1 + p_e = 1 + (4 \times 10^{-2} / ds^{1.25})$  を  $f_e$  と  $ds$  について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  $3 \mu$  程度より小さいものは密度は  $1.65$  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  $1.2 \mu$  以下の粒子はその有効密度を  $1.65 \text{ g/cm}^3$  とし,  $1.2 \mu$  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級別重量が与えられる。その結果を百分率にして無次元表示したものが第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  $m$  について求めた一例として,  $m = 7.1$  における無次元フロック粒度別重量分布が図(4-7)のようにならされる。  $m$  値を種々変化させて表(4-4)のようになら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  $\{ R_m \text{ 倍粒子, } R_m = (d_f/d_p)^3 \}$  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のようになっている。

#### 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  $h$  を沈降し終るに要する時間を 100% とした無次元沈降時間  $\theta$  だけ沈降時間を採った場合、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  $f(\theta)$  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。

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

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

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

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

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

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

フロックの最大径のフロックの沈降速度 (cm/sec),  $w_i$ :  $i$  番目の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の沈降速度 (cm/sec),  $w_0$ : 時間  $T_0$  で水深  $h$  を沈みさるフロックの沈降速度 (cm/sec),  $w_0^*$ :  $i$  番目の級に属するフロックの沈降速度 (cm/sec),  $\theta_{d-max}$ : 最大径の級のフロックが水深  $h$  を沈みさるに要する沈降時間,  $\theta_{d-min}$ : 最小径のフロックが水深  $h$  を沈みさるに要する沈降時間, これを 100% とする,  $\theta_i$ : 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) にしたが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。

(一) ある攪拌継続時間  $m$  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, 横軸に無次元沈降時間  $\theta$  をパラメータとして, 縦軸に累積除去百分率をとり無次元沈降時間  $\theta$  をパラメータとして曲線群を描く。図 4-7 のように求めた例が図 (4-10) である。

(二) この様にして求めた回率を用いて, 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て図を描くと, 図 (4-11) ~ 図 (4-15) のように求める無次元化時間沈降累積量曲線が得られる。

(三) ここで描かれた無次元化時間沈降累積量曲線は,  $S_m = (d_{max}/d_i)^3$  と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その条件下に於けるフロックの最大成長度  $S_m$  を明らかにしておかなくてはならない。ここで, 最大成長平衡時の曲線を作成する元となつたフロック写真から最大成長径を測定して求めた  $S_m$  の見出し  $S_m$  とし記した。

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つて  $m$  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。この様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 / つの定まった



型となることを、SwiftとFriedlanderが明らかにし、Wang, Hidyもこの様な事実に確かめられている。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を粒子は着目し得る要素から沈降して消滅すると言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と申すフロッキュレーター内においても適用し得るものである。したがって、成長平衡時におけるフロッキュレーションの粒度分布は自平衡分布となっており、初期条件と独立にフロッキュ形成を表現する適当な変数についてある変数変換を行えば、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つの分布形を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ュ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いるならば、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のである。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った。

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、 $f(\theta^*) = 50\%$  で  $\theta^* = 1.0$  とするよう成長平衡曲線を標準化自平衡 $m$ -曲線として指定する。

3) ここで、図(4-11)～図(4-15)の成長平衡 $m$ -曲線の  $f(\theta) = 50\%$  を示す  $\theta$  があつて  $\theta^* = 1.0$  の所に来るよう標準化係数  $K^*$  を定める。すなわち、 $f(\theta) = 50\%$  を示す  $\theta$  の最大成長平衡曲線についてあわせる。例之は  $S_m = 3.4 \times 10^6$  の場合は、 $f(\theta) = 50\%$  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  $\beta(\theta) = 50\%$  を与える  $\theta$  によつて  $K^*$  を求めた結果は表(4-5)のようである。横軸に最大成長度  $S_m$  の対数をとり縦軸に  $K^*$  をとつてプロットすると、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  $K^*$  を掛けた、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。図から明らかになるように、このような操作によつて作成された成長平衡曲線は一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から分かる。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つた。

#### 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速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と、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。このことには次のような機構を考へることによつて説明できる。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。したがつて、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と、衝突した粒子同志が合一行で合一行確率は除々に低くなり、個々の増分(衝突回数)の増加)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ほとんど成長平衡に近づくと、フロック成長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。したがつて、フロックの破壊が生じ、最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

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って終了し、最大成長度  $S_m$  が現象に関与するようになった。比較的小さい割合のフロック成長で大半の攪拌時間が費される。したがって、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  $S_m$  と何らかの関係を持つはずである。(衝突した内の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とする。ここでは、単に衝突合一確率が存在することのみを提示することにせよ)。

#### 4-4-2 自平衡分布に至るに必要なるフロック形成時間

図(4-19)は前述の関係がどのようにな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)から明らかになるように  $m_e$  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。

同様のプロットをパイプフロッキユレーターに於ける実験結果についても図(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、 $G^* C_v T^* = \sqrt{\varepsilon^* / \mu} C_v T^*$  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。

$$m_e = 1.22 \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu}} d_i^3 n_0 t \propto G^* C_v T^* \text{-----}(4-14)$$

であるから、 $A = A'$  と仮定せずであり図(4-19)と図(4-20)によってこの関係が確認されたことにより、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実用上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ために必要な  $G^* C_v T^*$  と  $m$  値をそれぞれ、 $m_e^*$ 、 $m_e$  とすると、

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

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

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ため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ユ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。フロックの最大成長径  $d_{max}$  と有効エネルギー消費率  $E_0$  との関係を示す図と、パイプフロッキユレーターの総エネルギー消費率  $E_*$  とそこで得られるフロック最大成長径  $d_{max}$  の関係を対比すると、パイプフロッキユレーターでは  $E_0 \div 0.05 E_*$  と云った値を考慮することによって図(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ユ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、パイプフロッキユレーターでは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、

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

パイプフロッキユ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。

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

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  $m_e^* = 3.8 \times 10^6$  となり、式(4-18)から  $m_e \doteq 2.1$  と推算される。図(4-19)において、 $S_m = 10^5$  に対する  $m_e$  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  $E_0$  を用いたの現象の取扱いはつりまの实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  $n_0$  が与えられまゝの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要する無次元攪拌継続時間  $m_e$  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。

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

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  $E_0 = 2.5 \text{ 22g/cm}^3 \cdot \text{sec}$  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、 $m_e = 1.5$  と与えられる。したがつて、式(4-19)から  $T = 560 \text{ sec} \doteq 9 \text{ min}$  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てものが表(4-6)である。無次元攪拌継続時間  $m_e$  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,

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

しかかゝる、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ふ、(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、フロックキュレク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もので、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。

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



そこで、フロックの粒度組成が成長平衡に近づいて来ると、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、最大の成長度 \$S\_m\$ の影響も受けるようになる。\$m\$ 値にまつま主に支配される初期のフロック成長は、極めて短時間しかかかっても大幅なフロック成長を伴って終了し、最大の成長度 \$S\_m\$ が現象に際与して来ると、かか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\$ はフロックの最大の成長度 \$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。

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

最大の成長度 \$S\_m\$ が増大してくると \$m\_e\$ は減りうるが、成長平衡に至るに要する攪拌継続時間 \$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。

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

$$T^* = K_0 S_m^{(0.24 \sim 0.28)} \text{ ----- (4-22)}$$

本章で得られた諸成果にまつて、\$m\$ 値、\$S\_m\$ 値、\$K\_0\$ 値のうちの無次元指標にまつ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

フロック形成 攪拌回転数 $N_r$ [rpm]	母フロック体 積濃度 $V_f$ [無次元]	吸合速度係数 $k_{c1}$ [1/sec]	有効エネルギー 消費率 $E_o$ [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 [min]	$d_1$ [ $\mu$ ]	$n_0$ [1/cm <sup>3</sup> ]	$d_1^3 n_0$
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) 凝集フロック形成条件

実験 番号	濁度 (ppm)	硫酸アル ミニウム注入 率 (ppm)	急速攪拌 回転数 (rpm)	急速攪拌 継続時間 (min)	緩速攪拌 回転数 (rpm)	緩速攪拌 継続時間 (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) フロック粒径・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]
フロック径 $d_{si}$ ( $\times 10^{-3} \text{ cm}$ )	フロック個数濃度 $n_i$ (個)	級別個数比 $n_i / \sum n_i$ (%)	フロック密度 $\rho_f$ ( $\text{g/cm}^3$ )	フロック体積 $V_i$ ( $\times 10^{-5} \text{ cm}^3$ )	フロック重量 $W_i$ ( $\times 10^{-5} \text{ g}$ )	フロックの級別総重量 $n_i \times W_i$ ( $\times 10^{-5} \text{ g}$ )	級別重量比 $= W_i^*$ $n_i \times W_i / \sum n_i \times W_i$ (%)	無次元沈降速度 $w_i / w_1 = w_i^*$	i粒子が100沈みきるに要する時間 $\theta_i = T_i / T_1 = w_1 / w_i$ (%)
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		

127

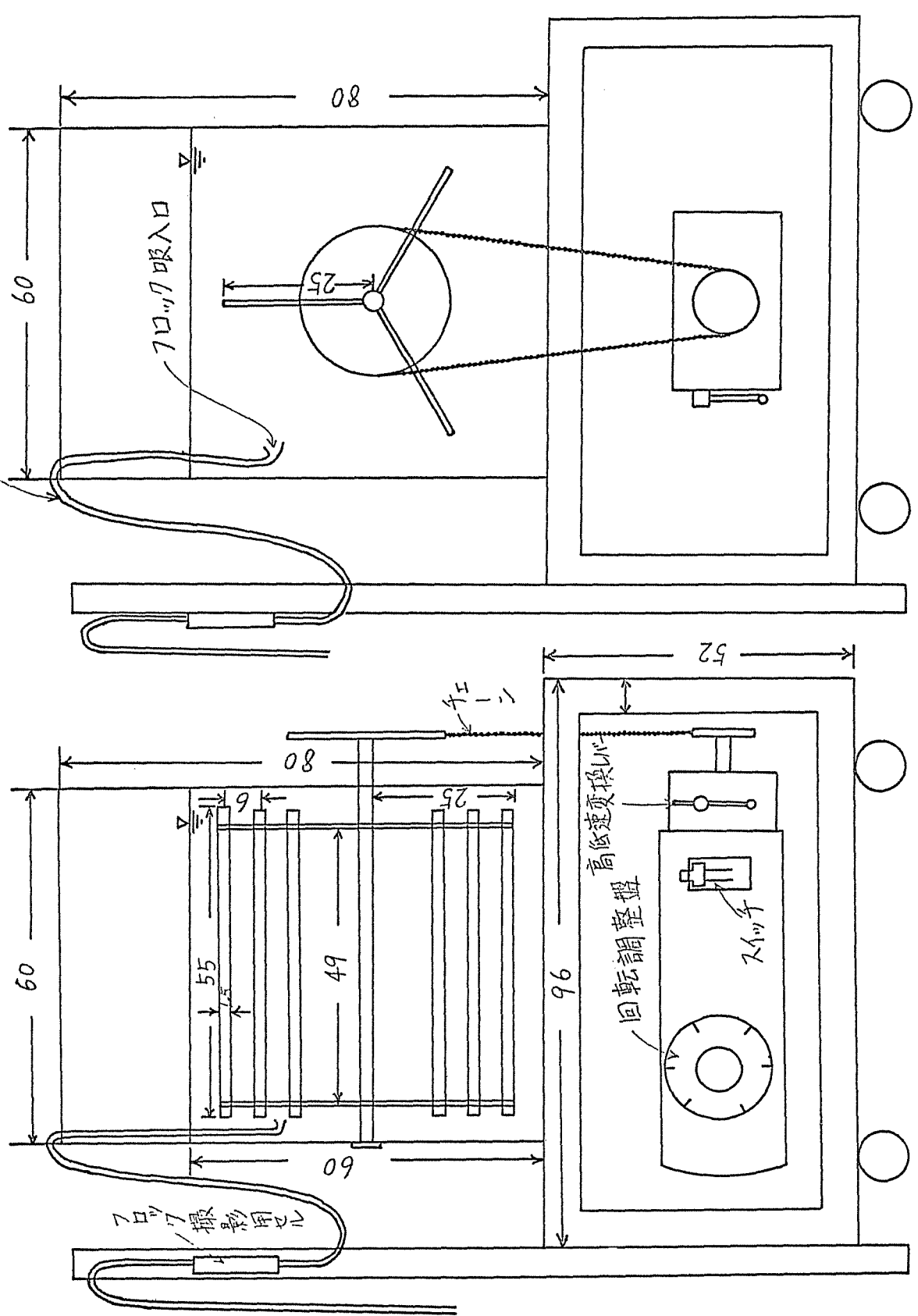
表(4-5) 標準化係数  $K^*$

$S_m$	$K^*$
$3.4 \times 10^6$	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

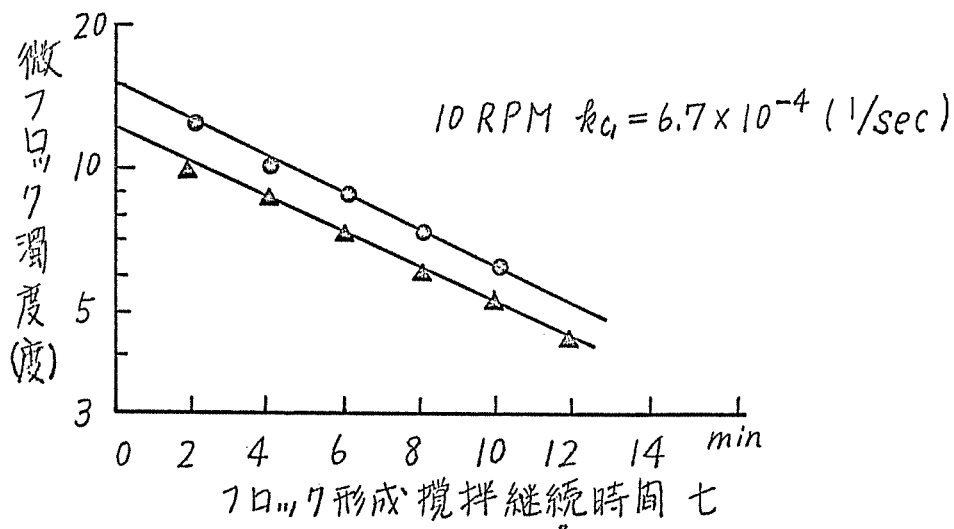
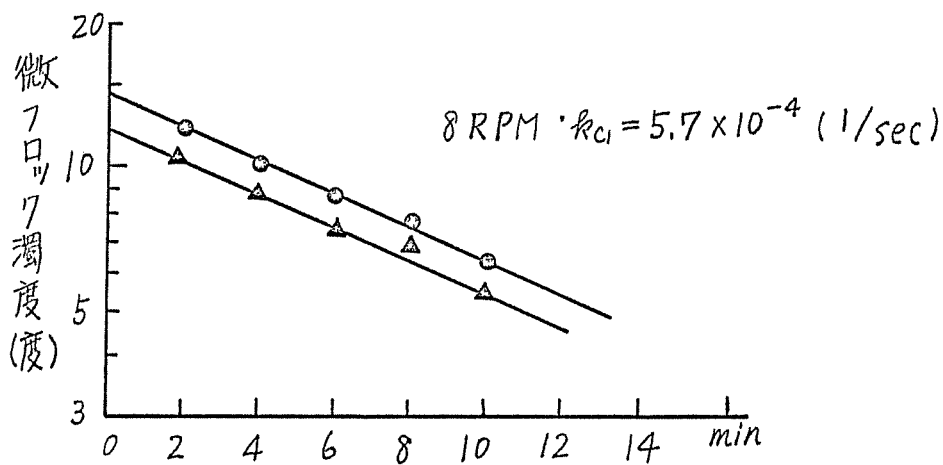
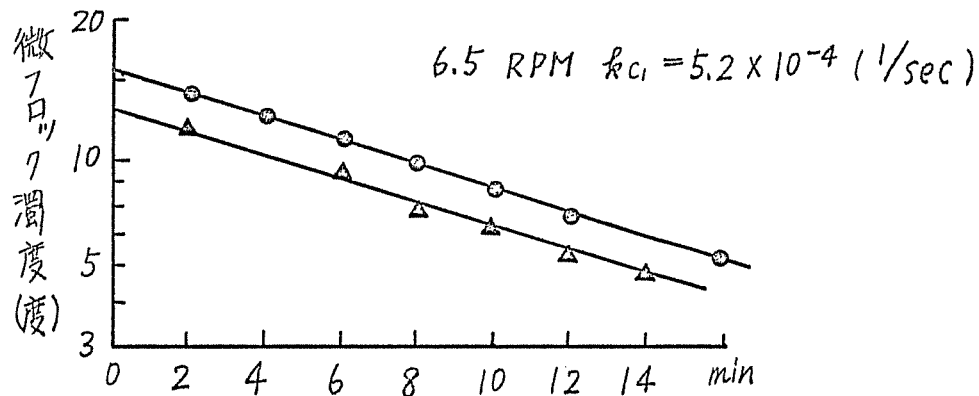
$d_i [\mu]$	$d_{max} [\mu]$	$S_m$	$E_o$ [erg/cm <sup>3</sup> .sec]	$m_e$	$T$ [min.]
4	250	$2.4 \times 10^5$	$2.5 \times 10^0$	1.5	9
4	500	$2.0 \times 10^6$	$3.2 \times 10^{-1}$	1.0	17
4	750	$6.6 \times 10^6$	$1 \times 10^{-1}$	0.75	23

7口ワッパリング管 (内径1.5)

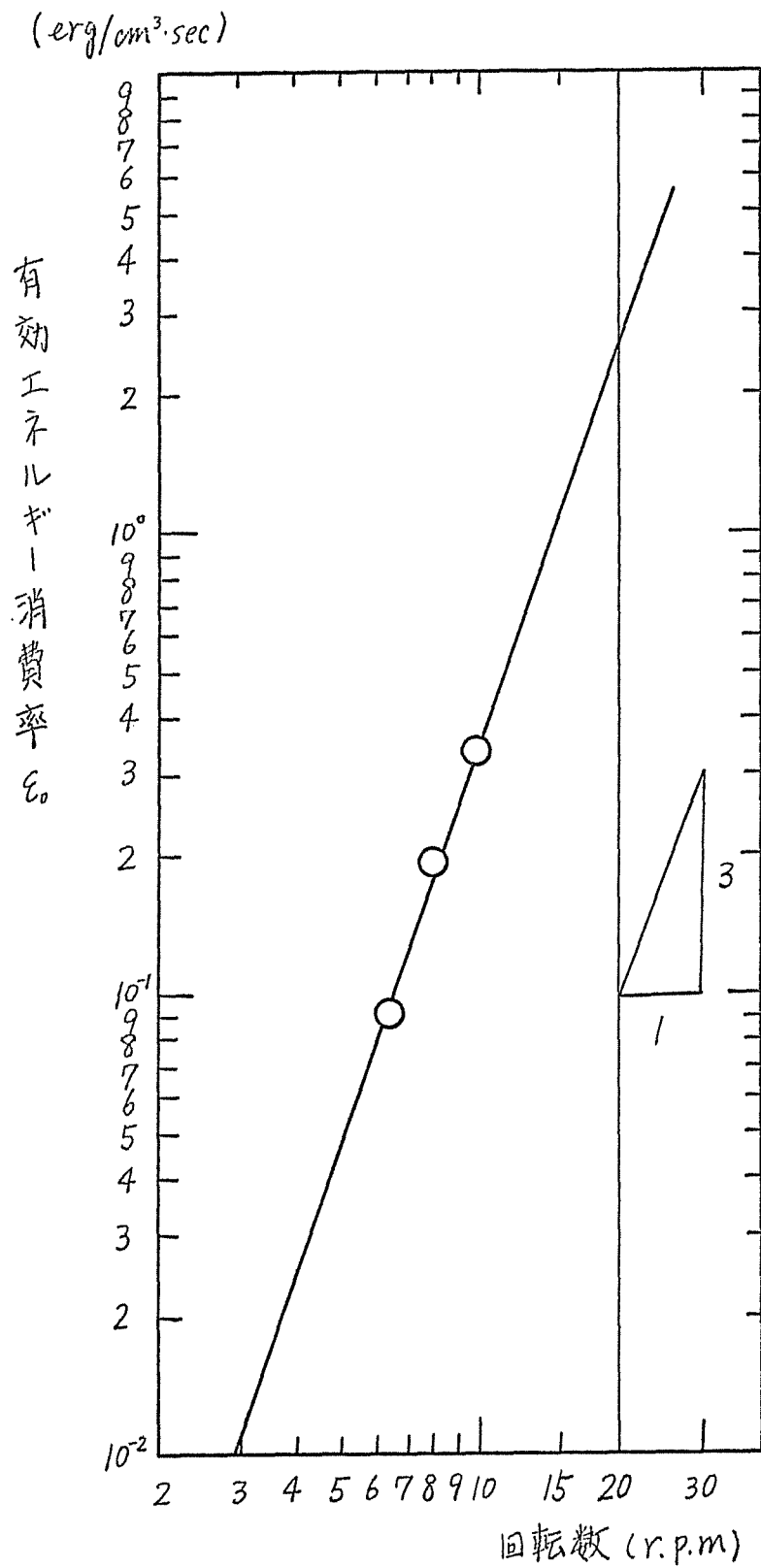


単位: cm

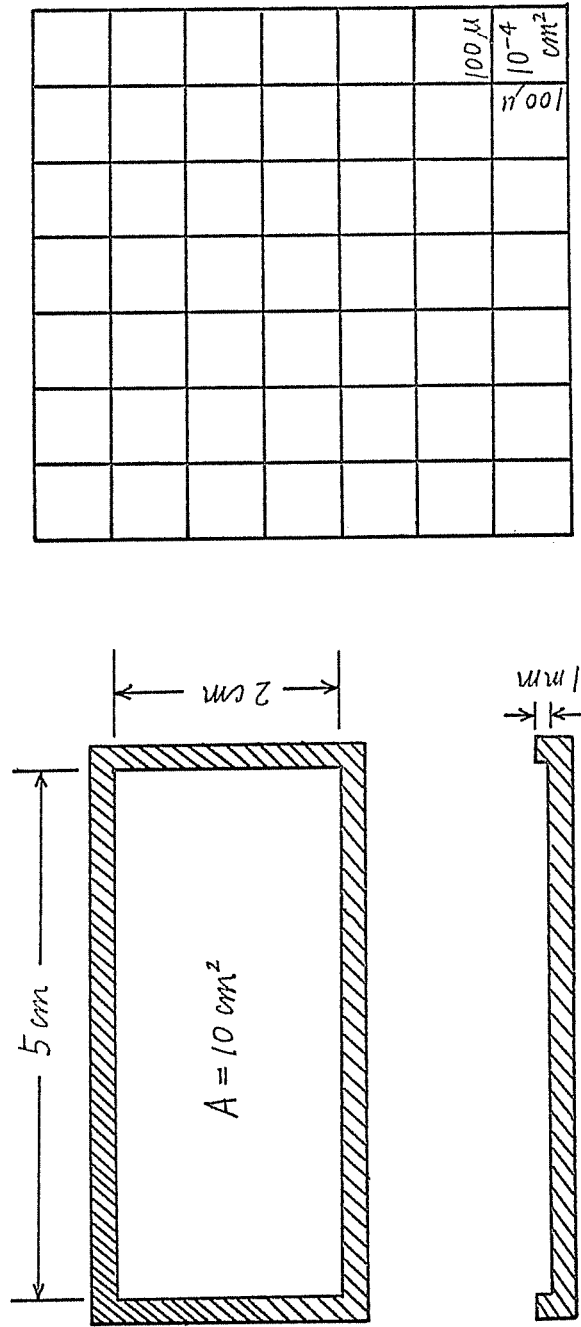
図(4-1) 回分式7口ワッパリング



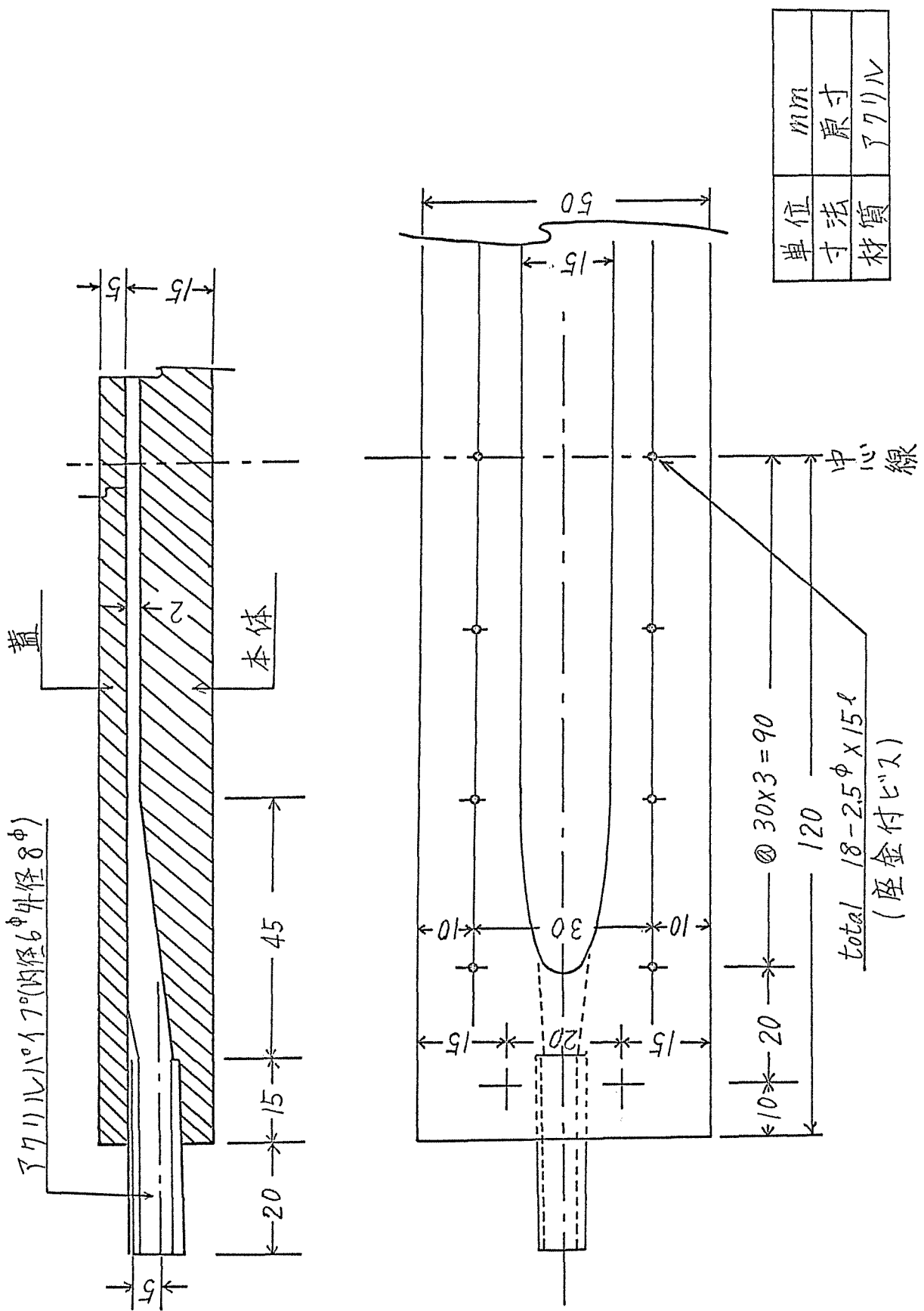
図(4-2) 母フロックとの接触吸合による微フロック濁度の減少



図(4-3) 攪拌翼回転数とエネルギー消費率の関係



图(4-4) 微孔孔径，个体浓度测定用セル



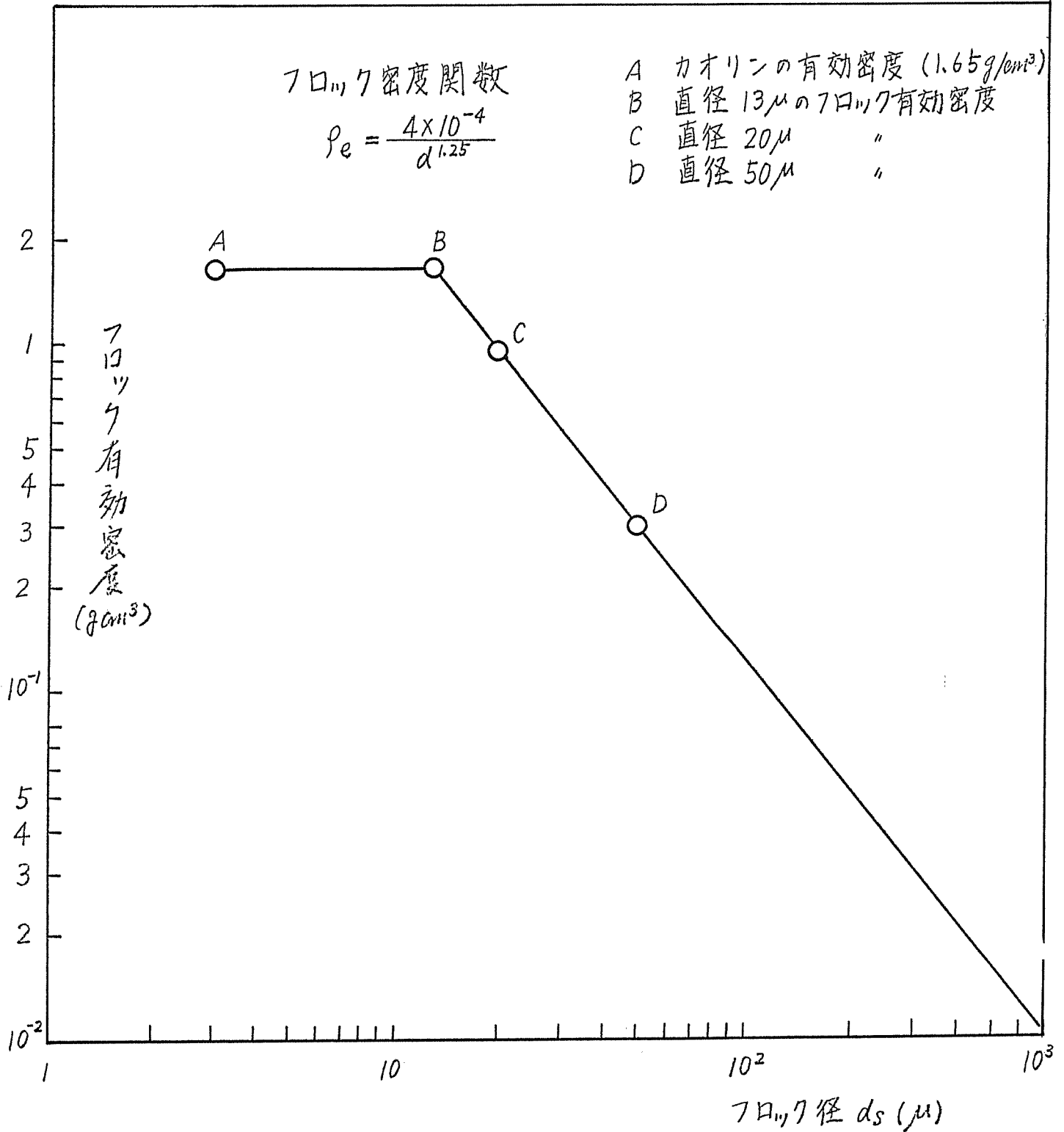
図(4-5) フロック撮影用セル



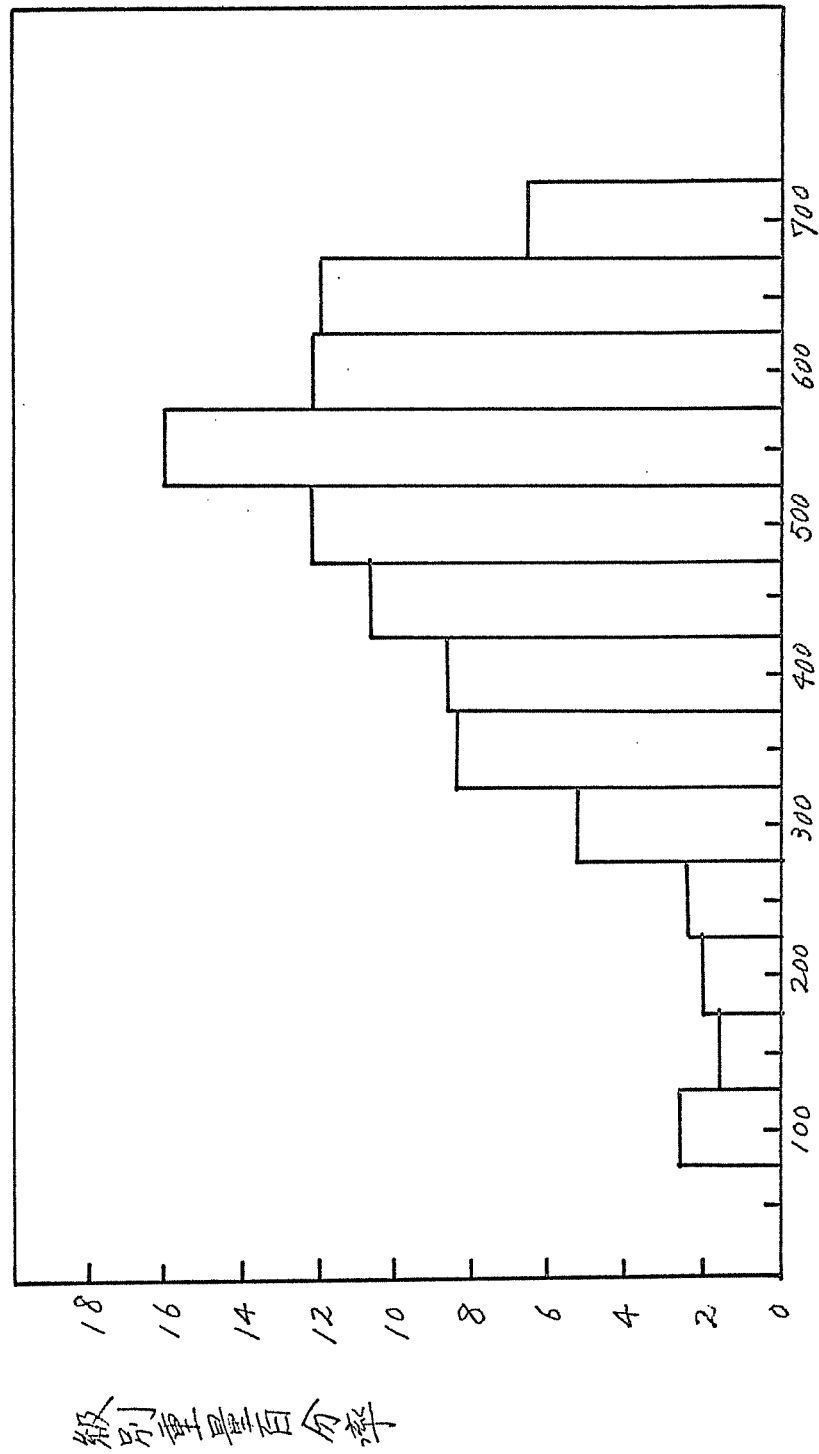
フロック密度関数

$$\rho_e = \frac{4 \times 10^{-4}}{d^{1.25}}$$

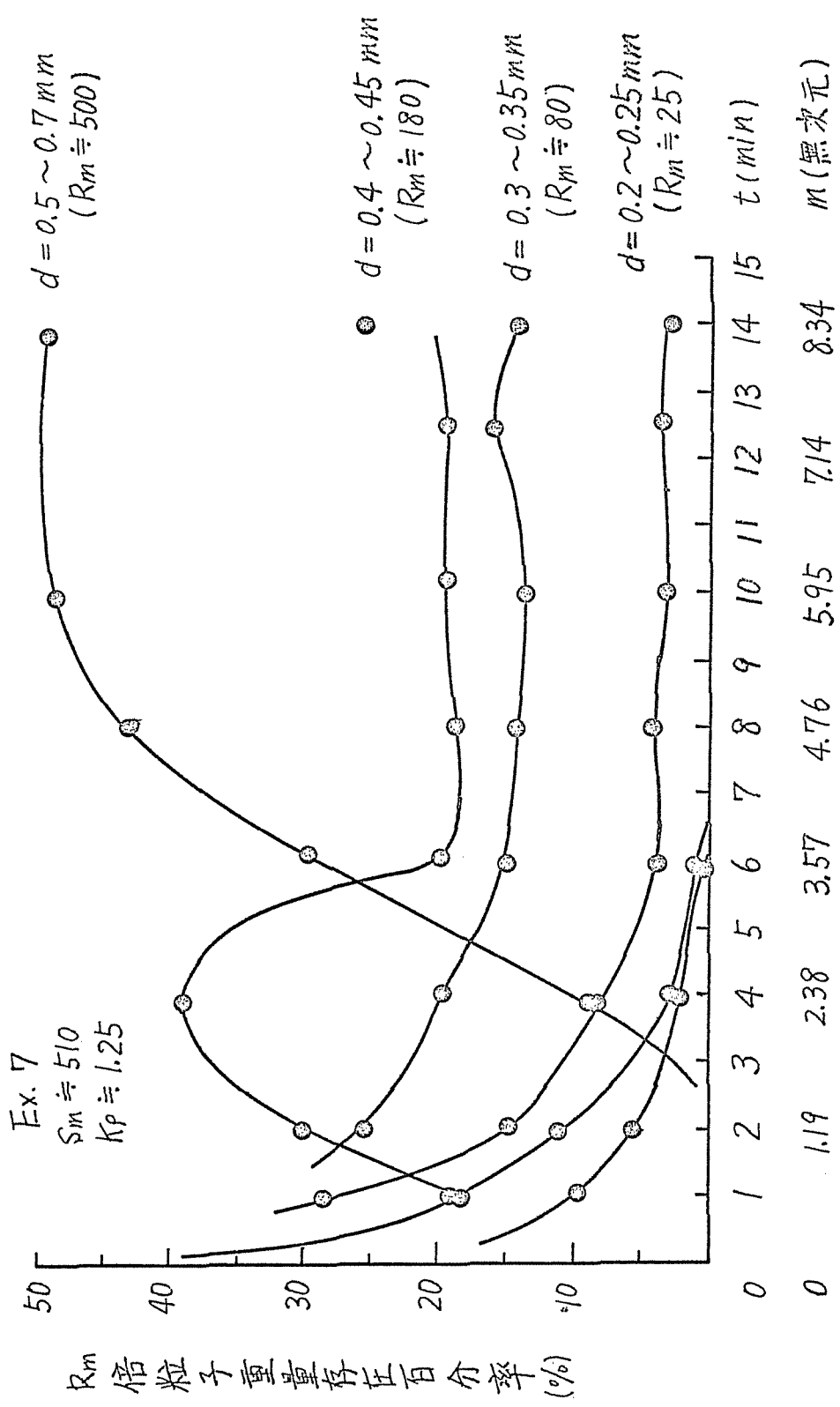
- A カオリンの有効密度 (1.65 g/cm<sup>3</sup>)
- B 直径 13μ のフロック有効密度
- C 直径 20μ " "
- D 直径 50μ " "



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

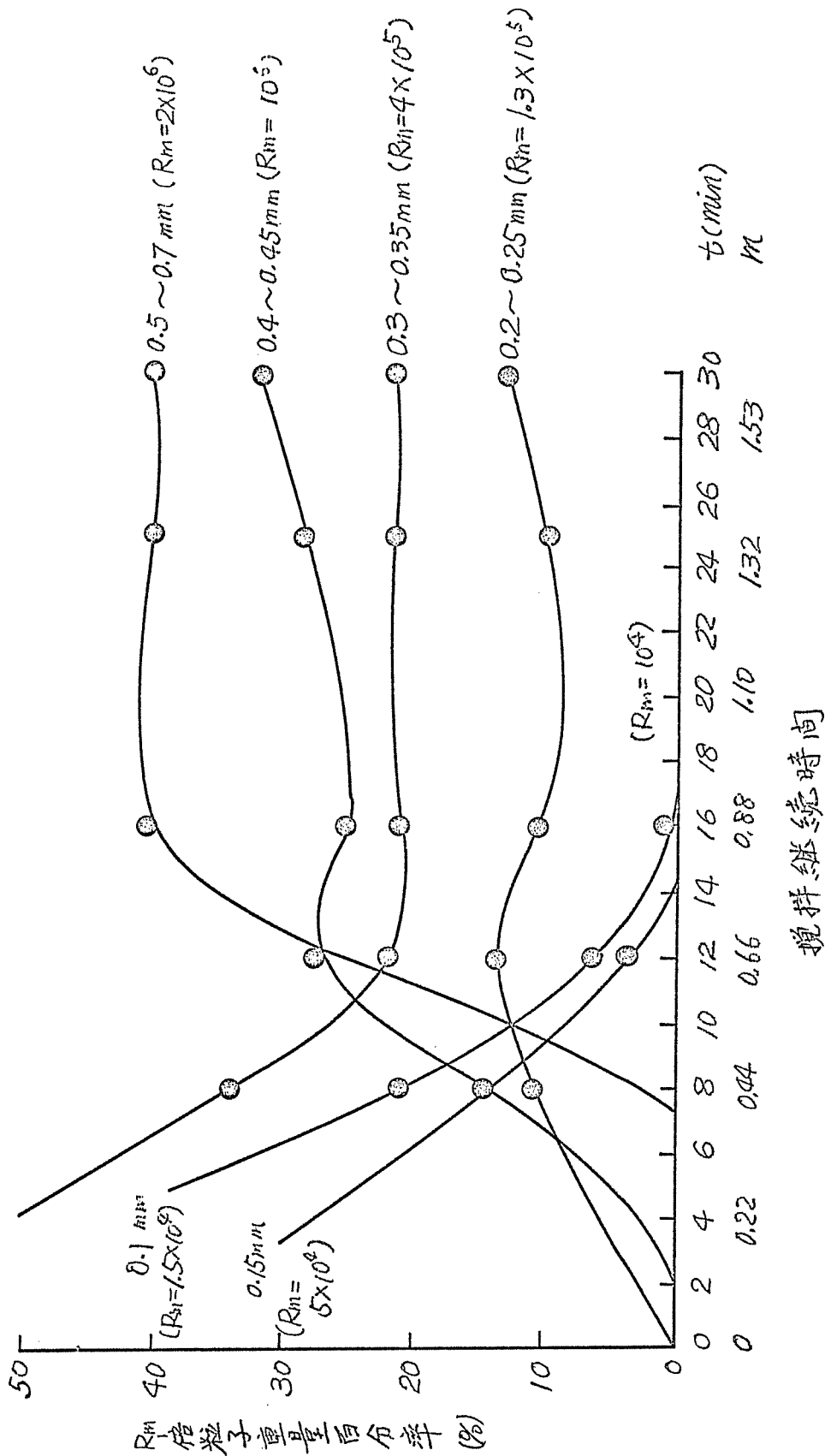


攪拌繼續時間

圖(4-8)  $R_m$  倍粒子の消長  $R_m = \left(\frac{d}{d_1}\right)^3$

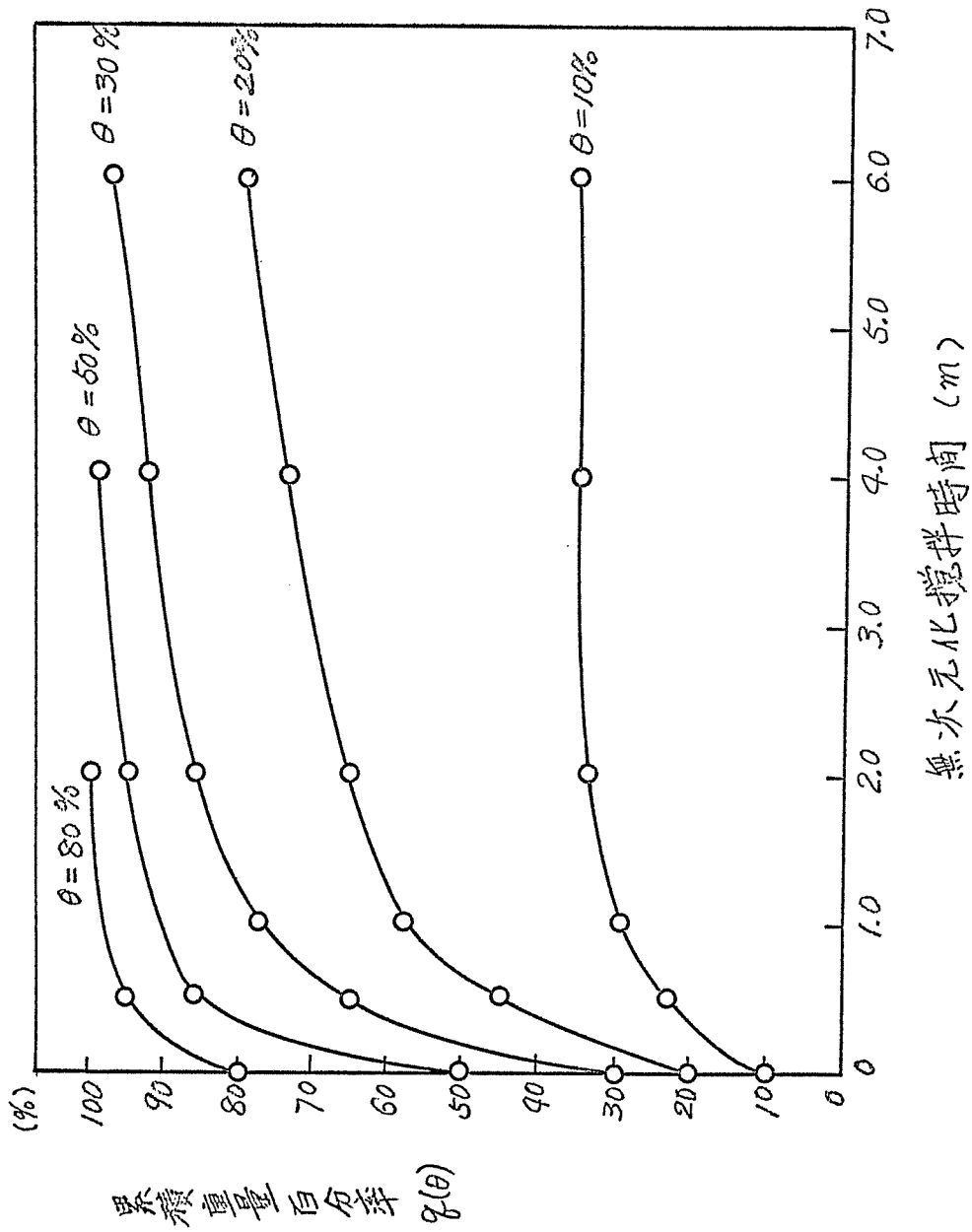
$$\Delta_m = 2.0 \times 10^6$$

$$K_p = 1.25$$

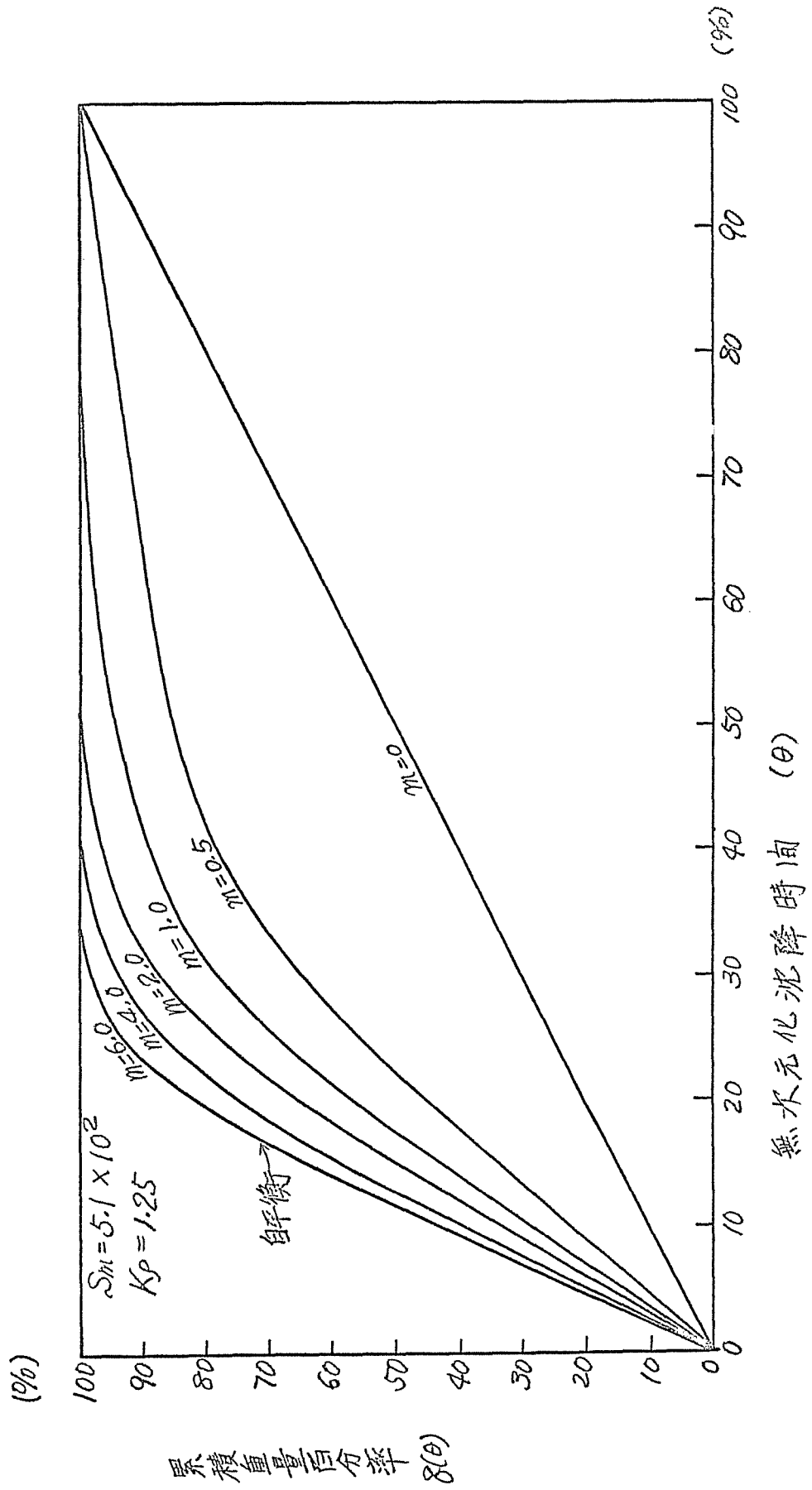


图(4-9)  $R_m$ -倍粒子的消長

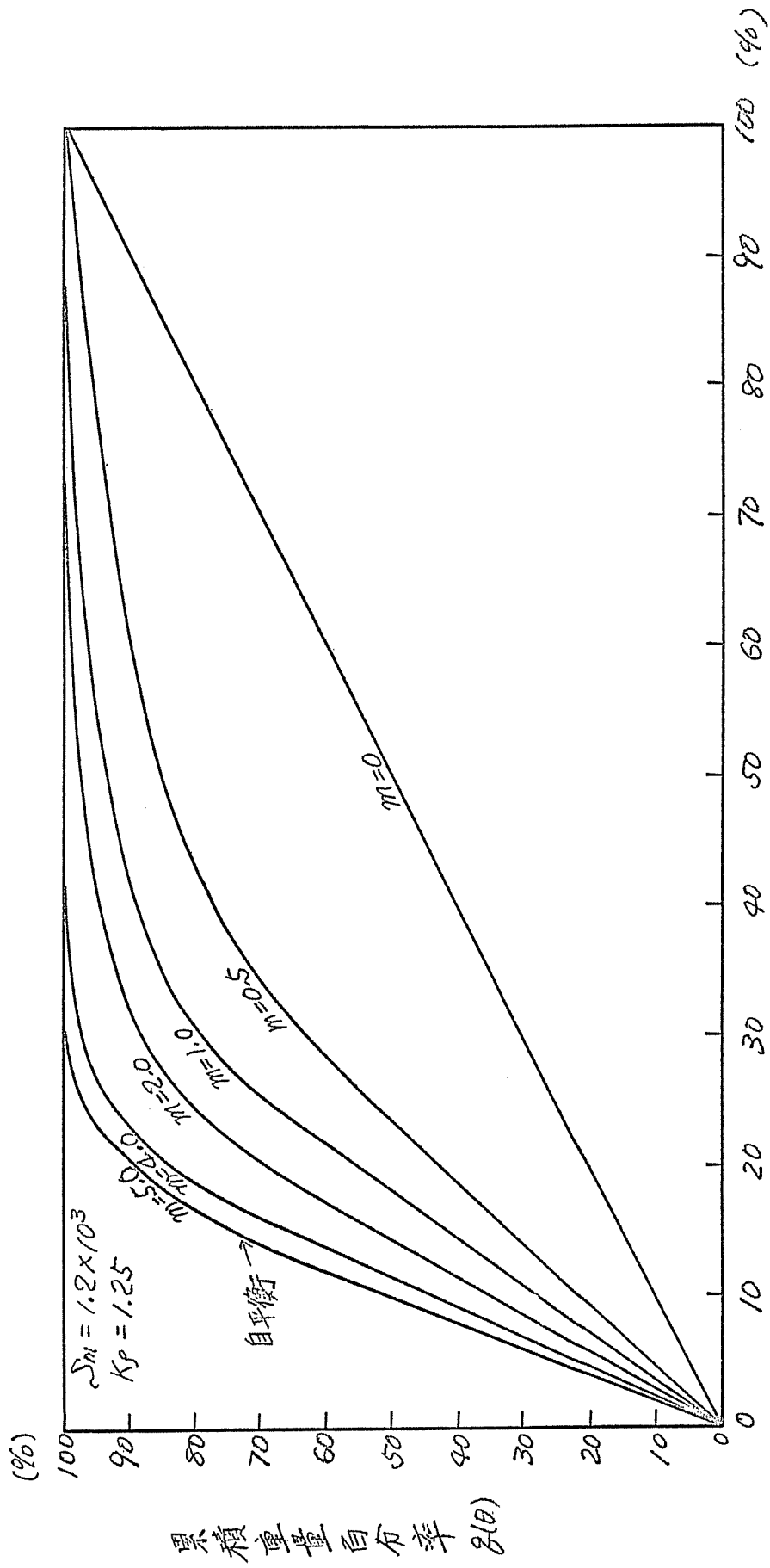
Ex 7.  $S_m = 5.1 \times 10^2$



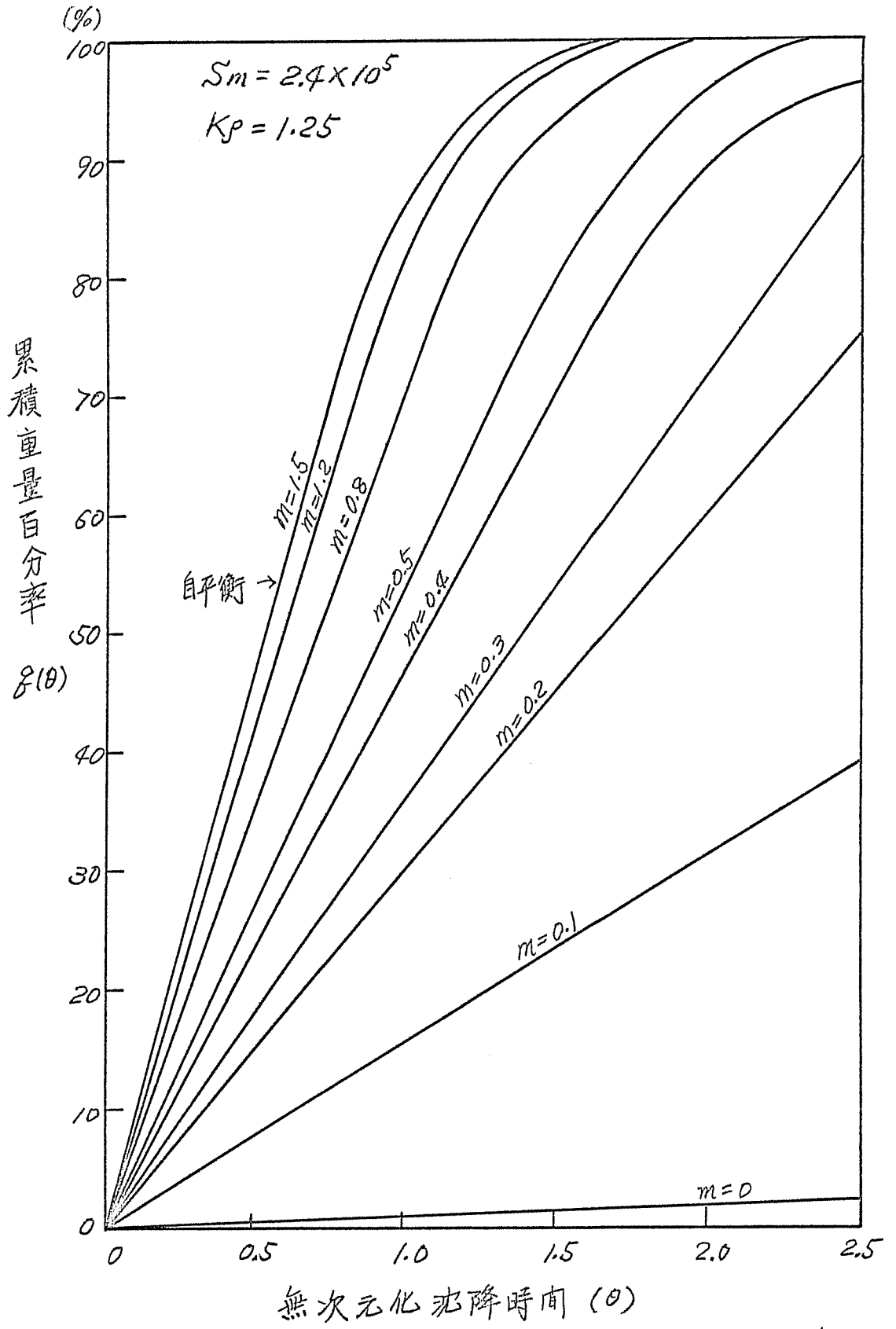
图(4-10) 無次元化攪拌時間と累積重量百分率の關係



图(4-11) 无次元化时间累积量曲线 ( $S_M = 5.1 \times 10^2$ )

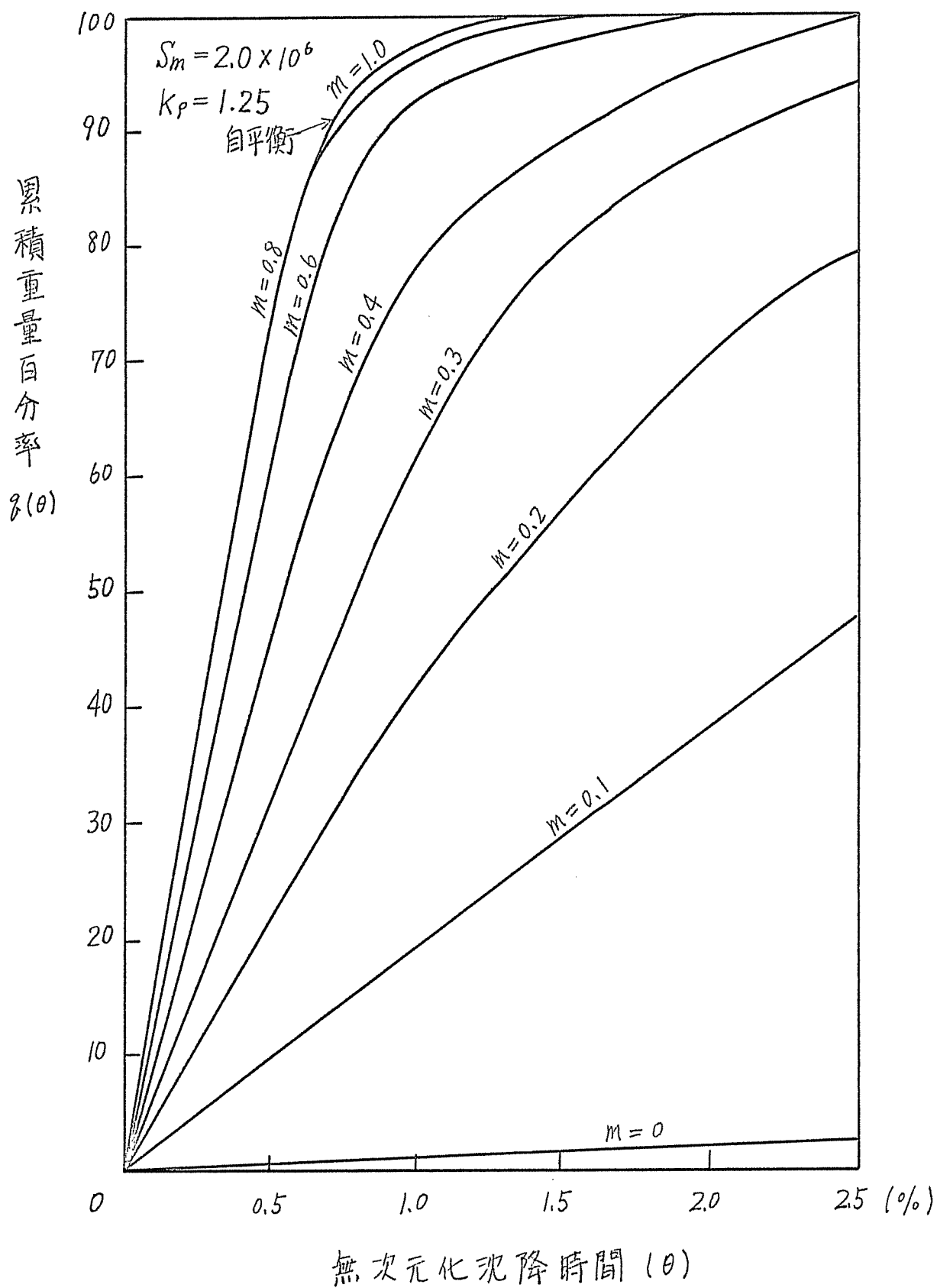


圖(4-12) 無次元化時間累積量曲線 ( $S_m = 1.2 \times 10^3$ )

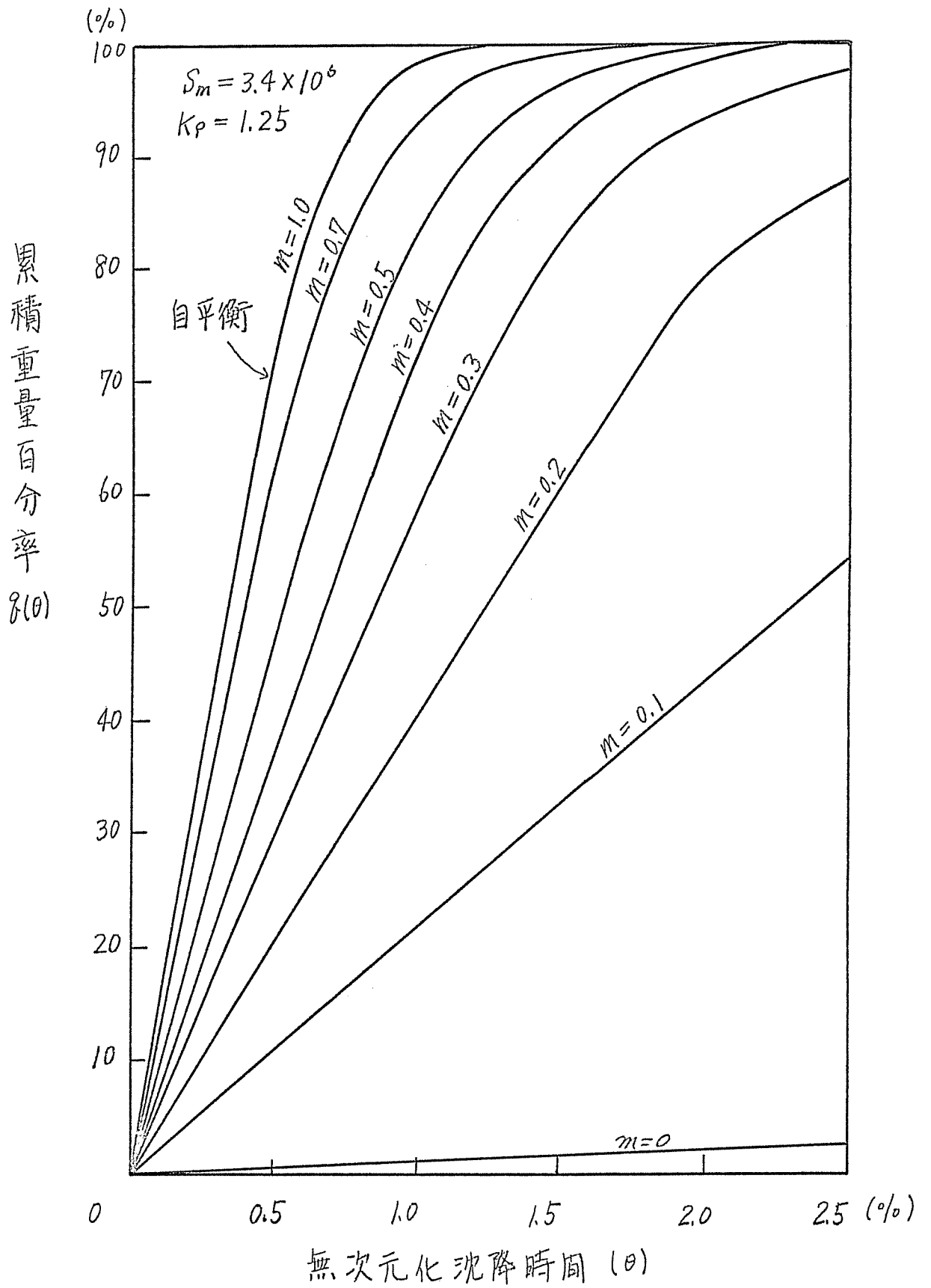


圖(4-13) 無次元化時間累積量曲線 ( $S_m = 2.4 \times 10^5$ )

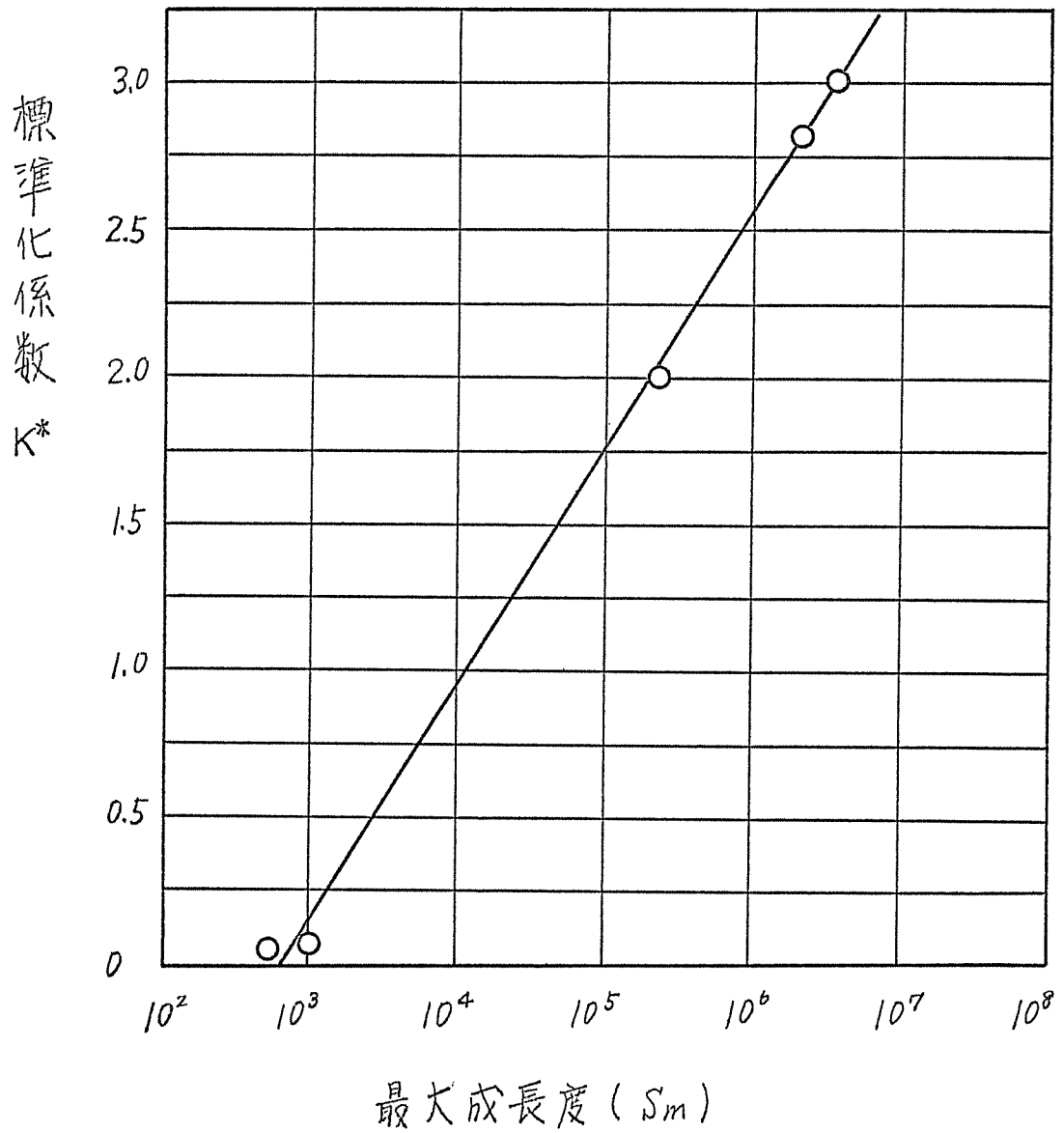




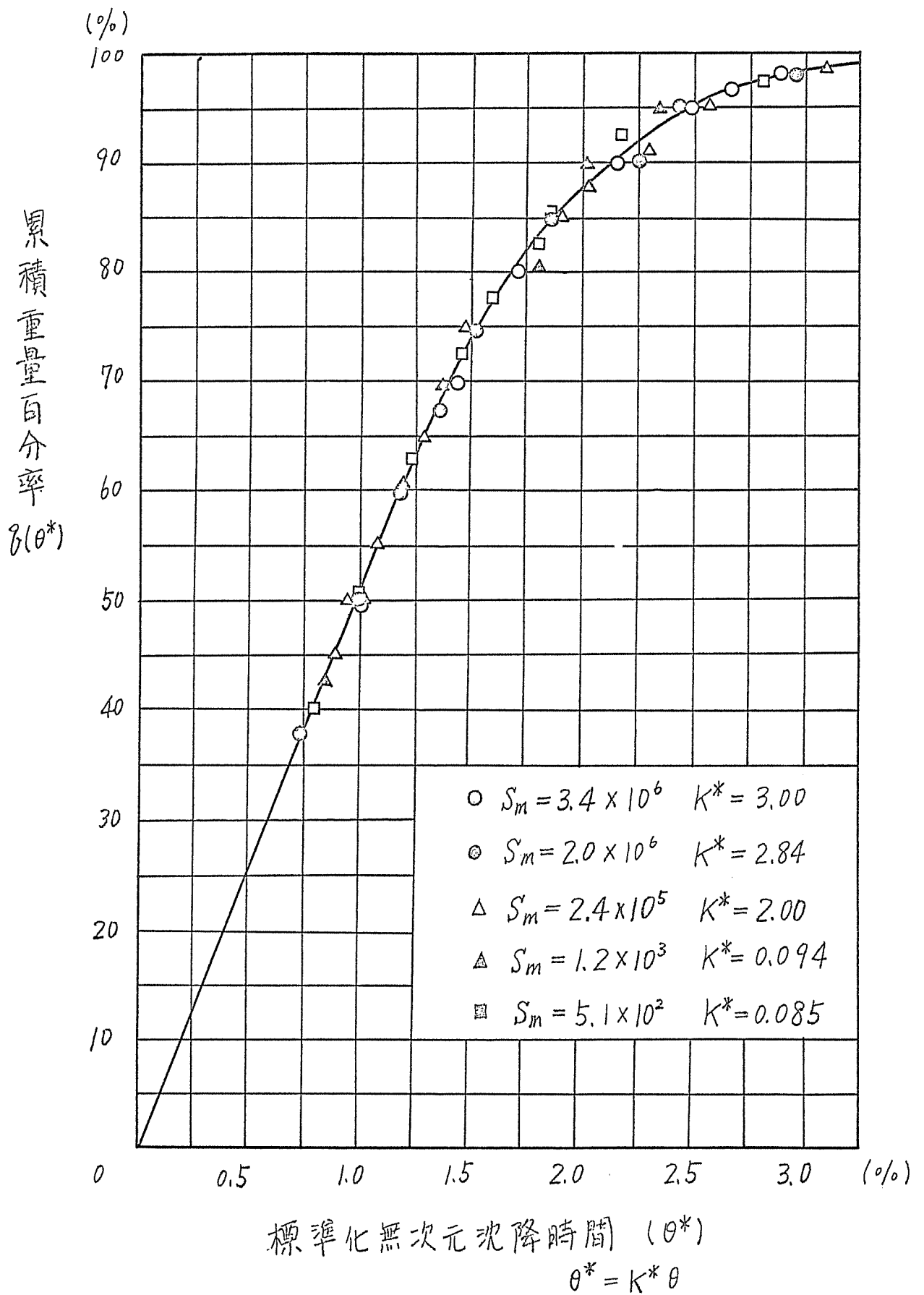
圖(4-14) 無次元化時間累積量曲線 ( $S_m = 2.0 \times 10^6$ )



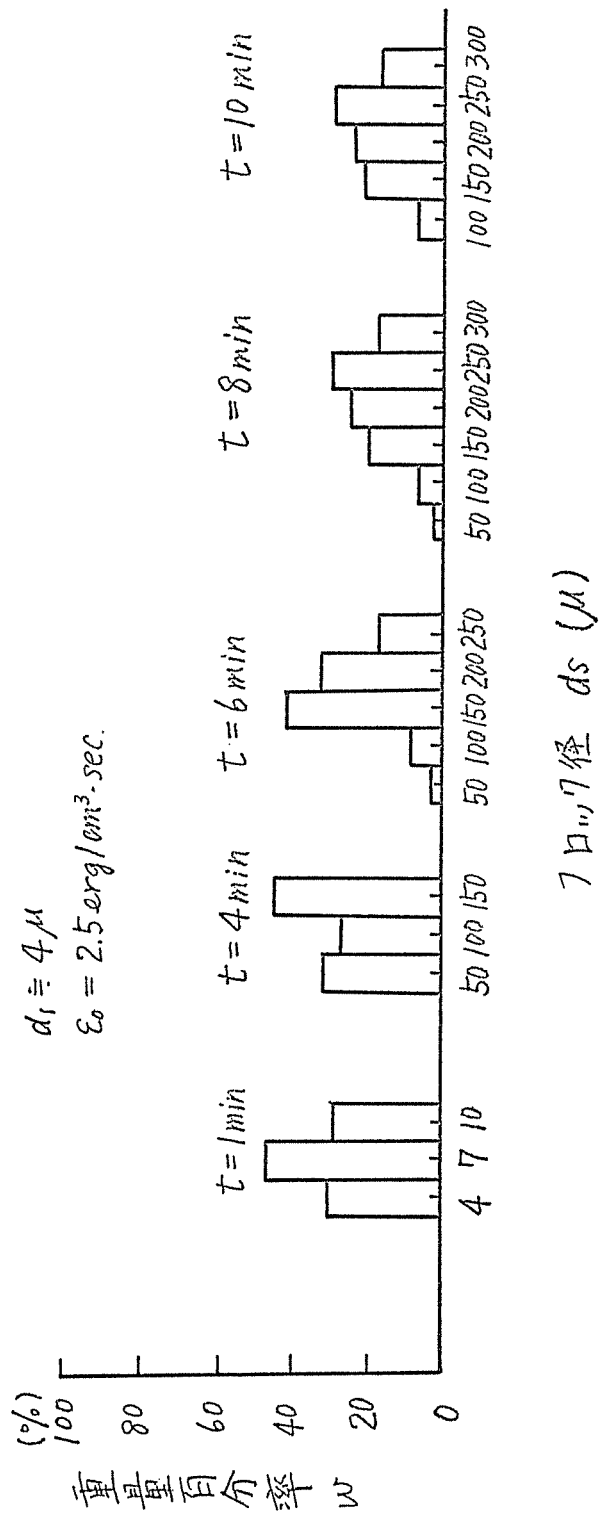
圖(4-15) 無次元化時間累積量曲線 ( $S_m = 3.40 \times 10^6$ )



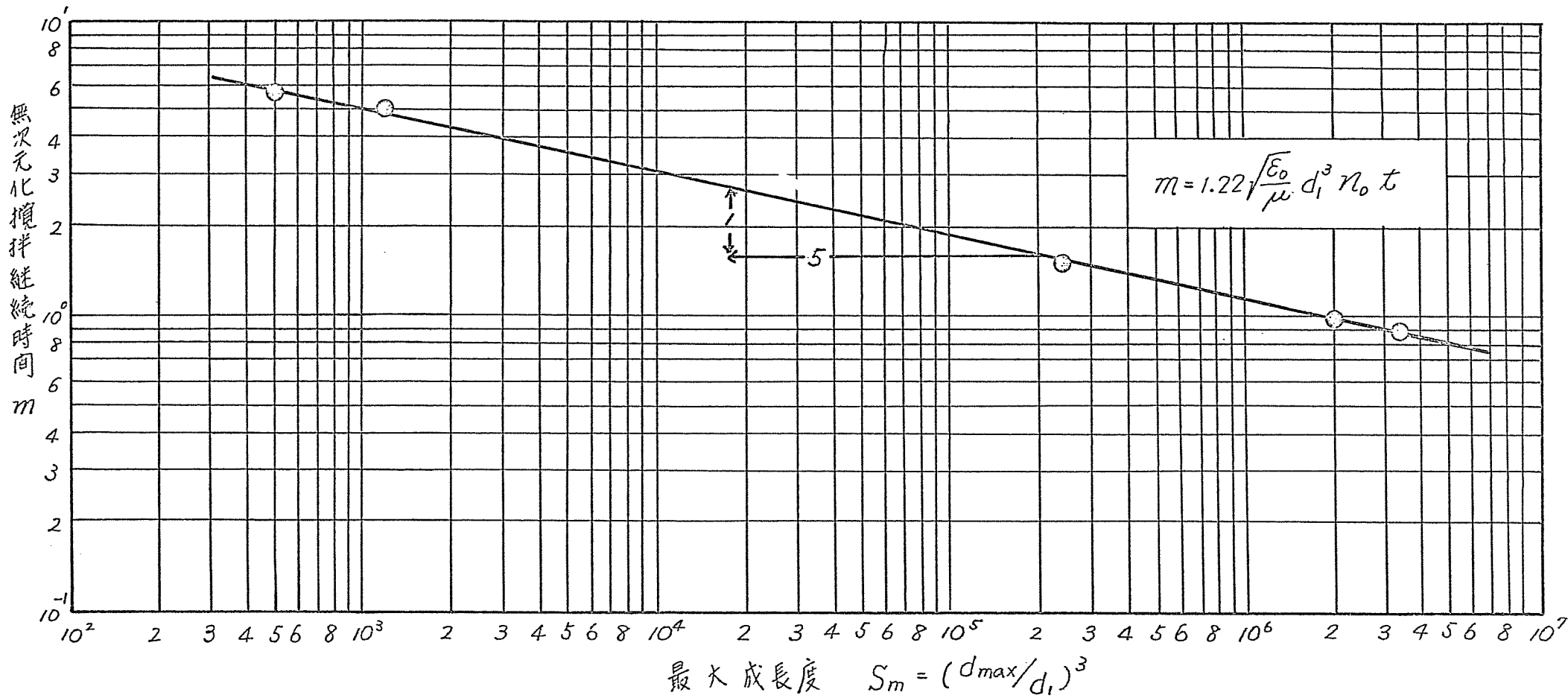
図(4-16) 無次元化時間累積曲線の標準化係数



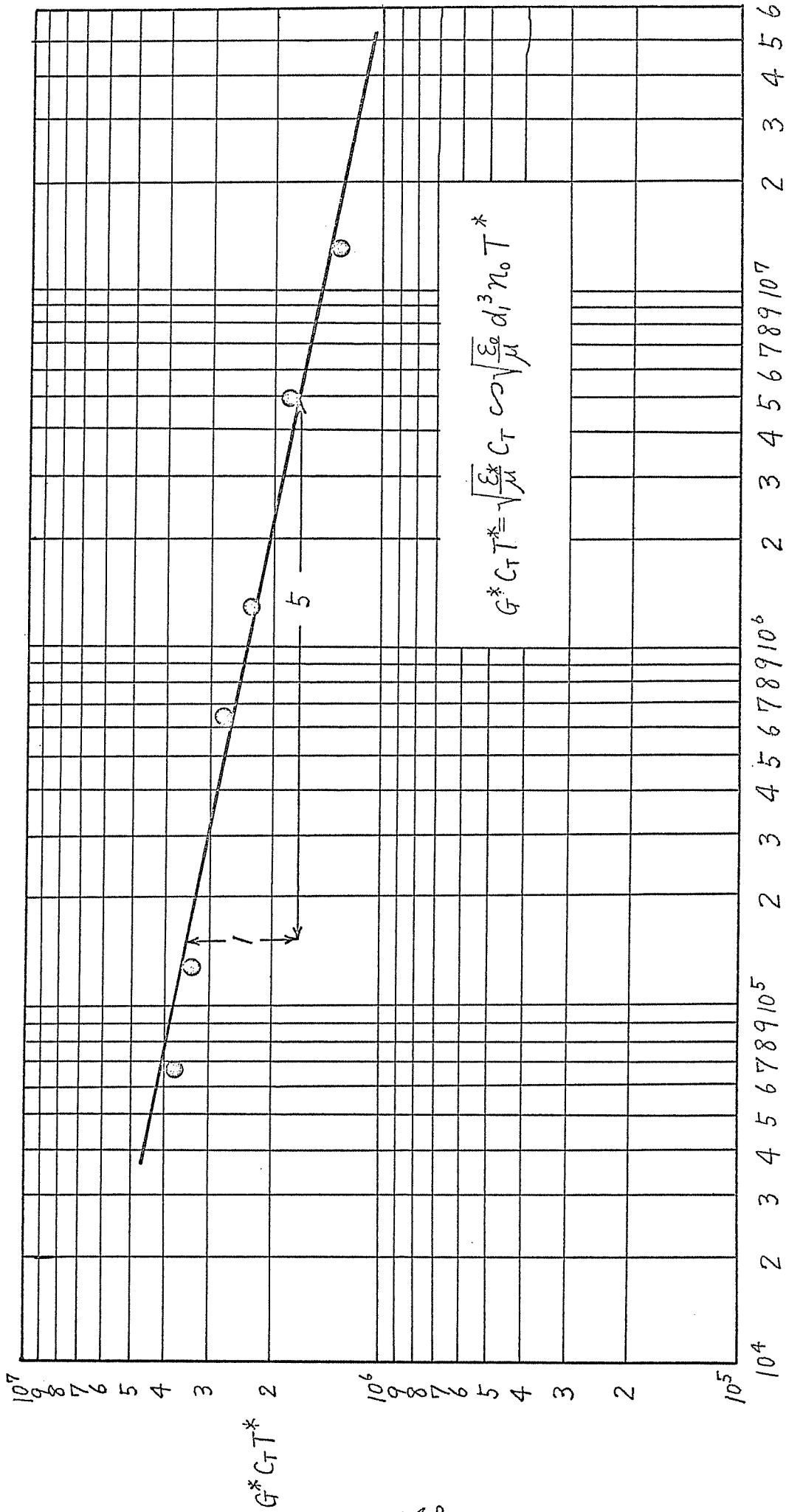
圖(4-17) 標準化無次元時間累積曲線



图(4-18) 7000 Å 形成 搅拌继续时间与 7000 Å 径の分布

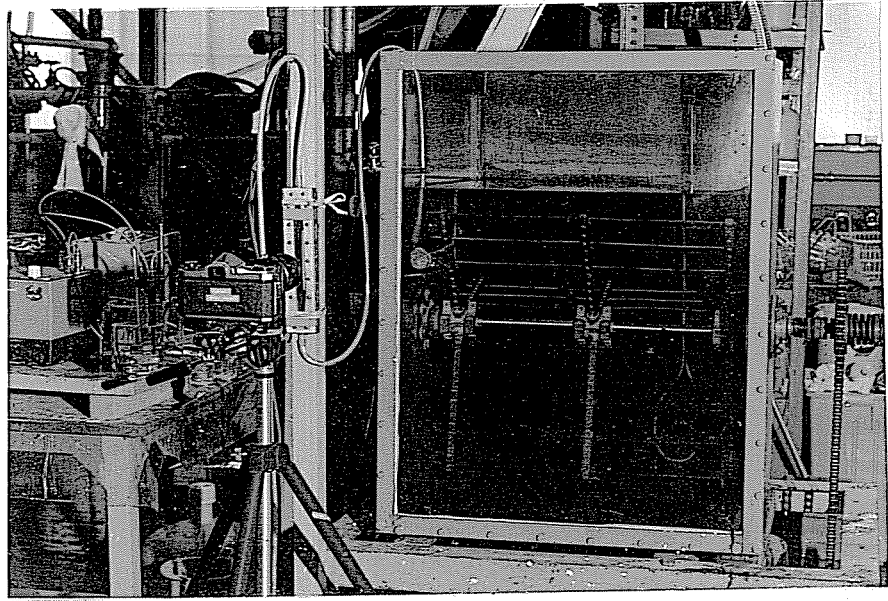


圖(4-19) 最大成長度  $S_m$  與成長平衡分布  $K$  至  $\infty$  無次元攪拌繼續時間  $m$  關係

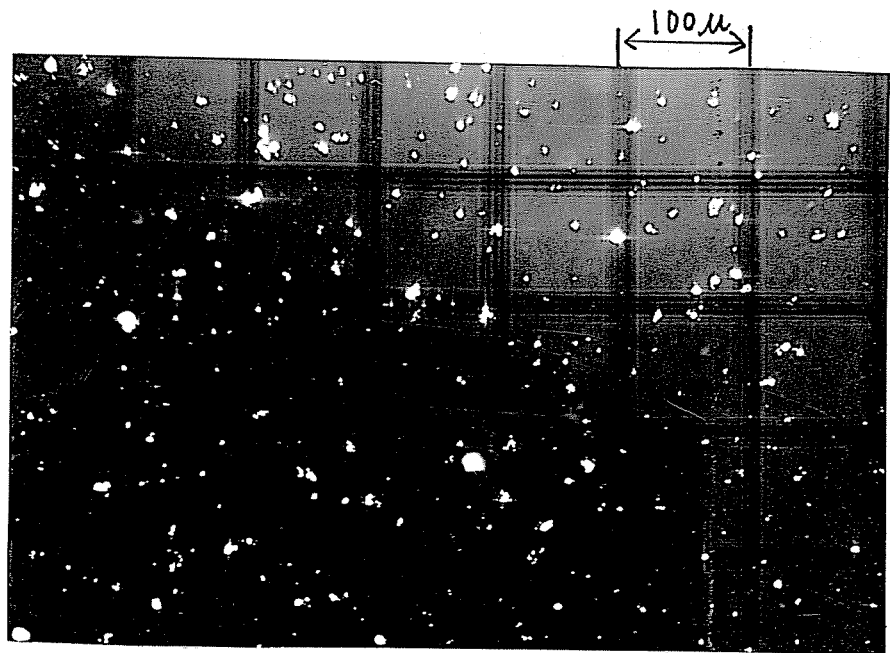


最大成長度  $S_m = (d_{max}/d_1)$

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

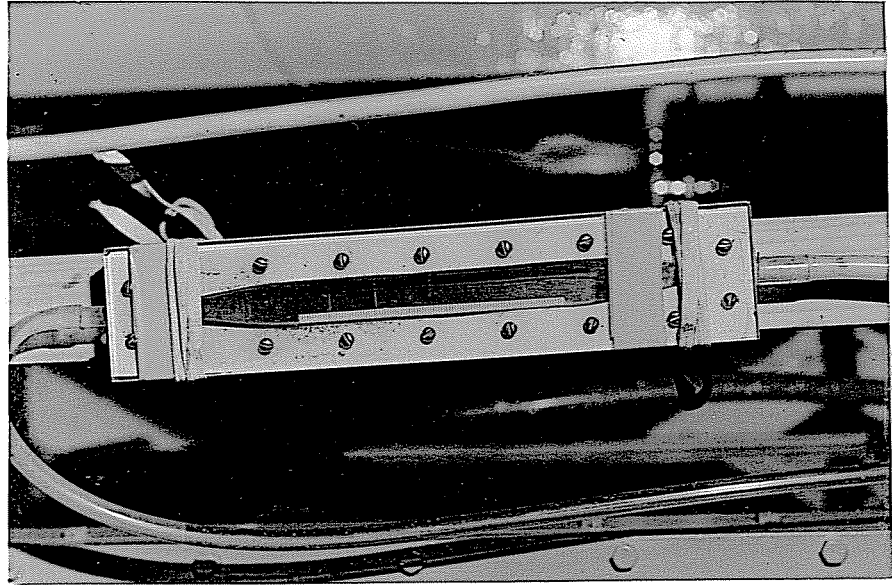


写真(4-1) 回分式フロッキエーター

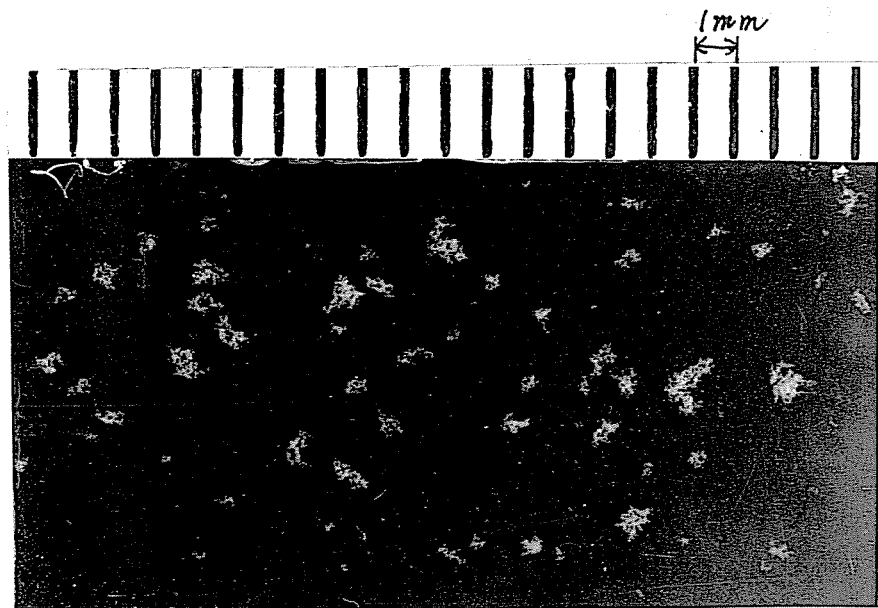


写真(4-2) 初期粒子の顕微鏡写真





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・小菅原光彦, 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(1), 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(3-29)の基礎となる定義を述べた。ここでは、 $S_m$  値、 $K_p$  値、 $S$  値を標準化して、 $S_m$  値、 $K_p$  値、 $S$  値を標準化したものを示す。また、 $S_m$  値、 $K_p$  値、 $S$  値の物理的意義を説明する。

第4章で述べた理論的実験結果を整理し、一般的な無次元・標準化を行なう。この際、 $S_m$  値、 $K_p$  値、 $S$  値を標準化する。標準化は、 $S_m$  値、 $K_p$  値、 $S$  値をそれぞれ  $S_m^*$ 、 $K_p^*$ 、 $S^*$  と表す。標準化された基本式(3-29)は、

$$\frac{dS}{dt} = S \left( \frac{S_m^*}{S_m^* + S} - K_p^* S \right) \quad (3-30)$$

となる。ここで、 $S_m^*$ 、 $K_p^*$ 、 $S^*$  はそれぞれ式(3-16)、式(2-6)、式(3-33)で定義される。

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  $d_0$  の100倍程度に達する(例えば、 $d_0 = 5 \sim 10 \mu$  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数  $S$  は式(3-33)から、 $S = (100 \sim 200)^{1.5 \sim 2.0} \approx 10^3 \sim 10^5$  (ここで、 $K_p = 1.0 \sim 1.5$ ) となり、フロック形成の進行を式(3-29)によって計算する必要がある。これは  $10^3 \sim 10^5$  元連立微分方程式を解く必要がある。現在、汎用計算機では  $10^4$  元連立微分方程式の解を求めることは原理的には可能である。しかし、計算時間とメモリ使用量の膨大となり、実用上は適用範囲をカバーできない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であるように、成長平衡時にあるフロックの粒度分布は、自己平衡分布であり、最大成長度  $S_m$  に無関係に一定の分布形を形成する。そこで、適切な  $S$  (計算機を用いた数値計算の結果を何等かの方法で標準化する) の精度の解を得るための式(3-29)の数値計算の結果を、 $S_m$  値、 $K_p$  値、 $S$  値の標準化を行なう。この際、 $S_m$  値、 $K_p$  値、 $S$  値をそれぞれ  $S_m^*$ 、 $K_p^*$ 、 $S^*$  と表す。標準化された基本式(3-29)は、

$$\frac{dS}{dt} = S \left( \frac{S_m^*}{S_m^* + S} - K_p^* S \right) \quad (3-30)$$

となる。ここで、 $S_m^*$ 、 $K_p^*$ 、 $S^*$  はそれぞれ式(3-16)、式(2-6)、式(3-33)で定義される。

よって、本章ではフロック形成基本式(3-29)の数値解

電子計算機による求め、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をなす自平衡分布となる事が実験によっても確認された。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)のフローチャート表(5-2)のプログラムを示すような Range-Kutta-Gill 法による数値積分を行なった。計算の際には、 $R$  倍粒子の無次元化個数  $N_R$  の値が  $10^{-8}$  以下となれば  $N_R = 0$  とした。これは、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、計算に当たっての独立変数  $m$  のきざみ  $\Delta m$  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)はきざみ  $\Delta m$  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  $m$  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

統時間 \$R\_m\$ の分布を、ある初期から、最終的な \$R\_m = 0.5\$ の状態に到達するまでの時間を測定し、これを、 $R_m = 10^5 \sim 10^6$  の範囲で、 $10 \sim 50$  倍の粒子群で測定した。この測定は、 $R_m = 10^5 \sim 10^6$  の範囲で、 $10 \sim 50$  倍の粒子群で測定した。この測定は、 $R_m = 10^5 \sim 10^6$  の範囲で、 $10 \sim 50$  倍の粒子群で測定した。

式 (3-29) の平衡速度式は、 $R_m = 10^5 \sim 10^6$  の範囲で、 $10 \sim 50$  倍の粒子群で測定した。この測定は、 $R_m = 10^5 \sim 10^6$  の範囲で、 $10 \sim 50$  倍の粒子群で測定した。この測定は、 $R_m = 10^5 \sim 10^6$  の範囲で、 $10 \sim 50$  倍の粒子群で測定した。

実際の測定結果は、 $R_m = 10^5 \sim 10^6$  の範囲で、 $10 \sim 50$  倍の粒子群で測定した。この測定は、 $R_m = 10^5 \sim 10^6$  の範囲で、 $10 \sim 50$  倍の粒子群で測定した。この測定は、 $R_m = 10^5 \sim 10^6$  の範囲で、 $10 \sim 50$  倍の粒子群で測定した。

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)から与えられる

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

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 ( $1/cm^3$ )、 $D_1$ ：初期粒子の相互拡散係数 ( $cm^2/sec$ )、 $t$ ：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  $\alpha$  のみしか合一体化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 の関係を示すと図(5-3)のようである。図(5-3)からも明らかになるが、slow coagulation は単に一定の衝突合一体化率  $\alpha$  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である。同一粒度組成の異なる反応時間が  $1/\alpha$  倍になることがわかる。

Hahn と Stumm<sup>4)</sup> は Smoluchowski と同様の見地から衝突合一体化率を考へ、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一体化率  $\alpha$  を求めた。図(5-4)は  $\alpha$  を pH と凝集剤添加量の間接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、衝突合一体化の際の界面土における反発エネルギー障壁の存在を考へ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

K<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ぬ。

これらの見解 (Hahn et al, Fuchs) は、これも 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  $\alpha$  を一定値と考えているため、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している。

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一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・実用化して、式(3-29)にフロック形成過程における衝突合一関数  $\alpha$  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 衝突合一確率の考え方

簡単のため、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一過程を考察することとする。

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、すなわち直径  $1/2 d_{max}$  を持つ粒子同志の衝突合一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。この合一現象では、合一した2粒子が球形に再整形し、その半径は(液滴の場合)球の直径になるが、固体フロックでは、再整形は粒子の合一する方向へ成長しえず、A方向に衝突した粒子は、衝突前の状態に戻される。粒子Pが衝突後合一でできるのは、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、実際の形成されるフロックはアルミニウムフロックのみならず、その形状は図(2-4)の様であり、球形で考えられるよりも小さく、成長方向に制限を受ける。

また、最大成長径内に納まる位置に衝突したとしても、2粒子が合一し結合を保持するためには、合一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らなければならない。剪断力は粒径の増加に比例して大きくなるので、合一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、三次元的な補強を受けながらその粒径を増して行く必要がある。

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われることとなる。フロックの形状をどの程度の形状係数で代表させようかの点上述の様にフロックが合後球形粒子に再整形されるため、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になる。

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)からも明らかになるように、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せが減少し、 $R=S$  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加理解し得よう。

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もっと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る。そこで、本論文におりては硬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使えよう。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  $d_{max}$  (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-によつ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つて決つてくる係数  $\alpha_0$ 。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、平均的な反攪エネルギー障壁を考えると La Mer 等の考えに架橋現象を示す、重合凝集剤の初期粒子表面への被覆度と云つた初期粒子の表面状態の局所性に支配される因子であらうと解釈される。

したがつて、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、上述のやうに  $\alpha_f$  は着目粒子と最大成長粒子との大きさの比によつて決まると考えられるので、 $S$  と  $R$  の関係は  $R/S$  なる形に書き換へることができ、

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

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、衝突が可能な合-ではな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存物としく成長した反攪エネルギー障壁によつて、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。

初期粒子集合数が  $S$  を越えるときは、破壊が起こり、 $R > S$  の場合、式(5-7)の方法で初期粒子の数を  $R$  に調整する。このとき、 $R$  は  $S+1$  の項式で表わされる。初期粒子の数を  $R$  に調整する場合は、式(5-7)の方法で初期粒子の数を  $R$  に調整する。このとき、 $R$  は  $S+1$  の項式で表わされる。

また、最大成長粒子 ( $S$  倍粒子) 内の一様な空隙を持つ初期粒子が配列される。この場合、 $S = 10^0$  (通常のフロックで形成される) とすると、一方方向に並ぶ初期粒子の数は10個となる。しかし上述のようになるフロックは存在しないので、この場合の  $S$  は高々  $10^0$  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  $S$  は通常問題となるフロック形成の範囲では、 $S$  に比して著しく大きい場合がほとんどである。そこで、 $R, S \gg S$  として式(5-6), (5-7)を实用に際しては次のような形の衝突確率を表わす一本化した式として用いる。

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

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)にまつ衝突合-確率が一応与えられたので、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)のようになるとされる。

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

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

----- (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、実際には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おろす。そこで、 $n$ は一度決定すれば一般的な値として汎用があることが可能であろう。また、無次元攪拌継続時間 $n$ が大きくなって分布が成長平衡状態となるときを考えると、この時の分布形が自平衡性を持つたならば $n$ は無関係に $n$ を決定す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 $n$ の代わりに $\alpha_0 n$ 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、 $\alpha_0 n$ しかつて $\alpha_0$ と独立に $n$ の値を決定することができよう。

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



が用いられることとなる。  $K_p = 1.2$  で  $S = 50, 75$  の例について、無次元攪拌時間  $m$ 、縦軸に  $R$  倍粒子の存在百分率とって粒度組成の推移を示すと、図(5-2)に示した実測の粒度分布推移のパターンを示した。成長平衡状態が出現した。これを図(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  $\Sigma$  とし、無次元攪拌継続時間  $m$  をパラメータ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、さらに標準化し得るべき範囲の粒度分布推移と成長平衡を示す曲線を次節以下におい工夫する。

## 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

前章においましては成長平衡時の標準化無次元時間沈降累積量曲線(標準化曲線)の存在するはずである。したがって、凝集条件の第1段階を前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。成長平衡に達した累加体積百分率曲線の横軸の値を  $R^*$  とし、縦軸の値を  $R$  とする。図(5-12)の横軸の目盛を  $R$  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う。縦軸に  $R^*$ 、縦軸に累加体積百分率をこの計算結果をフロックにしたところ、図(5-13)に見られるように、最大成長度を異にしたもすべの成長平衡時の粒度分布は完全に一本の標準化された分布で示されることか確認され、前章の実験結果と併用し、この関係から、  $K_p = 1.2$  では  $R_{50-ult}$  の値は  $1/2$  の場合も最大成長粒子  $\lambda$  の初期粒子集数  $S$  の  $42\%$  の値であり、  $R_{50-ult} = 0.42 S$  とし標準化分布を所定の  $S$

の粒度分布に交換することができると。

与条件で形成しうる最大フロックの体積を  $V_{max}$ 、成長平衡分布におり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  $K_g$  に対する  $S$  と  $R_{50-ult}$  の関係が分かれば、それ以外の  $K_g$  に対するそれらの関係を知ることができると。  $K_g = 1.0$  に対するは、

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

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  $K_g$  の値に対し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  $K_g$  の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倍数  $R^* = R/R_{50-ult}$  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一しうるという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)場合に対する分布の標準化を、第2段階として考えよう。

最大成長度を等しくし ( $S = 50$ )、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  $\alpha_0 m = 3.0$  の曲線)の横軸の粒子倍数  $R$  を標準化フロック倍数  $R^*$  に変換し、さらに  $R^* \frac{3}{3-K_g}$  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 $R^{*3/2-K_p}$ にとりおけば、成長平衡分布は常に一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、フロック形式基本式(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だ次元項として定義されることが容易に理解しえる。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次元適径 $R^{3/2-K_p}$ から直ちに求められることとなる。

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。

このようない平衡分布に達して見なせる無次元攪拌継続時間 $mc$ は、最大成長度 $S_m = (\alpha_{max}/\alpha_1)^3$ にまつ累なり $\log S_m$ と $\log mc$ の間に直線関係が成立することから第4章4-2節で実験値を用いて明らかとされた。本章においても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う。み。

## 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)のようない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を明らかにした。しかし、そこから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 $S$ ,  $K_p$ ,  $m$ のうちの無次元指標にまつ(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)を示すことができる。この内、自平衡分布にまつは $S \cdot K_p$ のみが主たる分布形決定の因子であつたが、過渡状態を考慮して行くと場合によっては $m$ 値にまつ検討も必要となる。

実際、フロック形成池の設計・運転を考えたみると、 $m$ 値も構成する諸因子(式(3-16)参照)のうち設計段階で固平均滞留時間)もであり、運転中に変化させうるものは攪拌強度因子 $\epsilon$ である。また、原水条件にまつ定まつくするものは $\alpha_1$ ,  $n_0$ (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)の間係から最大成長粒子径に影響するもので、後続する沈殿池の除去特性が固定されて以上は大幅に変化させることはできない。

したがって、低濁原水がフロック形成池に流入して来る場合においては、 $\alpha_m$  (濁度) が小であるため、実滞留時間  $m$  ではその条件での成長平衡に達するに必要は無次元攪拌継続時間  $m_e$  に至ることができないで ( $m < m_e$ )、成長過程の途中で次段の沈殿池へ流出して行く。したがって、急速ろ過システム最適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。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 [例えは図(5-12)] を用いて次のように計算結果を処理して行った。

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 ( $R^*$  の定義にしたがって、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  $m$  を横軸にとり、各々の時間  $m$  における標準化 50% 累加粒子倍数を縦軸にとり  $(\alpha, m) - R_{50}^*$  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  $m$  を読みとって整理すると表(5-5) の第 2 ~ 5 欄のようである。

4) 2) 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  $m$  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



これらの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  $K_p$ )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(5-18)の横軸を  $R_p^*$  から  $R_p^* - K_p$  に変換して、 $S \cdot m \cdot K_p$  のフロック形成の子因子の可変性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、間隙水を含まない見かけ上のフロック体積が問題を取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示されるようになった。

### 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を考慮して、分布に達するに要する無次元攪拌継続時間を知らなければ、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  $S$ ) とし、縦軸に攪拌継続時間  $\alpha \cdot m$  ( $\alpha$  が確定しただけで、 $\alpha$  をも含まない変数とする) をとって、図(5-17)の汎用標準化累加粒度曲線の各々の  $R_p^*$  値に至るに必要の攪拌継続時間をプロットすると、図(5-18)のようになる。ここで  $\log(\alpha \cdot m) - \log S_m$  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、 $\gamma$  :  $\log(\alpha \cdot m) - \log S_m$  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  $R_p^*$  が大きくなるにつれて徐々に増加する。この事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 ( $R_p^*$  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  $\alpha \cdot m$  だけ継続した時の分布を示す標準化指数値  $R_p^*$  を知り、図(5-17)の曲線群に対応



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、 $g^*=1.0$ は意味する。

1) 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一する指標値 $g^*$ 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 $g^*$ 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。

2) 横軸に $\theta^*$ をとり縦軸に $g(\theta^*)$ をとって $g^*$ をパラメータとして図(5-19)と図(5-20)を描き直すと、図(5-21)のようになり最大成長度 $S_m$ 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。

3) 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)のようになり標準化 $m$ 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 $g^*$ を持つフロック群分布にとれだけの無次元攪拌継続時間 $m$ で達するかを知り必要がある。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)からある汎用標準化 $m$ 曲線(パラメータ $g^*$ )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。

図から明らかになるように、ある粒度分布 $g^*$ に達するため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らこれも確認され、 $S_m \approx 10^7$ (実測)から $S_m \approx 10^2$ (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



3 とあると、2 粒子が衝突しても合-でさな-い確率の裸の  
 表面同志が衝突した場合の  $0.7 \times 0.7 = 0.49$  と被覆され  
 表面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-でさな-い割合となる。したがって  
 衝突した場合の確率は裸の表面と凝集剤で被覆された  
 表面同志が衝突した場合の  $2(0.3 \times 0.7) = 2 \times 0.21 = 0.42$

この様な単純な機構を仮定することによって、 $\alpha$  を推算す  
 ること(5-6)のようになる。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場合には、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  
 しない。

図(5-24)は丹保がかつ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 50 ppm, 硫酸アル  
 ミニウム 30 ppm, pH 8.0 と云った値と対比してみると、  
 次のように上述の  $\alpha$  の値の妥当性が理解できる。すなわち、  
 硫酸アルミニウム 100 ppm でゼータ電位が飽和に達して  
 いるところから凝集剤の被覆度が 100% の値はほぼ 100 ppm  
 となる。この場合、硫酸アルミニウムの添加量による状態  
 変化は無視しうる。すると、30 ppm 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  $\alpha$  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  
 件に於いて行なわれた測定ではないので、表(5-6)で得られ  
 た  $\alpha \div 1/3$  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  $\alpha \div 0.4$  は一応の一致を見ても  
 して満足しなげなければならないであろう。

この様に考えると、硫酸アルミニウム添加量が更に少  
 い 5 ppm で凝集を進めた場合には、 $\alpha$  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  
 が  $\alpha$  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  $\alpha$  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)は最適凝集条件(残留濁度最少条件)で形成  
 させた母フロック群に最適凝集条件で生成させた微小フ  
 ロックを吸合させた場合であり、図(5-26)は同一の母フ  
 ロック群に最適値よりもはるかに低い pH で凝集させた微  
 フロックを吸合させた場合である。また、図(5-27)は同  
 じ母フロック群に凝集剤を加えないカオリンのみで吸合

させは場合につりマ示ししたもみである。  
 合)おまびのから、凝集加量か衝突の存在状態(加水分解の進行度  
 あり、通常のみ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、 $\alpha$ を用いて設計を行なっても差し支えないと考  
 えられる。

$\alpha$ の値を鋭和ゼータ-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 $\alpha = 1/3$ 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)を用いることによつて、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  
 去特性を知ることも可能となつた。したがつて、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ると考えられる。

### 5-8 まとめ

本章において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  
 実測結果とを比較して、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。

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

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 $\alpha_j$ に關する因子とし  
 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数 $S$ として理論式  
 に導入される)、②着目してゐる衝突合-によつて形成さ  
 れるフロックへの初期粒子集数、および③初期粒子の表

面状態にまつて決まる孫数  $\alpha_0$ 。

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なつた特性を有する点を考慮し、式(5-8)のまうな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隨しうるものであり、シミュレーションの結果次の諸点を新うたにあらわすに再び確認した。

$K_S=1.2$  の  $S=50, 75, 100, 200$  での数値計算にまつ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つた。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  $S$  と次のまうな関係にある。

$K_S = 1.0$ 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  $K_S$  が異なつても、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つてすべての  $S$ ,  $K_S$  を異にする粒度分布は同一分布形となつた。したがつて、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。(回(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、  
 累積分布は  $S$  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  
 示される。 (図(5-16), (5-17))  
 連続時間  $m$  は最大成長度  $S_m$  が増加するにつれて減少し、  
 成長平衡分布になる。 (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、  
 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  
 段階に適用しうる形の汎用標準化無次元時間累積  
 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おける標準化係数  $K^*$   
 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  $\theta_{50}^* = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$  % の  
 ついての汎用標準化  $m$  曲線を、パラメータ  $g^*$  によって  
 $g^* = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$  の曲線と名付けた。

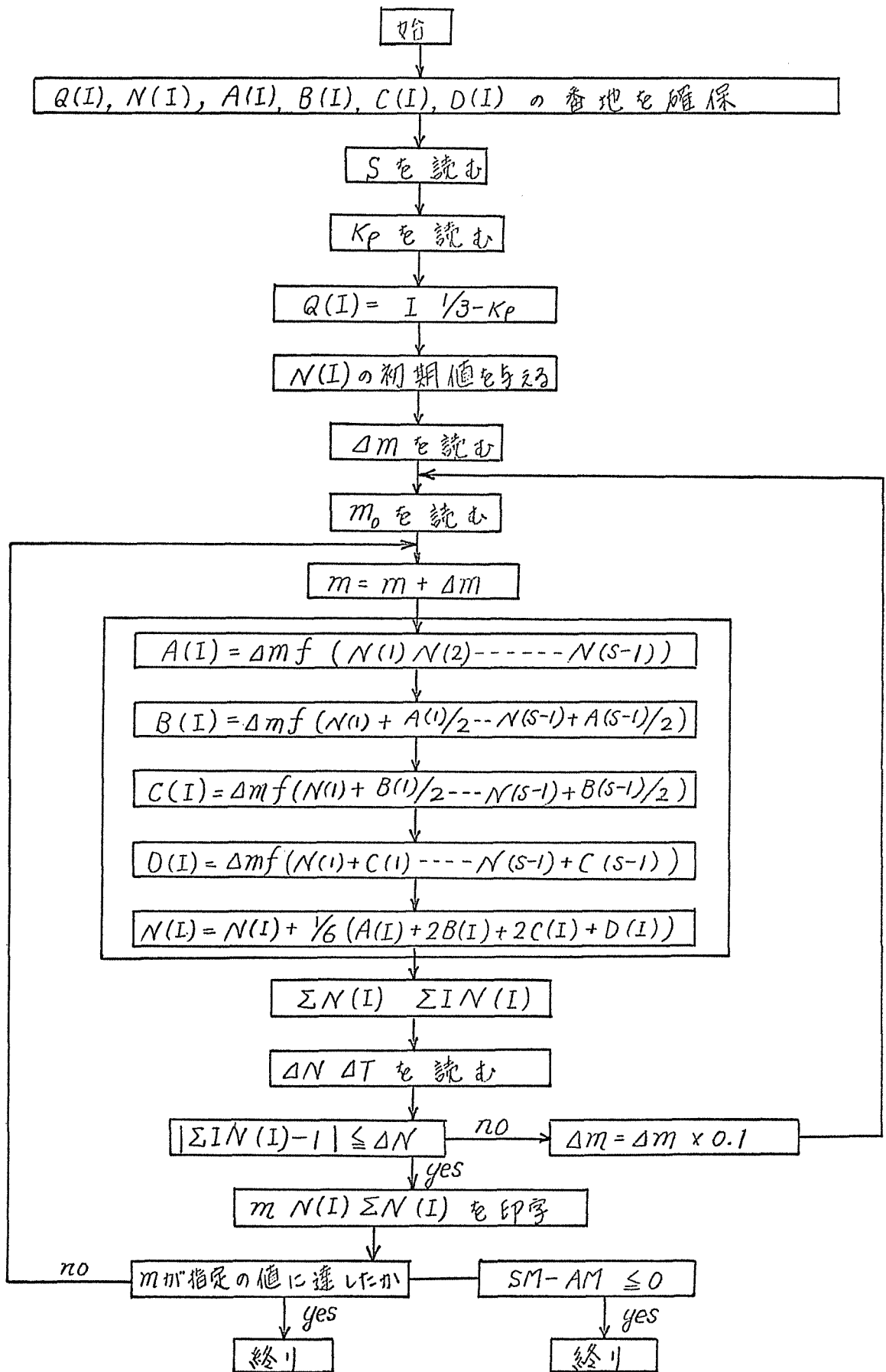
任意のフロック形成時におけるフロック群の沈降性状を  
 汎用標準化  $m$  曲線によって算定するためには、あるパラメ  
 ター  $g^*$  をもつフロック分布にどれだけの攪拌時間で達す  
 るかを知らなければならぬ。  $g^*$  で示されるある粒度分布  
 に達するに必要な無次元攪拌連続時間  $m$  と最大成長度  $S_m$   
 の関係は図(5-23)で示され、 $S_m = 10^6$  (実測) から  $S_m =$   
 $10^2$  (計算) と云った広い範囲にわたって式(5-11)の関係が成  
 立していることが明らかとされた。

フロック形成速度に関する衝突-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る数値  
 であり、総和ゼータ電位を基準としてその大略の値を推算  
 する。また、実測のフロック形成速度と  $\alpha_0 = 1$  として



値計算によって求めたフロック形成速度を比較するとき  
によってその値を推定することができると。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7口7形成式の解法のフローチャート



表(5-2) フロック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
$\sum V_i^*$	→	標準化ブロック総体積比
$V_i^* = \frac{V_i}{V_1}$	( $i=1 \sim 50$ )	→ 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 <sub>p</sub>
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

$R_{50}^*$ \ 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

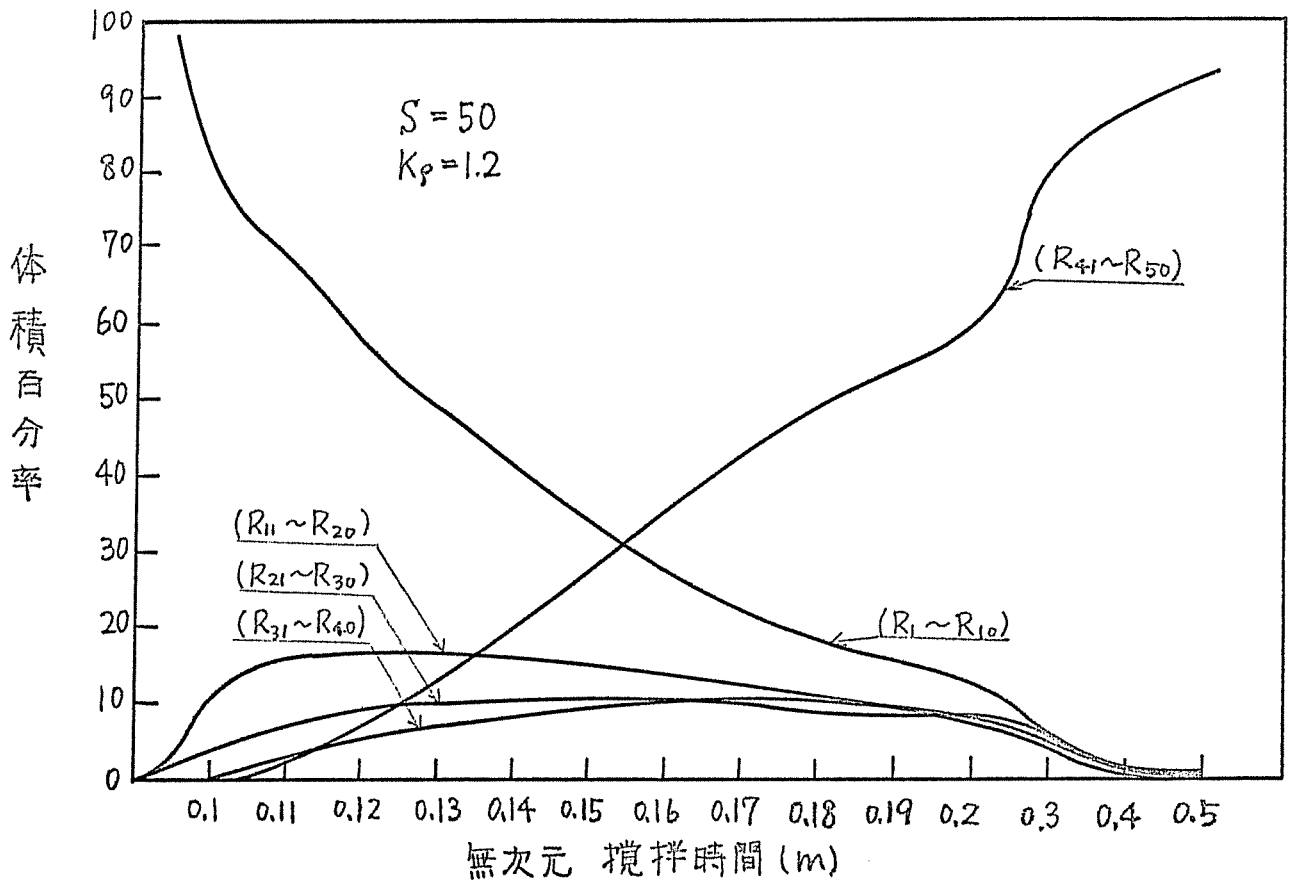


表(5-6) フロック形成速度の比較による $\alpha_0$ の推定

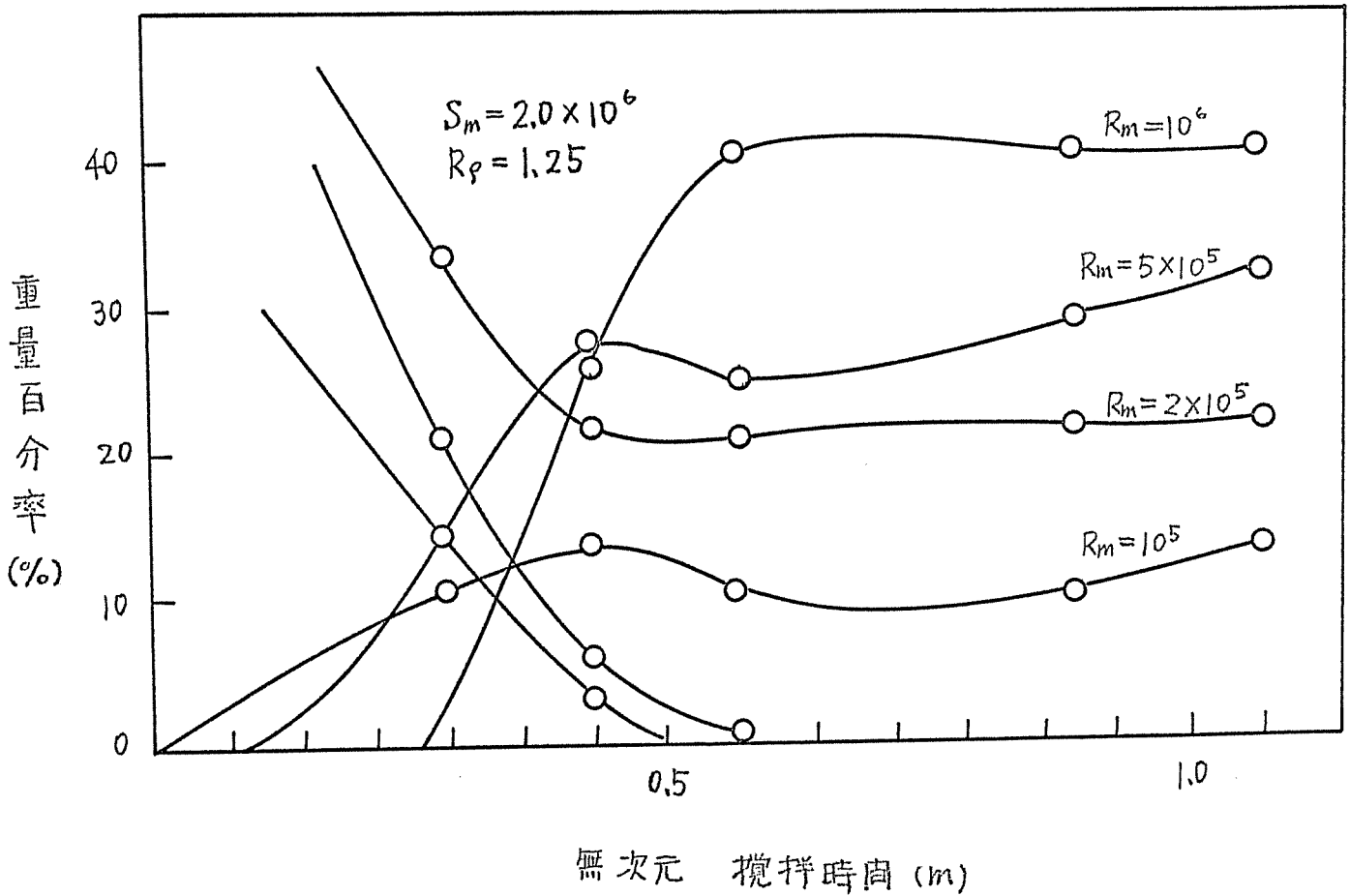
$\delta^*$	$S_m = 300$ の時の値		$\alpha_0 = \frac{\alpha_0 m}{m}$
	図(5-23) からの $m$	図(5-18) からの $\alpha_0 m$	
1.0	7.0	2.8 程度	0.40
1.5	1.5	0.45 "	0.30
2.0	0.64	0.22 "	0.34
2.5	0.44	0.13 "	0.30
$\alpha_0$ の平均値 $\div 0.35$			

表(5-7)  $\alpha_0$  の仮説による推算値

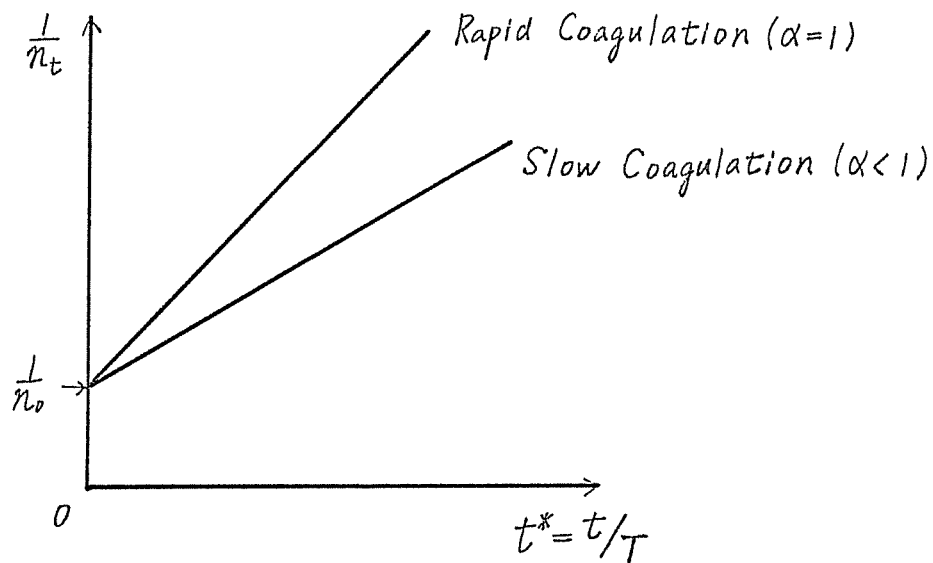
凝集剤の被覆度	凝集合一の初期確率 $\alpha_0$
0.1	0.18
0.2	0.32
0.3	0.42
0.4	0.48
0.5	0.50
0.6	0.48
0.7	0.42
0.8	0.32
0.9	0.18



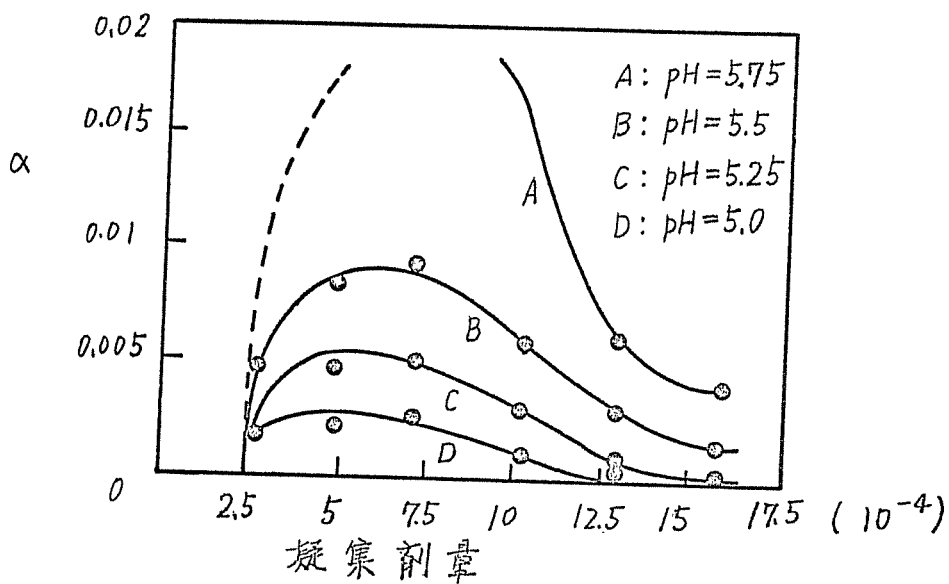
図(5-1) 無次元攪拌時間の経過に伴う  
粒度組成変化(数値計算による)



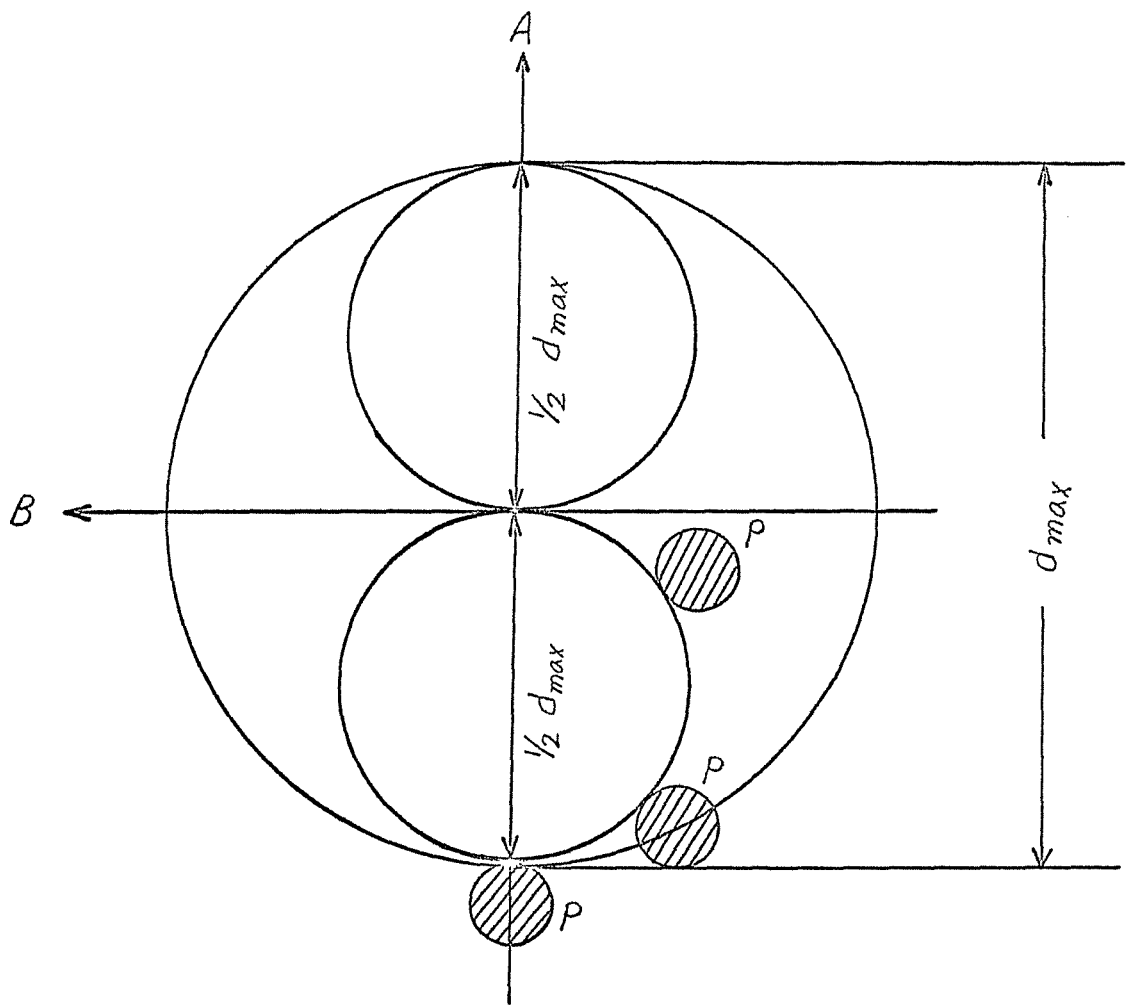
図(5-2) 無次元攪拌時間の経過に伴う粒度組成変化(実験による)



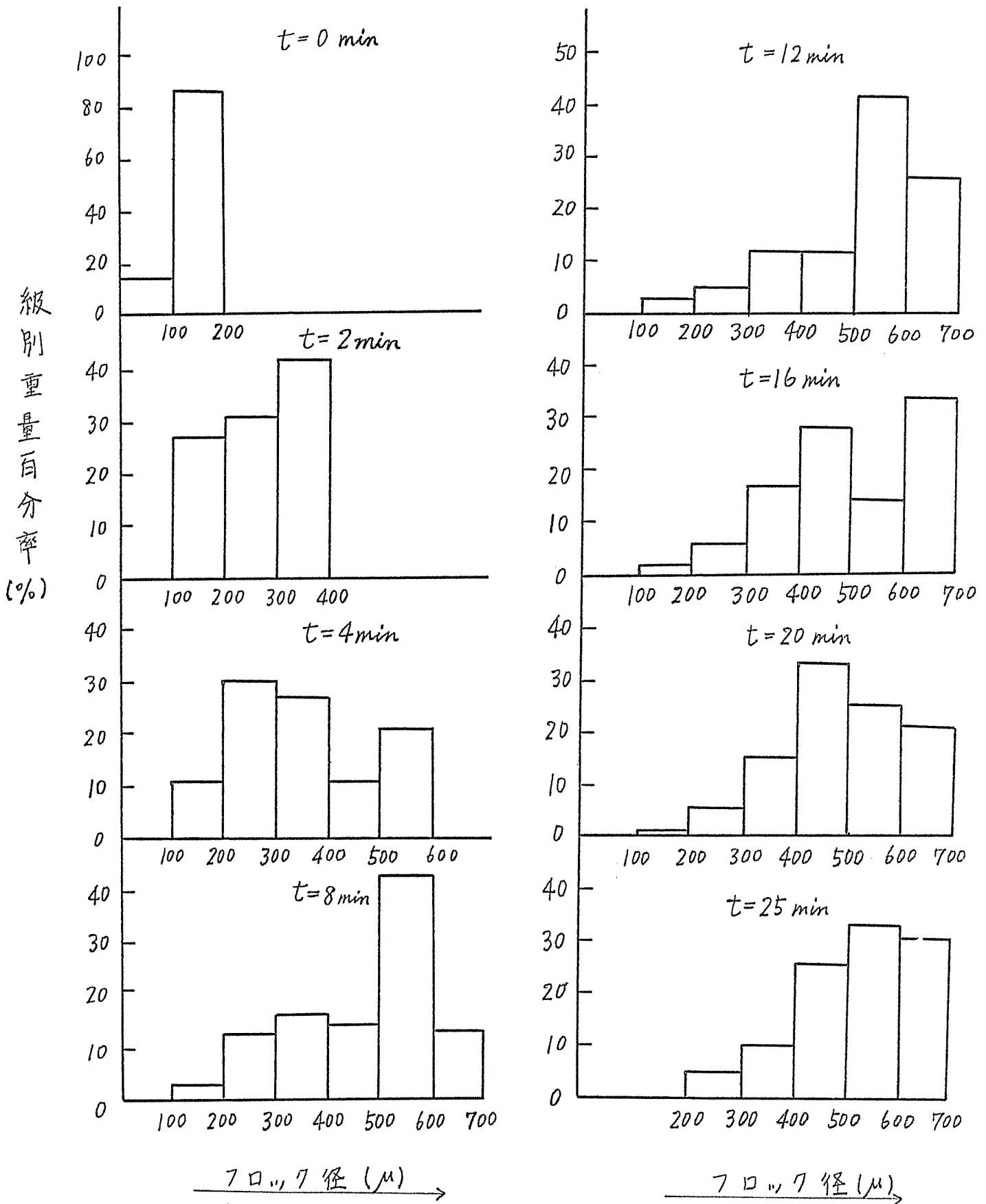
図(5-3) Slow Coagulation & Rapid Coagulation



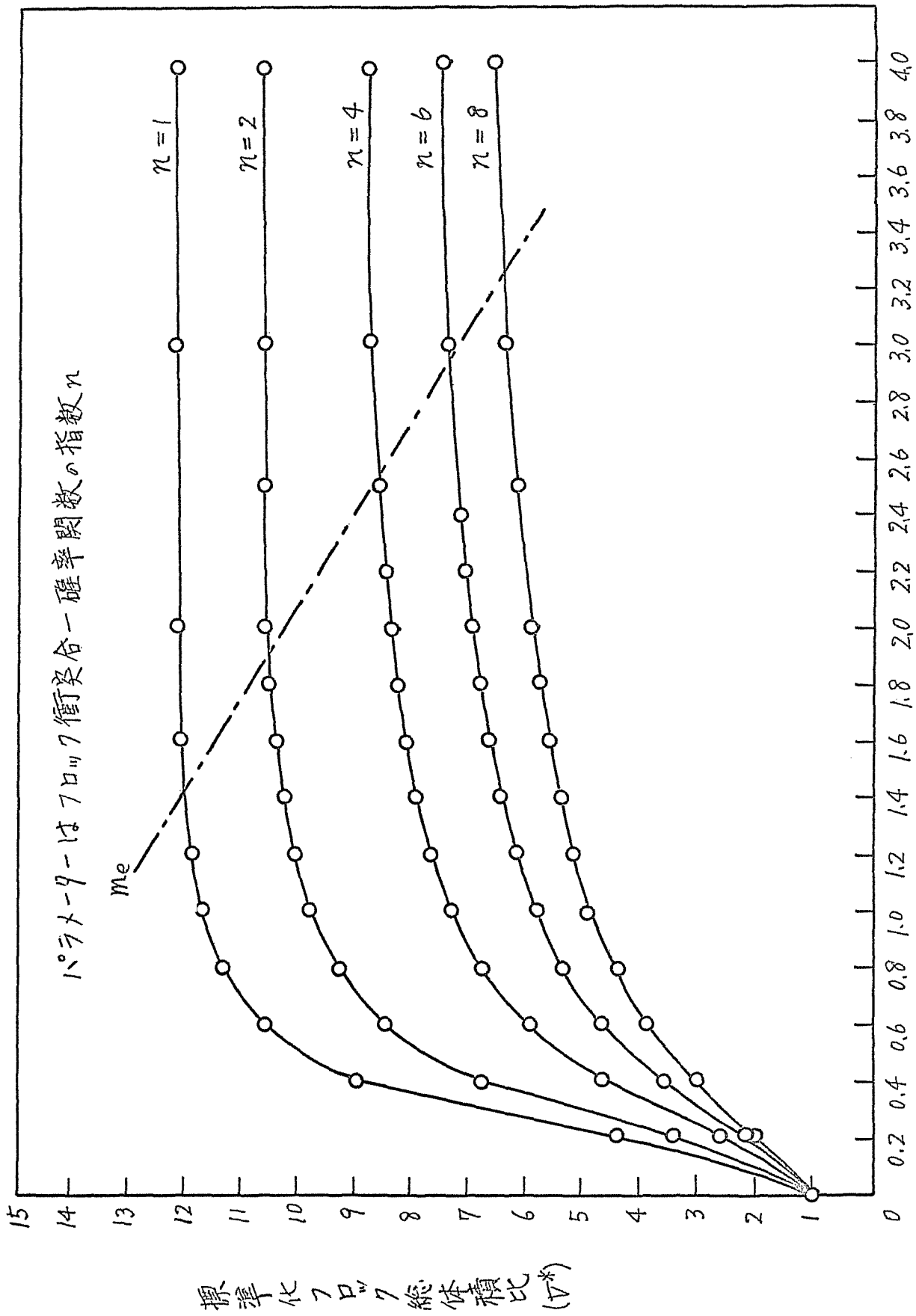
図(5-4) 凝集条件の違いによるフロック形成のおくれ



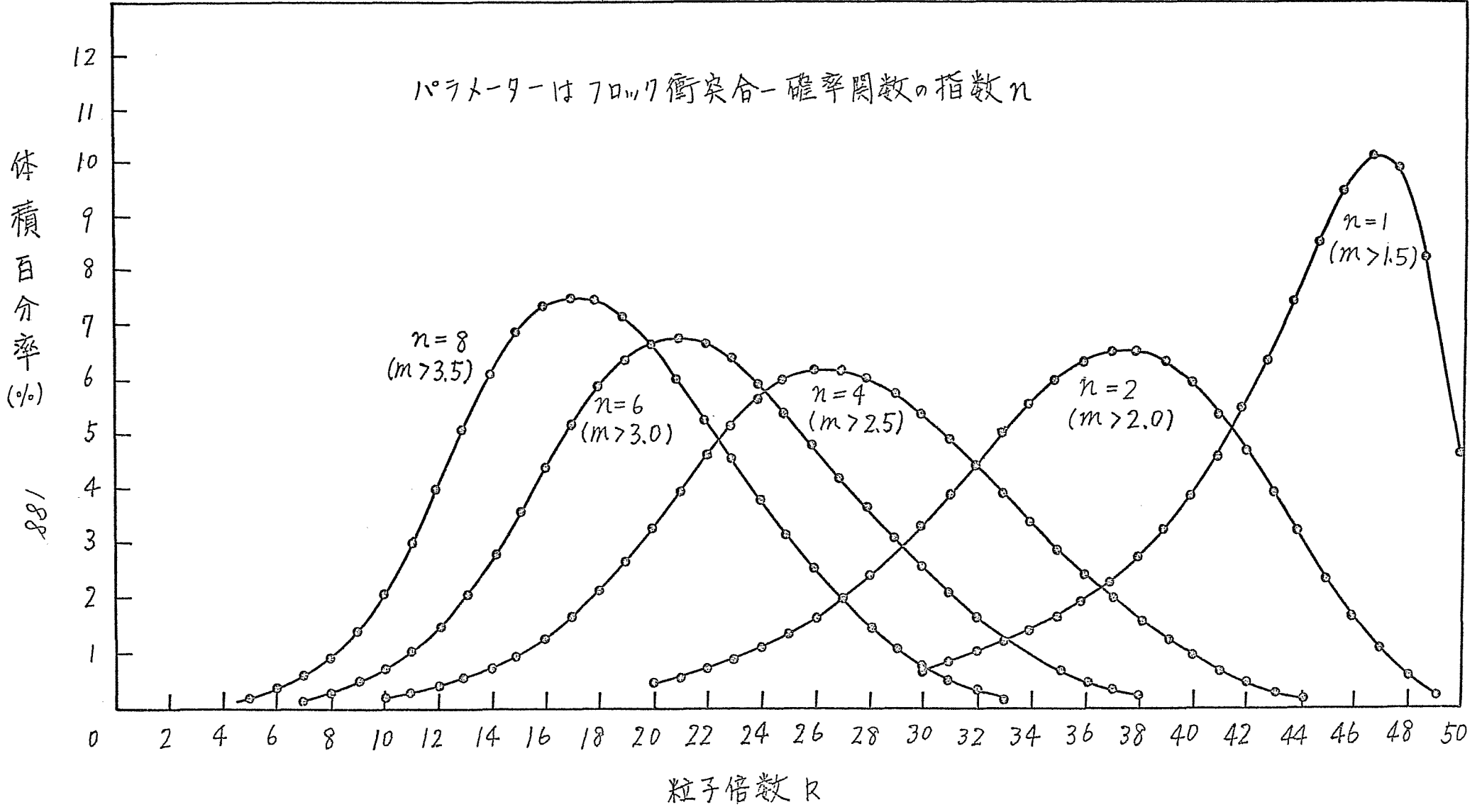
図(5-5) 合モデル



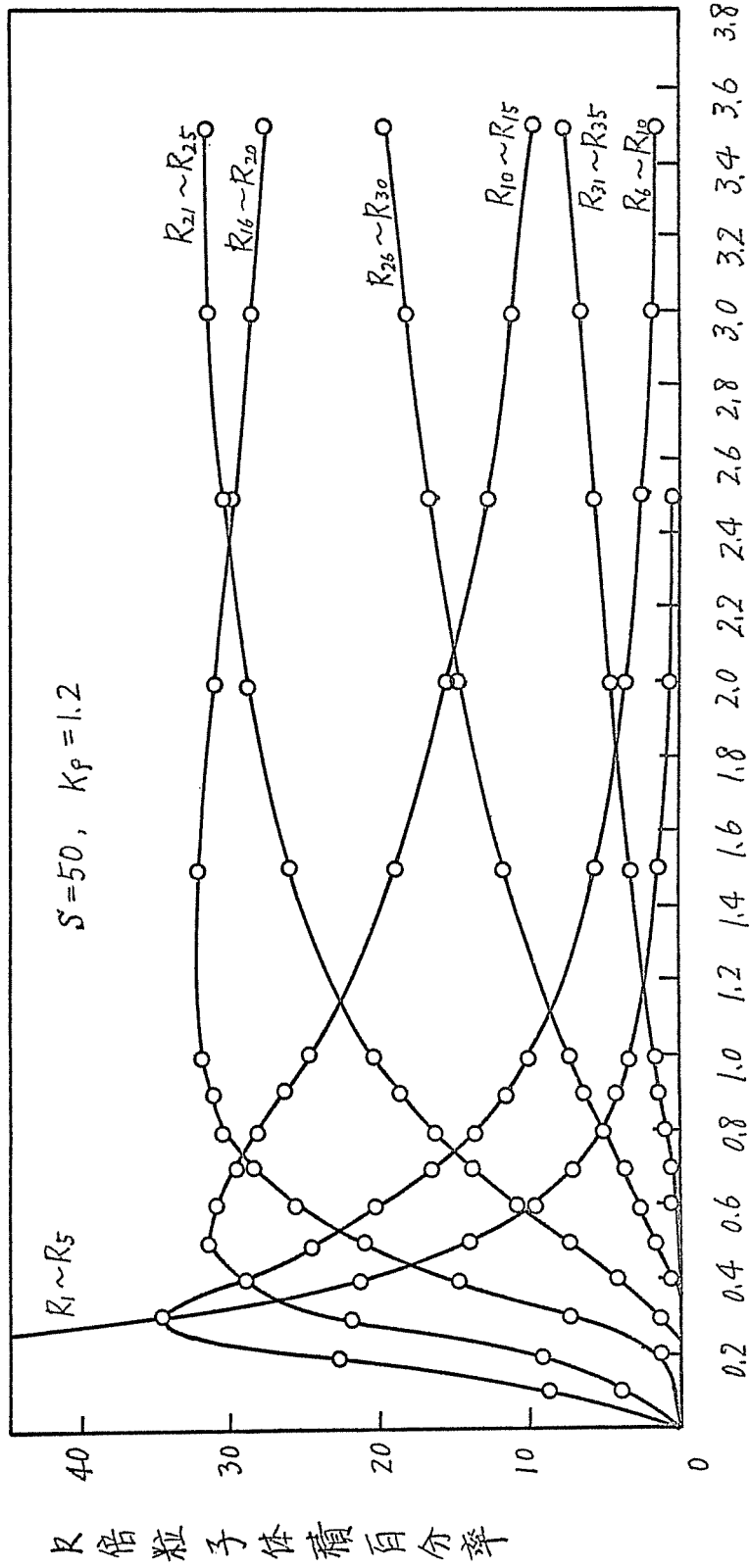
図(5-6) 攪拌時間 $t$ の経過に伴う700 μ径分布の推移(実験による)



図(5-7) 攪拌継続時間の経過に伴うフロウ体積の変化

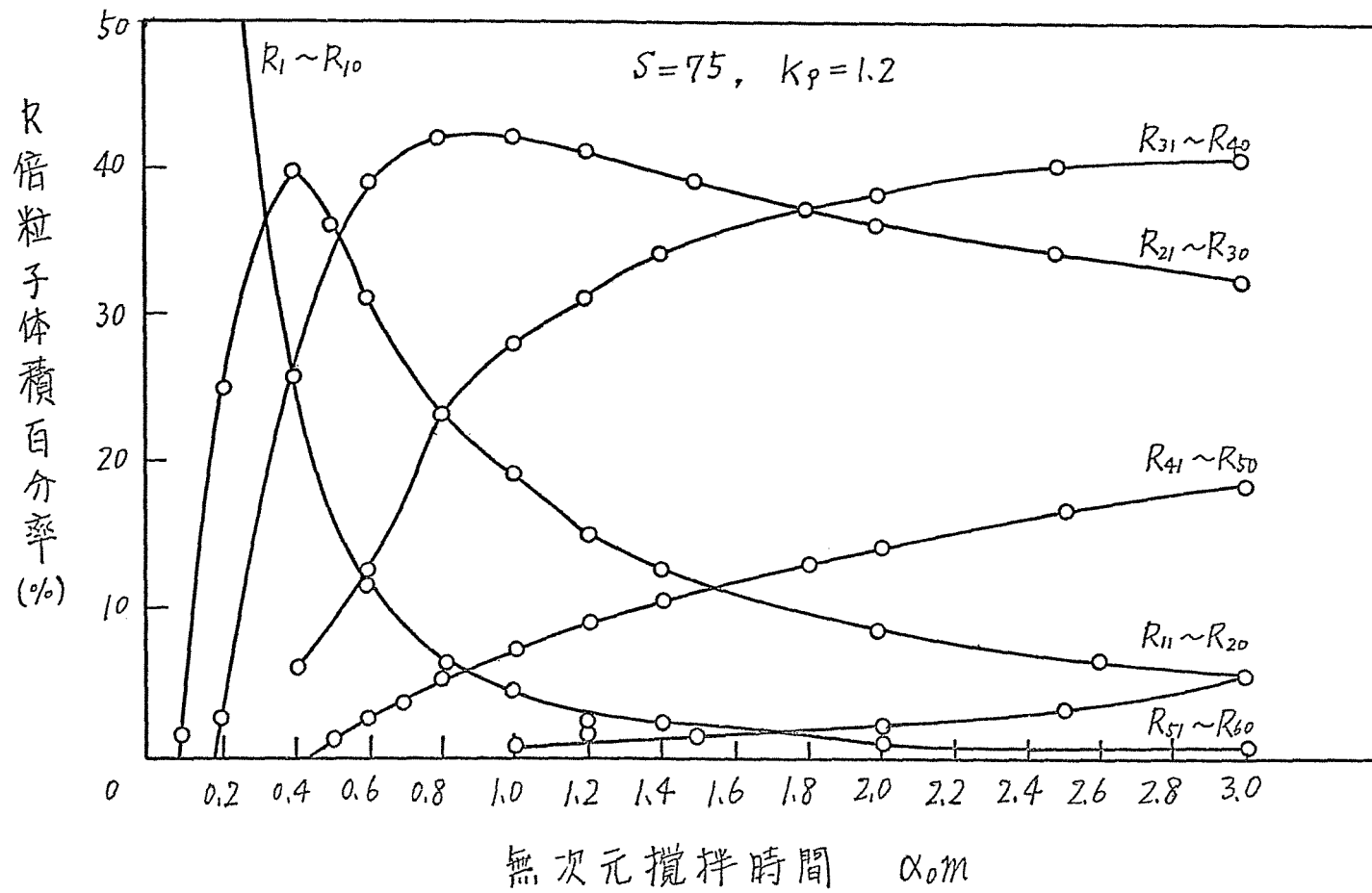


図(5-8) 成長平衡時におけるフロー粒度分布.

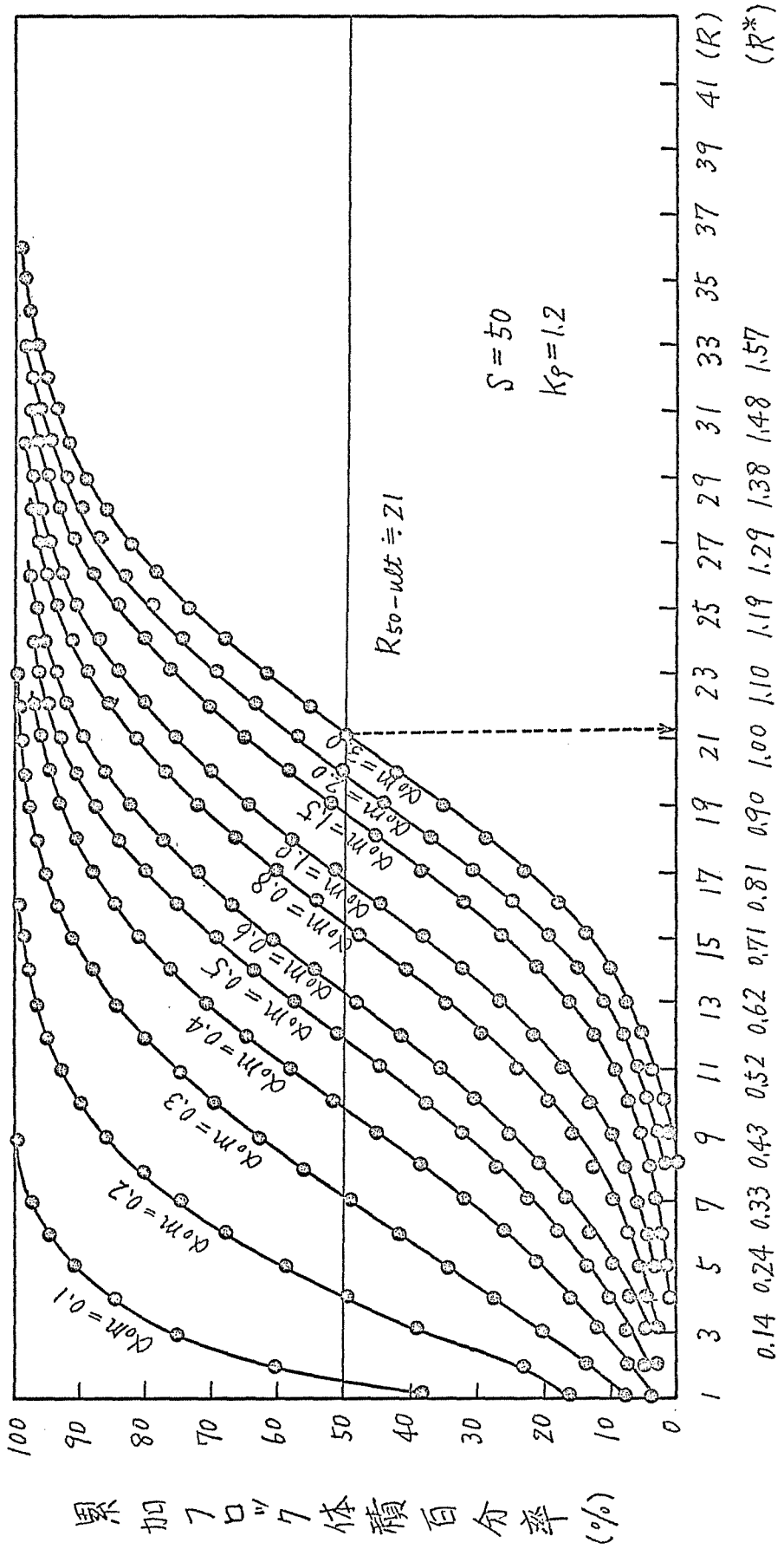


図(5-9) 無次元攪拌時間の経過に伴う粒度組成変化(数値計算による)

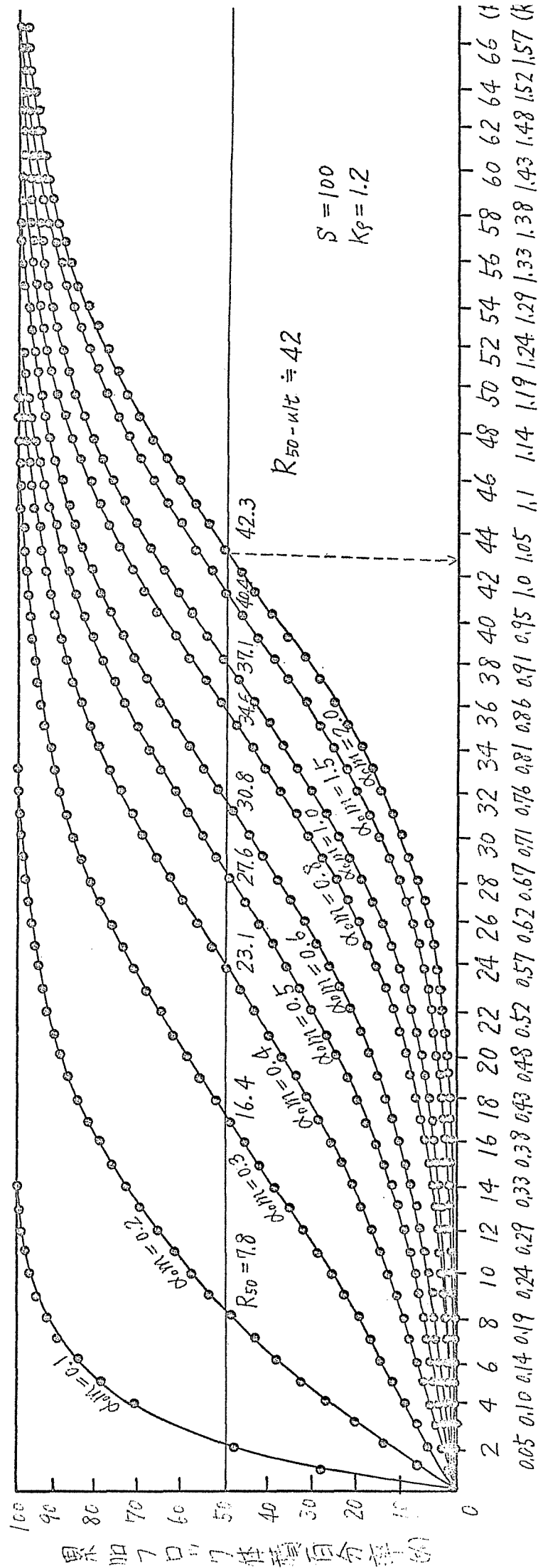




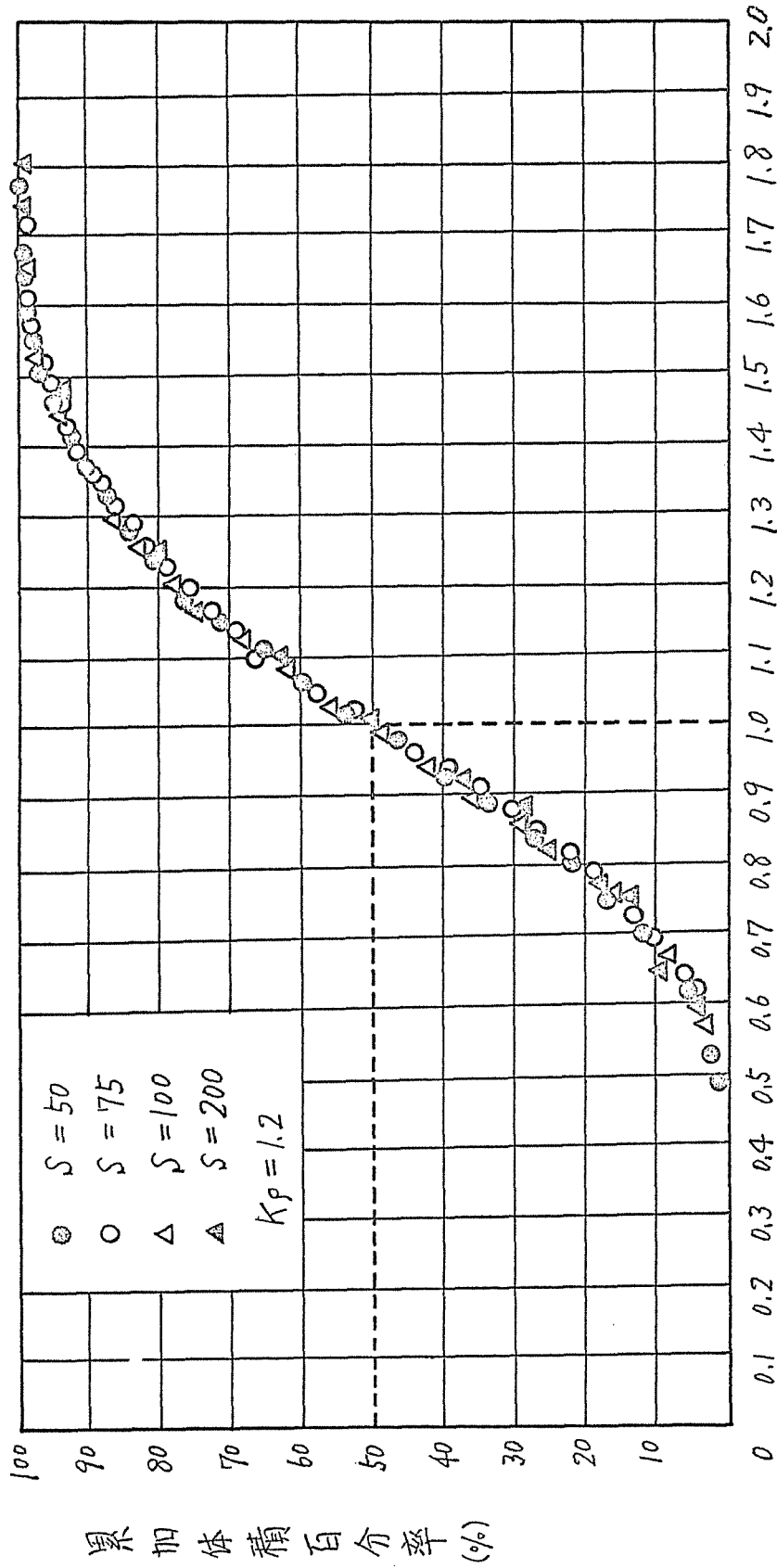
図(5-10) 無次元攪拌時間の経過に伴う粒度組成変化(数値計算による)



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

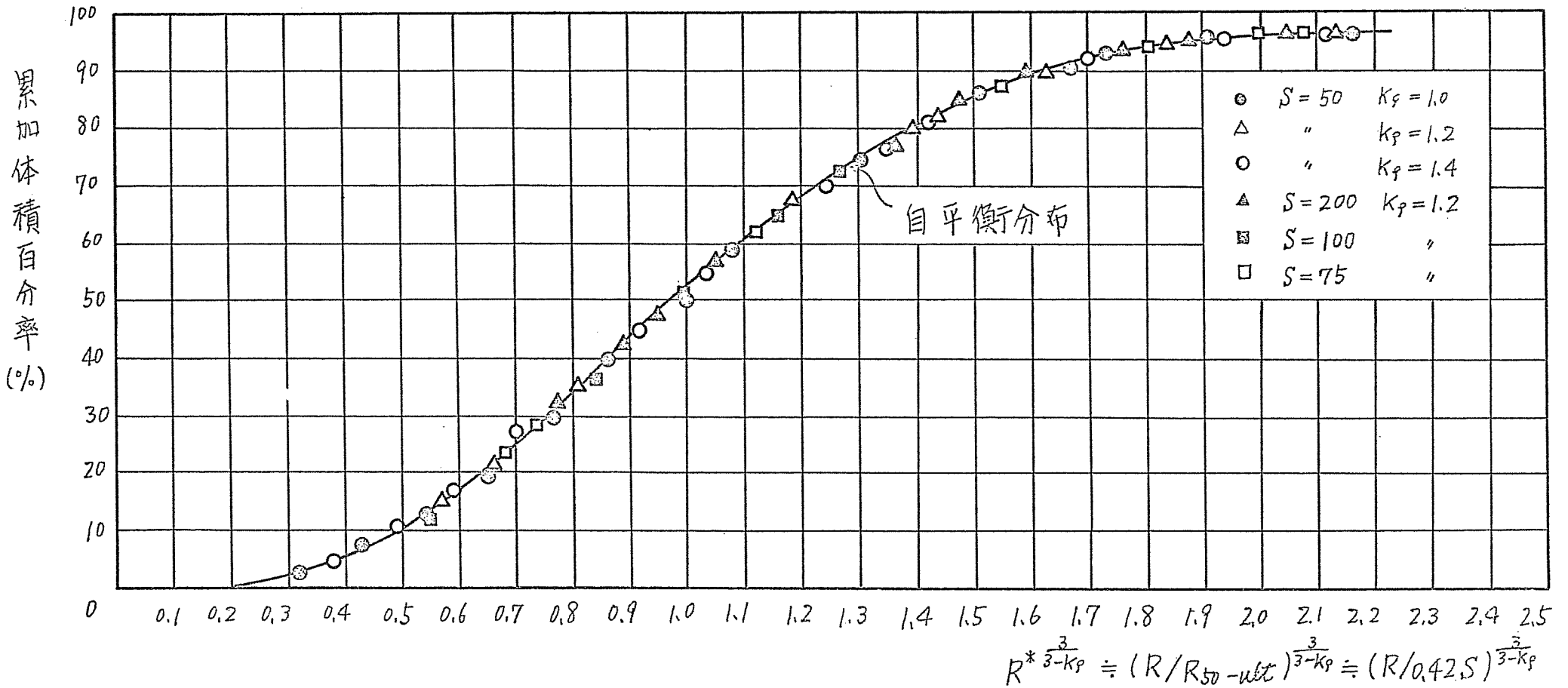


図(5-12) 無次元攪拌時間の経過に伴う累加70%体積分布の推移

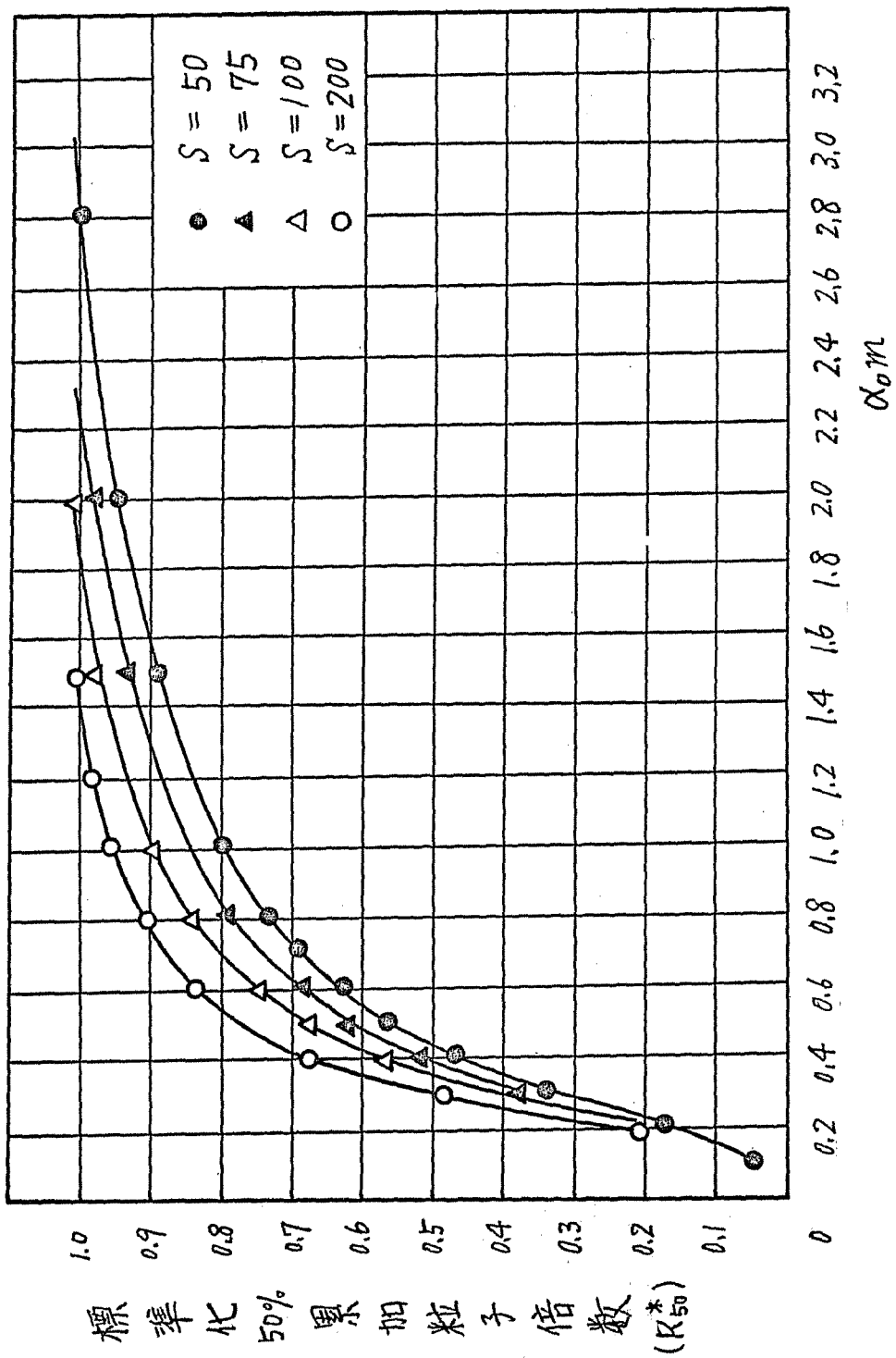


圖(5-13) 標準化成長平衡粒徑分布

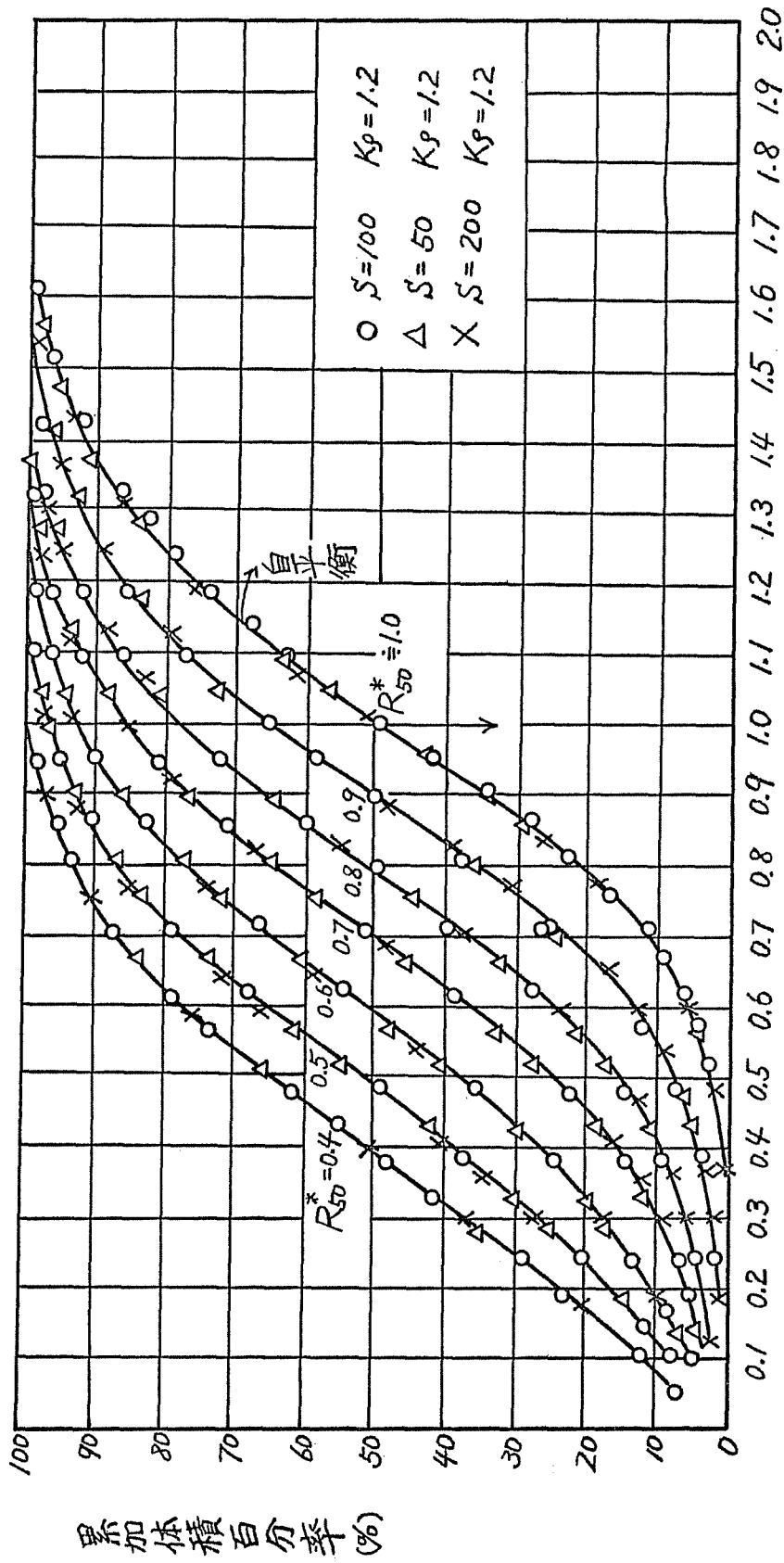
194



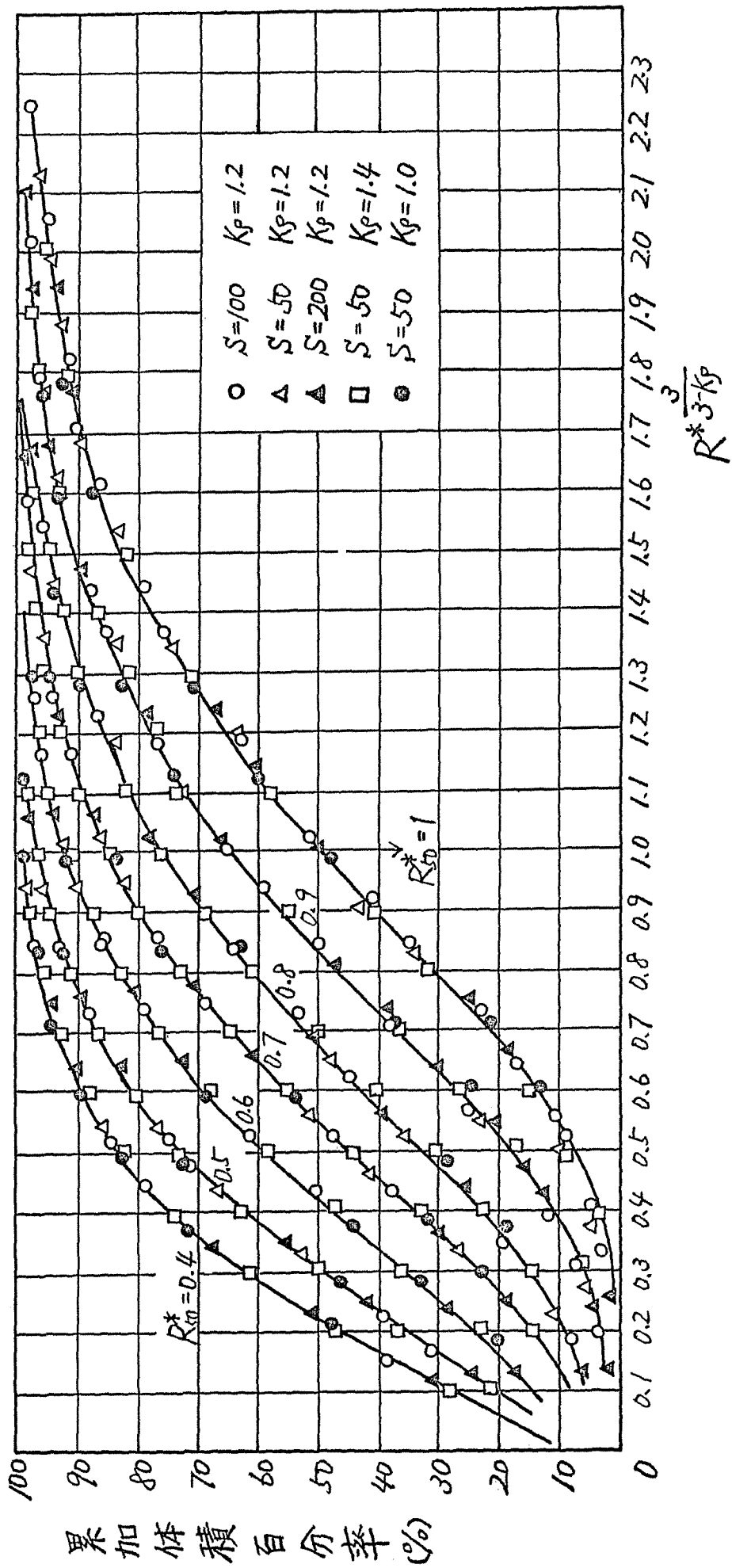
图(5-14) 汎用標準化成長平衡累加粒度分布



圖(5-15)  $\alpha_0 m - R_{50}^*$  曲線

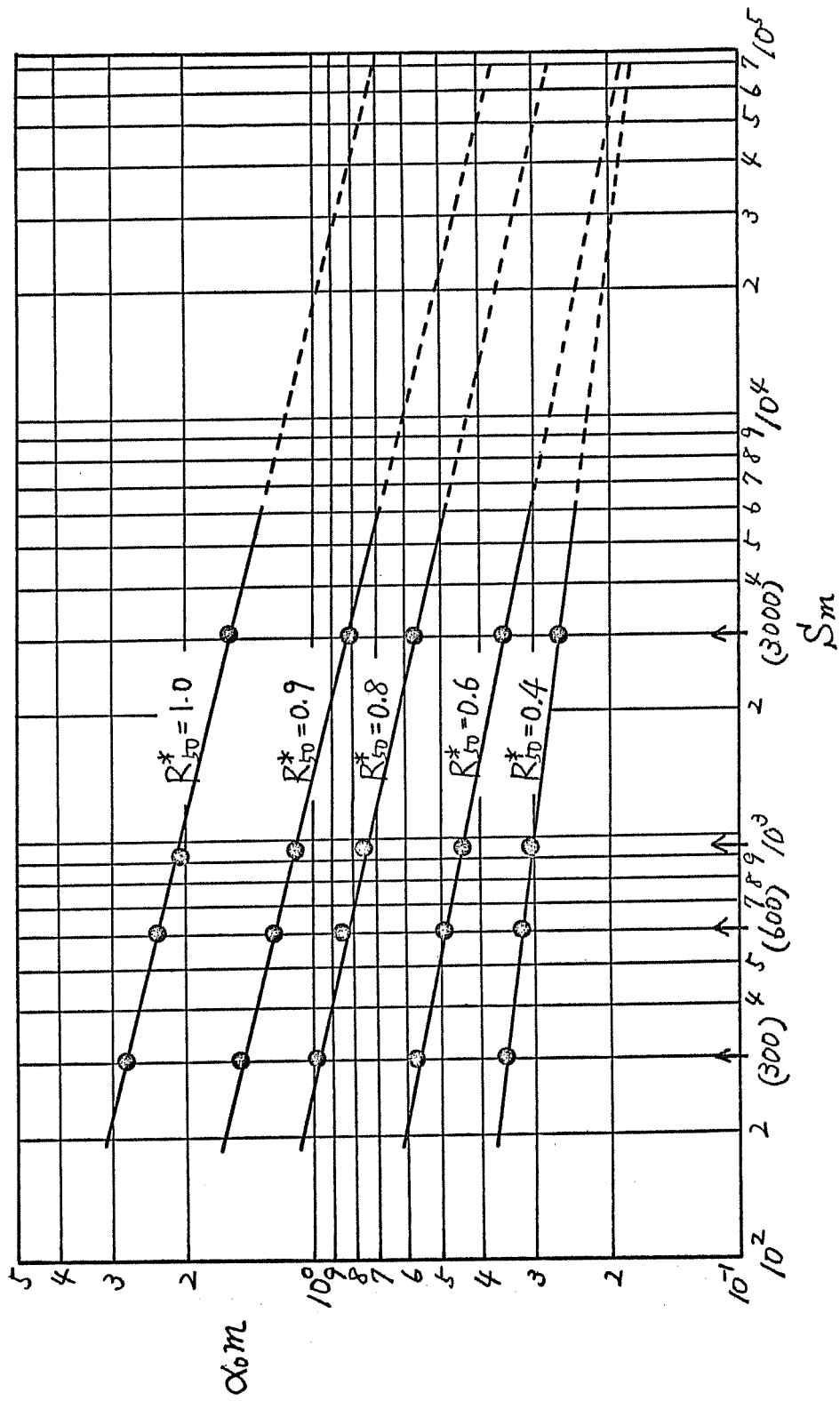


圖(5-16) 標準化累加粒度分布

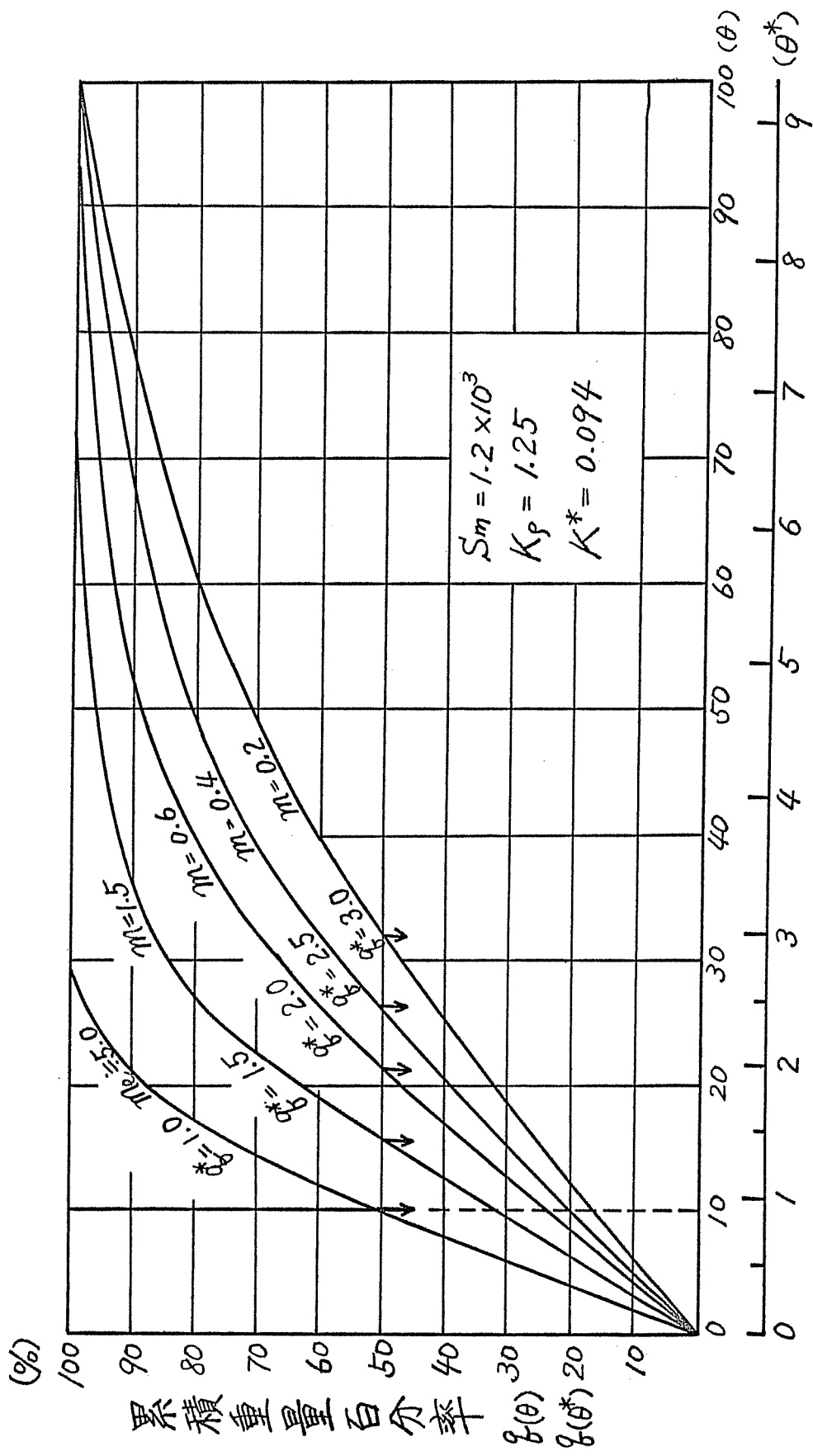


图(5-17) 汎用標準化累加粒度分布

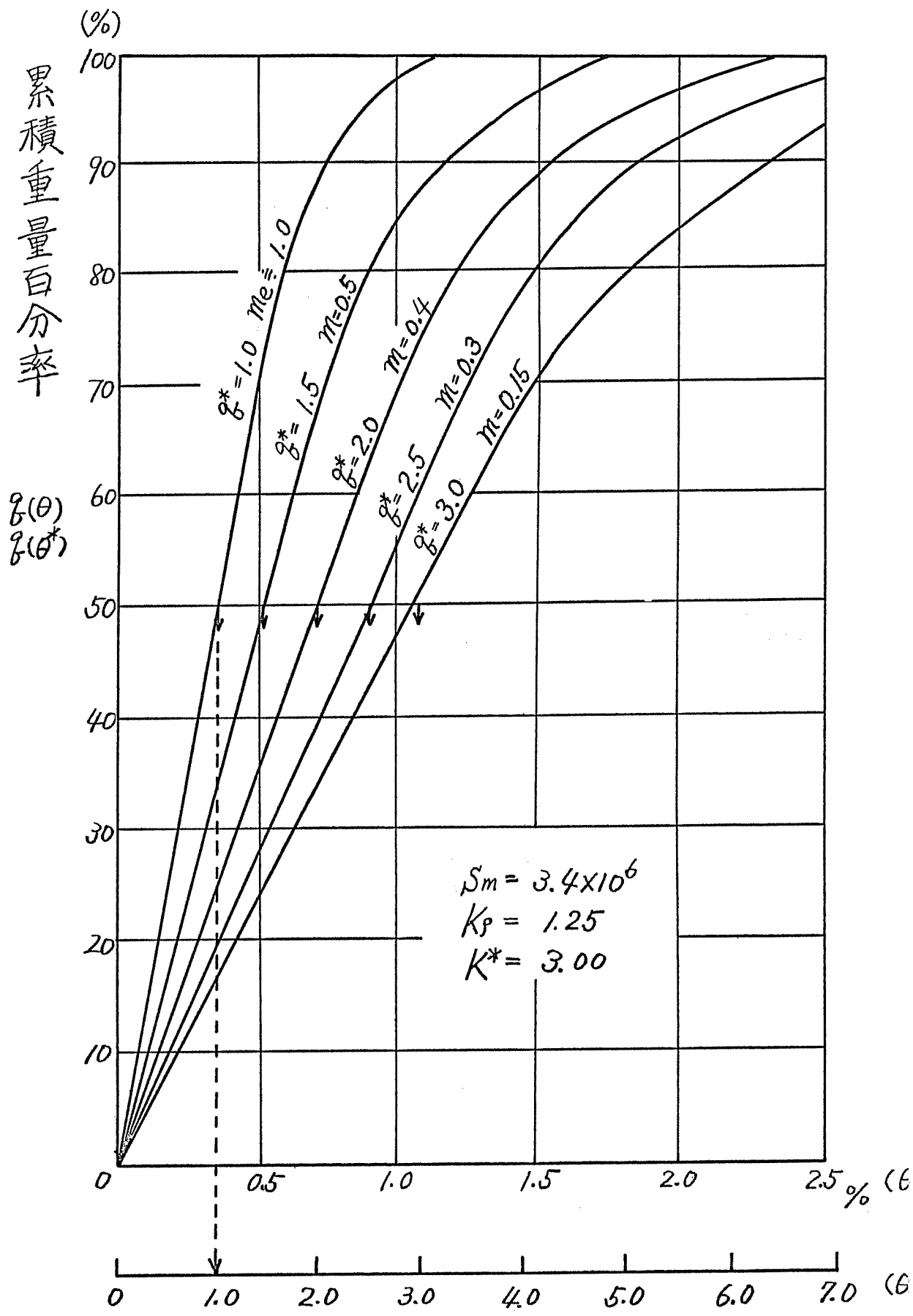




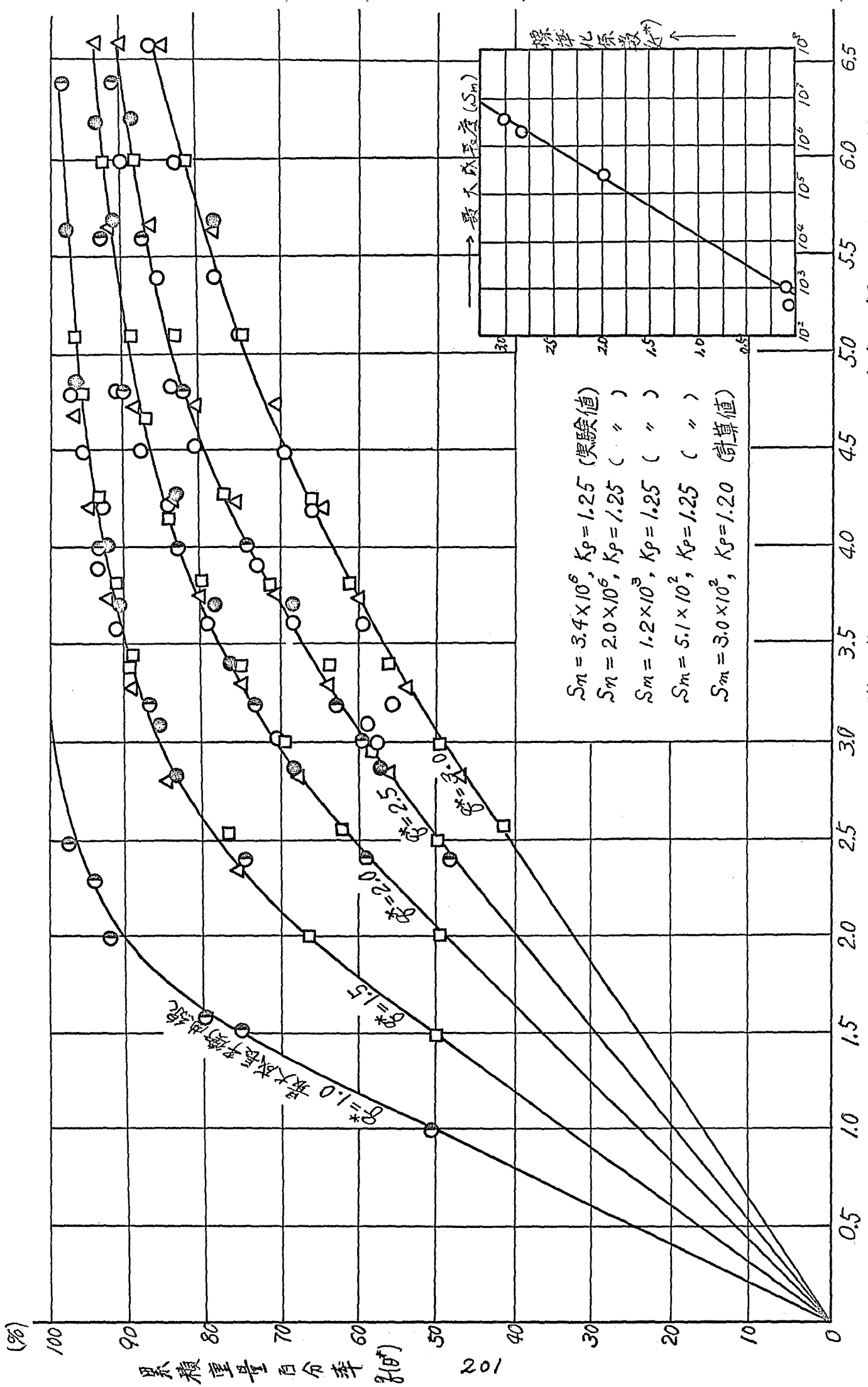
図(5-18) 最大成長長さ( $S_m$ )と等しい  $R_{50}^*$  に達する無次元攪拌時間の関係  
(数値計算による)



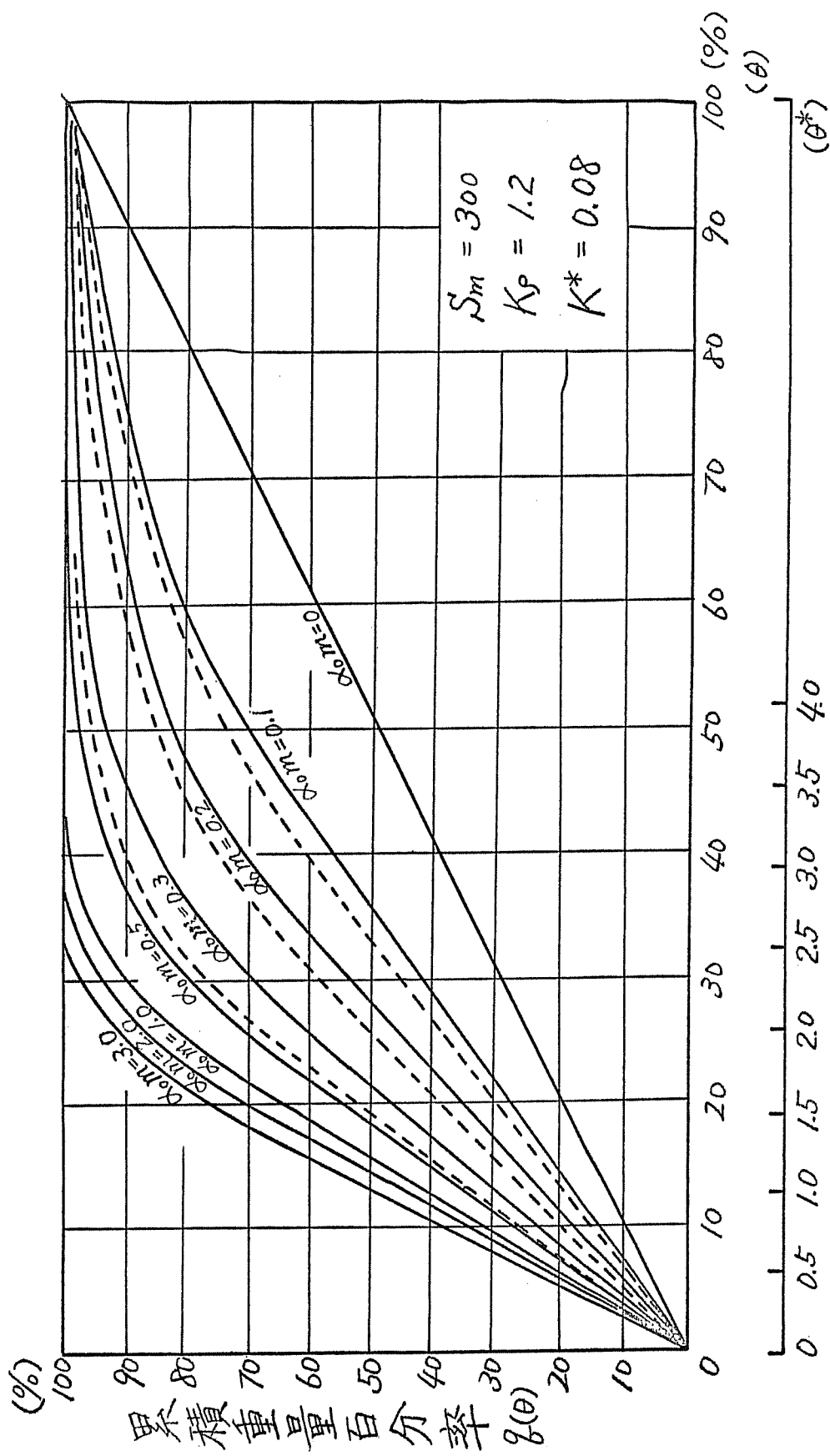
圖(5-19) 無次元化時間累積量曲線



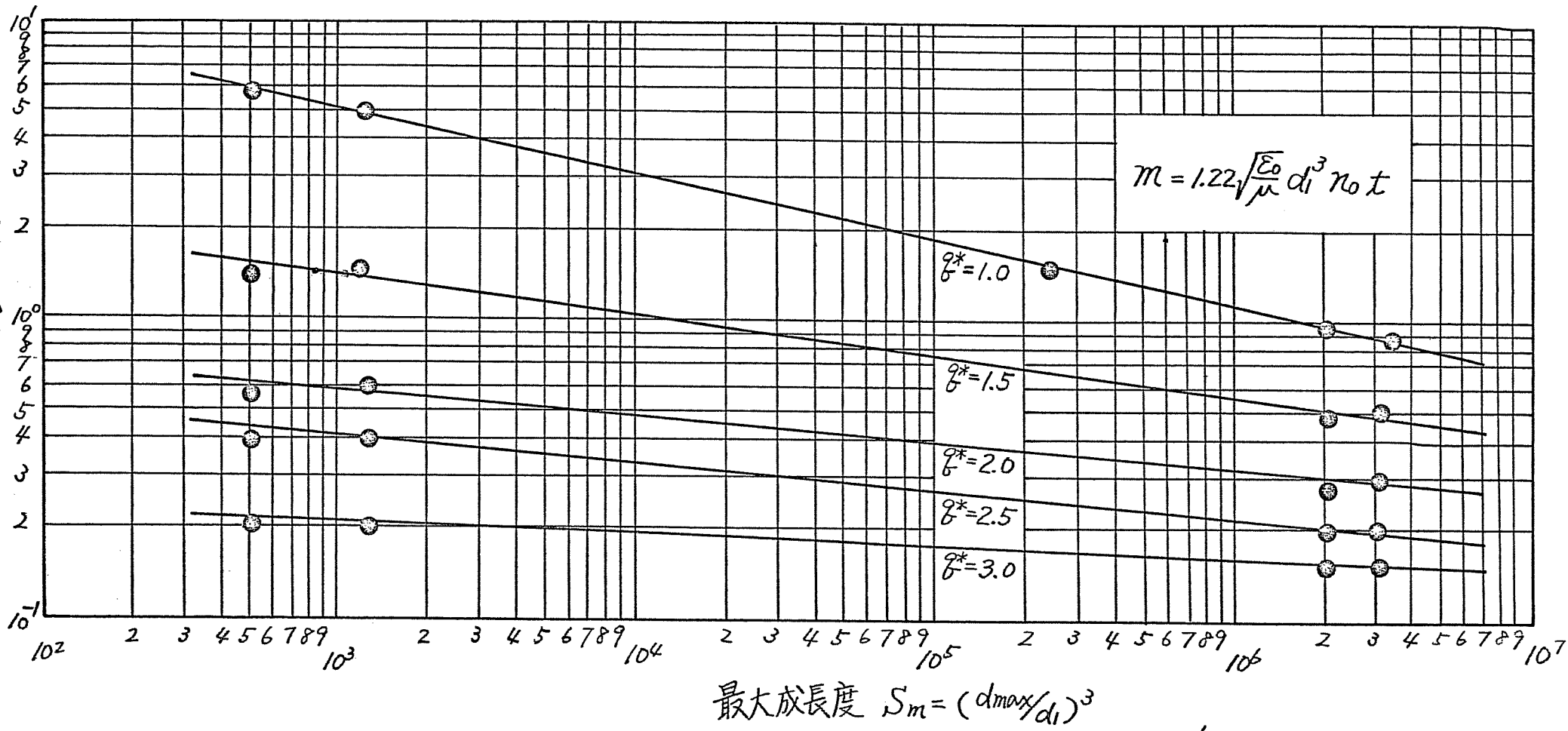
圖(5-20) 無次元化時間累積量曲線



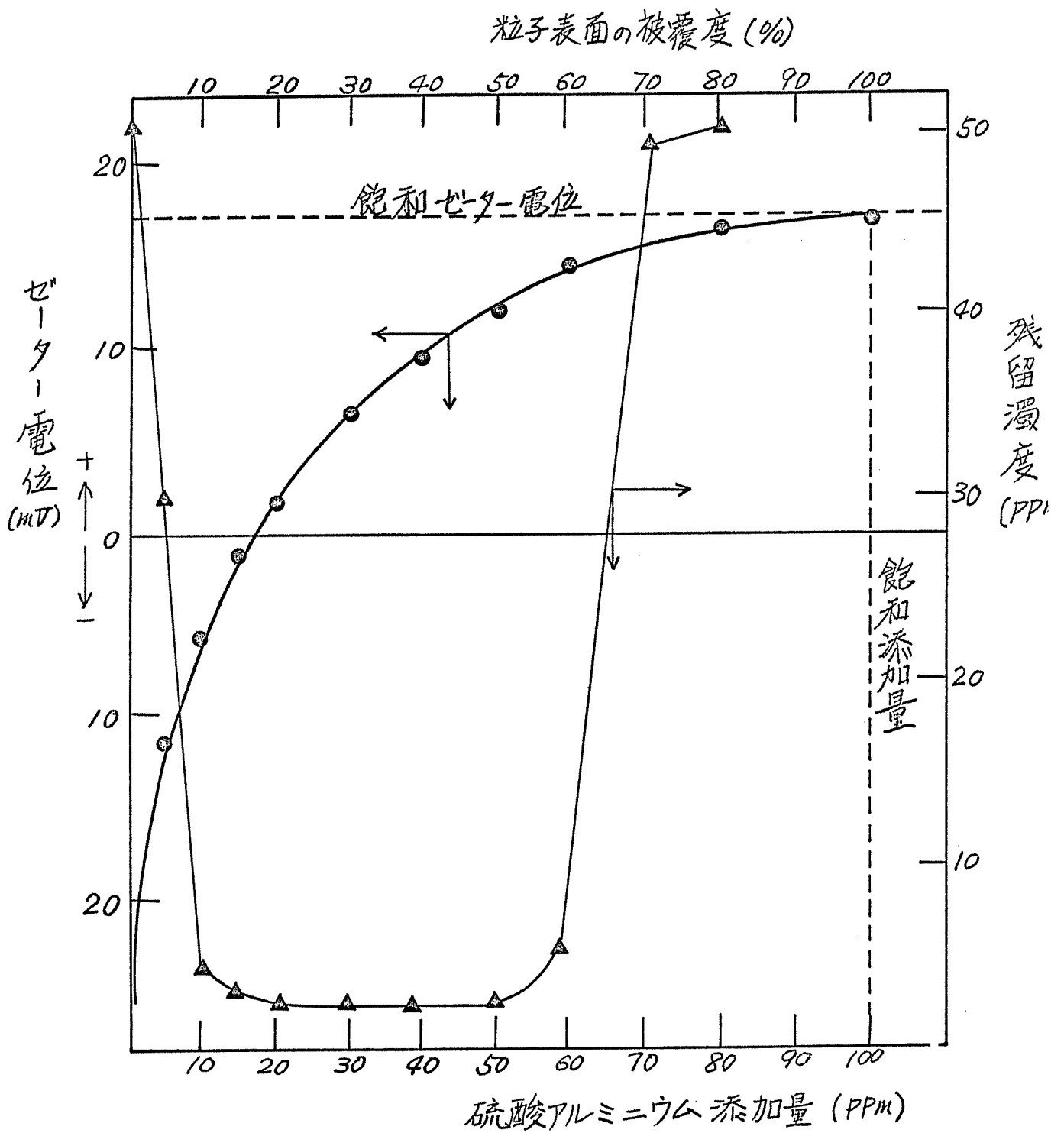
圖(5-21) 汎用標準化無次元沉降曲線



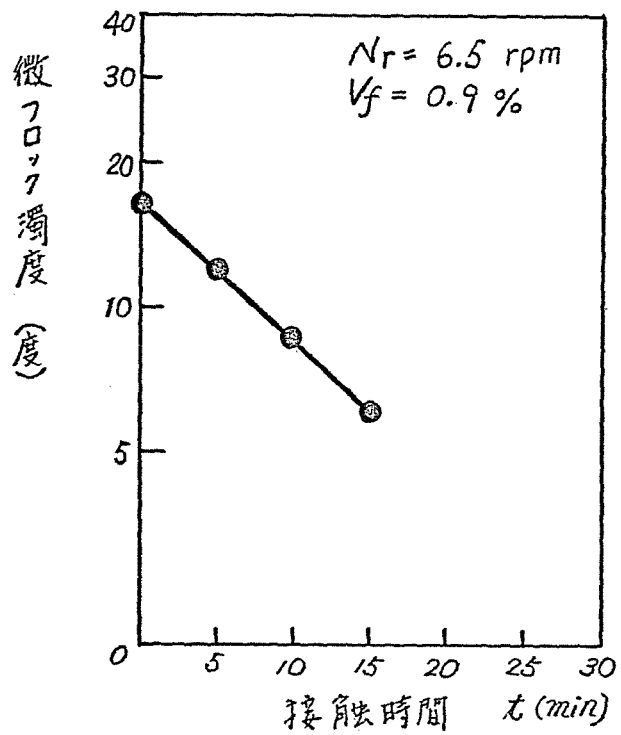
图(5-22) 無次元化時間累積量曲線(数值計算による)



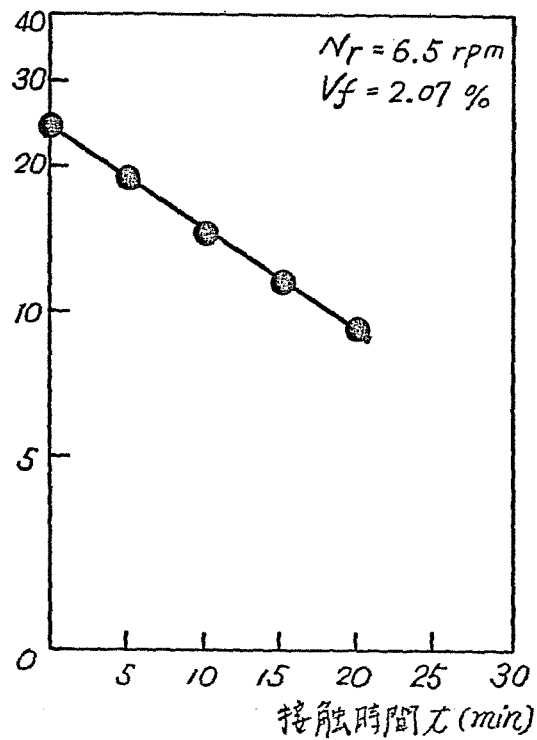
図(5-23) 最大成長度 ( $S_m$ ) と等しい  $q^*$  に達する無次元攪拌時間の関係 (実験による)



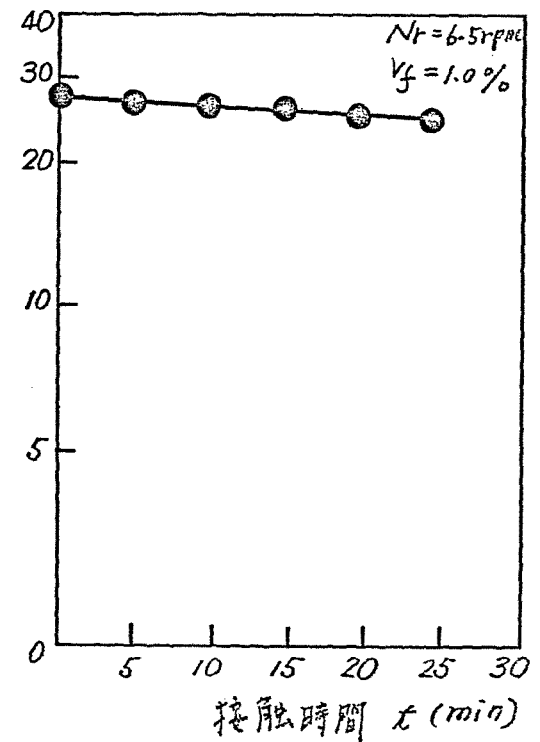
図(5-24) 凝集剤添加量と粒子表面被覆度の関係



図(5-25)微小粒子吸合速度

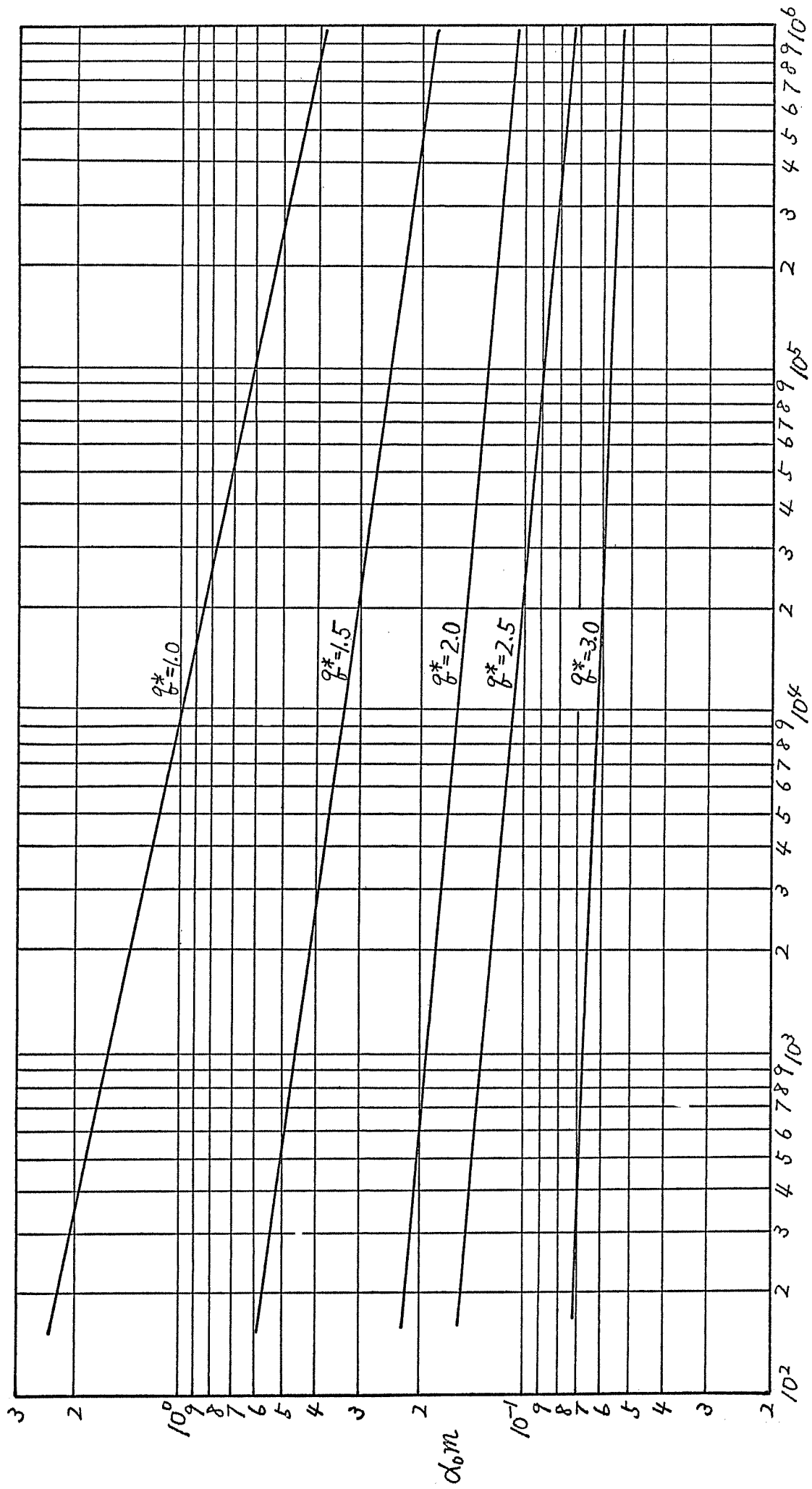


図(5-26) 微小粒子吸合速度



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) 例えは, 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) 本章の一部は下記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の合理的設計(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。攪拌翼は無段変速フォーリークタイプで5~20 r.p.m.の間に自由に回転数を設定できる。

#### 6-2-2 実験方法と混合特性の表示法

連続流フロッキュレーター内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まつて自動記録した。

混合特性を表示するには幾つかの方法があるが、本章に

これらは残余濃度曲線 (Residence time curve) と過渡応答曲線 (Impulsional response curve) の二つから特性を求め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置く。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  $A B C D$ , 完全混合であれば  $A H E$  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  $A F$  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  $A G$  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が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になるように式(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がある。

$$E(\theta) = df(\theta)/d\theta = -dR(\theta)/d\theta \quad \text{-----} (6-3)$$

$$f(\theta) = 1 - R(\theta) = \int_0^\theta E(\theta) d\theta \quad \text{-----} (6-4)$$

### 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いることが分かる。そこで、本実験で使用された連続流フロッキュレーターは多段直列完全混合槽として取扱うると考えられる。

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って次式で表わされる。

$$R(\theta) = e^{-\theta} \left\{ 1 + \theta + \frac{\theta^2}{2!} + \frac{\theta^3}{3!} + \dots + \frac{\theta^{j-1}}{(j-1)!} \right\} \quad \text{-----} (6-5)$$

したがって、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  $\theta$  の代わりに、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) を分母にとった還元時間  $\theta = t/jT_1$  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  $R(\theta)$  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し出し流に近づく様子が理解できる。  
式(6-6) を  $\theta$  を基準にして書き換えると式(6-7)となる。

$$E(\theta) = j^j \phi^{j-1} \exp(-j\phi) / (j-1)! \quad \text{-----}(6-7)$$

もし本実験で用いたフロッキュレータを近似的に完全混合槽列として扱うことができなれば、図(6-4)と図(6-5)の横軸を  $\theta$  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  $\theta$  とし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。流出が遅い原因としては、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だけのものであると考えられる。この点を確かめるためには、使用したフロッキュレータを単独槽として用いた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を用いて行なっており、その結果  $Camp$  の速度勾配値  $G$  ( $1/sec$ ) が  $30 \sim 200 sec^{-1}$  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せる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  $R(\theta)$  として示すと図(6-8)のようである。

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  $13 r.p.m$  の実験値を示したものであるが、 $6 \sim 13 r.p.m$  の範囲では攪拌強度による混合特性の差は見られず、この点については Angaman の結果と一致している。参考のため本実験に用いたフロッキュレータの  $E(\theta)$  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か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（水中にけん濁している粘土粒子など）が衝突（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次反応である。

図分式子大は押出し流水のフロッキュレーターにおけるフロック形成は前章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水の混合パターンを合わせると、滞留時間分布の異なる場合のフロック形成を論じなければならぬ。回分式反応の進行過程の合成は、均一次、二次反応等の場合には解析的に行なうことができるが、不均一次反応では数値計算に頼らなければならない。反応の機序が複雑で反応係数の問題は、簡単なフロックの個数濃度のみでなく、フロックの組成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畳させることは非常に困難である。したがって、フロック形成の進行と流況を合成する方策を講じなければならない。

凝集・フロッキュ形成・沈殿・砂ろ過を主として、フロッキュ形成の急激な除去（固液分離）は、沈殿池（大形）における沈殿（大形）による固液分離で、微細な沈殿池（小形）による固液分離（沈降）による。この二つの過程は、原水中に存在するフロック形成の主要な理由と考慮される。沈殿池で沈殿分離される大形のフロック群と、沈殿池で沈降分離される小形のフロック群は、それぞれ異なる理由で生成し、沈降分離される。沈降分離される大形のフロック群は、沈降分離される大形のフロック群と、沈降分離される小形のフロック群は、それぞれ異なる理由で生成し、沈降分離される。沈降分離される大形のフロック群は、沈降分離される大形のフロック群と、沈降分離される小形のフロック群は、それぞれ異なる理由で生成し、沈降分離される。

この粒子は、沈降条件下で残留し、その数が減少し、そのうちの一部は、初期粒子からなる。このうち、初期粒子の数が減少し、そのうちの一部は、初期粒子からなる。このうち、初期粒子の数が減少し、そのうちの一部は、初期粒子からなる。

このうち、初期粒子の数が減少し、そのうちの一部は、初期粒子からなる。このうち、初期粒子の数が減少し、そのうちの一部は、初期粒子からなる。このうち、初期粒子の数が減少し、そのうちの一部は、初期粒子からなる。

このうち、初期粒子の数が減少し、そのうちの一部は、初期粒子からなる。このうち、初期粒子の数が減少し、そのうちの一部は、初期粒子からなる。このうち、初期粒子の数が減少し、そのうちの一部は、初期粒子からなる。

このうち、初期粒子の数が減少し、そのうちの一部は、初期粒子からなる。このうち、初期粒子の数が減少し、そのうちの一部は、初期粒子からなる。このうち、初期粒子の数が減少し、そのうちの一部は、初期粒子からなる。

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一一次反応と考へ、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) のように与えた。<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如く、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一次反



応であった、微小粒子の減少速度を1次反動的に扱った良  
 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おけるので、接触フロック形成のみ  
 によることをかざる。また角田の報告は微小粒子の消滅  
 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。

逆混合を持つ数枝の撈拌槽を直列に配した通常のフロ  
 ックキュレーターには、ある程度の大形フロック(100  
 μ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)として扱おうであろう。  
 したがって、1次反応の特性から滞留時間と微小粒子群  
 の濃度は互に同程度の重要性を反応の進行に持ち、滞留時  
 間分布によつ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  
 布があつてもそれ程大きな影響を反応に及ぼさず、押し出  
 してもしくは回分式での結果と近似的には一致してゐる  
 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  
 実フロック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 連続流フロック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、連続流フロックキュレーターが縦方向混合を伴う定常  
 状態で操作される場合を考える。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ク  
 キュレーターのそれとは異なつてくる。

すなわち、回分式では多量に初期粒子群と見られる  
 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  
 連続流定常状態には、ある粒度組成を持ったフロック  
 群の存在するフロック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）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つては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出来る。

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  $C$  となつ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。

$$\frac{C}{C_0} = \int_0^{\infty} e^{-Kc\phi} \cdot E(\phi) d\phi \quad \text{----- (6-9)}$$

ここで、 $C_0$ : 初期粒子群の初濃度、 $t$ : 反応時間 (sec)、 $Kc$ : 反応速度係数 (1/sec)、接触フロック形成の場合には、

$$Kc = \frac{9}{\sqrt{15}} \bar{P} \sqrt{\frac{E_0}{\mu}} V_f \quad \text{----- (3-39)}$$

$E(\phi)$  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、

$$\frac{C_j}{C_0} = \frac{1}{(1 + Kc_1 t_1)(1 + Kc_2 t_2) \cdots (1 + Kc_j t_j)}$$

----- (6-10)

ここで、 $Kc_1 \cdot Kc_2 \cdots Kc_j$ : 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  $\nabla_f$  を求めたおけば式(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  $\nabla_f$  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しえない。

そこで次に、 $\bar{\rho}$  と  $\nabla_f$  がフロック形成時間としかなる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 $\nabla_f$ と衝突合一確率 $\bar{\rho}$

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。

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{9}{\sqrt{15}} \bar{\rho} \sqrt{\frac{E_0}{\mu}} \nabla_f n \quad \text{----- (6-11)}$$

式中の  $n$ ,  $\nabla_f$ ,  $\bar{\rho}$  は各々任意攪拌継続時間  $t$  における微小粒子個数 ( $1/cm^3$ ), フロック体積率 (無次元), 衝突合一確率であるから、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  $\nabla_f$  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)のようにならされる。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{n}{n_0} = \exp\left(-\frac{9}{\sqrt{15}} \bar{\rho} \sqrt{\frac{E_0}{\mu}} \nabla_f t\right)$$

----- (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  $\nabla_f$  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 $\bar{V}_f$ を定数として扱って未反応率を求めることができない。着目す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)にま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をたは押し出し流れでのまうに、理論式から直ちに求められない。そこで、本章3節で述べた理由にまて、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 $\bar{V}_f$ と衝突確率 $\bar{p}_j$ は、 $\bar{t} = \bar{t}_j$ であるまうな固分式をたは押し出し流れの際のフロック粒度組成と衝突確率 $\bar{p}$ に対応すると考え、以下に示すまうな便法を講じて未反応率を求めるとした。

固分式においてはフロック形成条件が固定されていれば、 $\bar{p} = \bar{p}(t)$ 、 $\bar{V}_f = \bar{V}_f(t)$ 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ま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節で示したまうに $\bar{p} = 1/45$ 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、

$$\log \frac{C}{C_0} = \log \frac{n}{n_0} = -\frac{K_2}{\delta+1} \left(\frac{t}{T^*}\right)^{\delta+1} + K_3 \text{-----}(6-14)$$

$$K_2 = \frac{9}{\sqrt{15}} \frac{1}{45} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} \bar{V}_f^* T^* = \frac{1}{5\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} \bar{V}_f^* T^* \text{-----}(6-15)$$

$K_3$ : 積分定数

もし式(6-13)をたかて式(6-14)の關係が成立する

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ク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ともそのフロック形成過程に対しても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  $\bar{\rho}$  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 $\bar{\rho}$ と $\nabla f$

成長平衡に達した母フロック群に対する衝突合一確率  $\bar{\rho}$  は先に明らかにしたように  $\bar{\rho} \doteq 1/45$  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一確率関数  $\alpha_f$  は式(6-16)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、 $\alpha_0$ :初期衝突合一確率( $\doteq 1/3$ )、 $R \cdot S$ :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

水3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)のまうに示される。

$$\bar{p} = \alpha_f = \alpha_0 \left(1 - \frac{R}{S+1}\right)^n \doteq \frac{1}{3} \left(1 - \frac{R}{S+1}\right)^n$$

$$\doteq \frac{1}{40} \sim \frac{1}{45} \text{----- (6-17)}$$

さらに、成長平衡時における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 $R_{50-ult} \doteq 0.4S$ 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 $R = R_{50-ult} = 0.4S$ 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 $S = -0.6$ 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は $n \doteq 6$ 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せに対して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5程度の値をとるものと考えられる。

回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、逆混合のある連続流のフロッキユ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ユレーターのある段における吸合反応速度係数

Kcの算定式(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50 l/min, 100 l/min, フロック形成攪拌を8 r.p.m ( $E_0 = 1.9 \times 10^{-1} \text{ erg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ ) と10 r.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 $m$ を一般的に確定できない。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8 r.p.m の実験の第4段階(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そ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 $20 \mu \sim 200 \mu$  の範囲に分布してゐる。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ものが成長平衡分布は広い範囲の攪拌強度下に適用可能である。

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)のみによつては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○印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、成長平衡に達するのに要する無次元攪拌継続時間 $M_c$ 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6 $\mu$ 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つている。

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つて $m$ 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 $C$ をとつて描いたものが図(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水が押し出し流水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。



$$K_c = \frac{9}{\sqrt{15}} \bar{\rho} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} V_f \text{-----}(6-18)$$

したがって、吸合反応速度係数は  $\epsilon_0$  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  $\epsilon_0$  の間には図(6-17)のまうな関係が見られ、 $K_c$  と  $\epsilon_0$  の関係は式(6-19)のまうに表わされる。

$$K_c \propto \epsilon_0^{0.3 \sim 0.4} \text{-----}(6-19)$$

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  $V_f$  が減少するたため、吸合速度が  $\epsilon_0$  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しようとする連続流フロッキュレーターでは式(6-10)で示されたような  $K_c t \gg 1$  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らわれる程攪拌強度の影響は顕著では無い。

次に、式(6-9)、(6-10)のまうで微小粒子群の消滅速度を計算のまうて求めてみよう。

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うる場合の  $\bar{\rho}$  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)の関係から次をまうてしまてそれ以前の段階での  $\bar{\rho} V_f$  を求めることができる。

$$\frac{(\bar{\rho} V_f)_T}{(\bar{\rho} V_f)_t} = \frac{(\bar{\rho} V_f)_{me}}{(\bar{\rho} V_f)_m} = \left(\frac{T}{t}\right)^{-0.6} = \left(\frac{m_e}{m}\right)^{-0.6}$$

故に、----- (6-20)

$$\begin{aligned} (\bar{\rho} V_f)_t &= (\bar{\rho} V_f)_T \left(\frac{T}{t}\right)^{0.6} = \frac{1}{45} V_f^* \left(\frac{T}{t}\right)^{0.6} \\ &= \frac{1}{45} V_f^* \left(\frac{m_e}{m}\right)^{0.6} \text{-----}(6-21) \end{aligned}$$

式(6-21)のまうて各々の段での  $(\bar{\rho} V_f)$  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  $m_e$ ) を求めてみる。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  $10^6$  と考えて良いため、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  $(\bar{p}V_f)$  が求められる、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、各段から未吸合の子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。すべつこの初期粒子がフロックス社されり市けでほなる。  
のど、突測される初期粒子は0.8%より多いは0.6%程度  
同一条件で本実験で用いた量は(10%程度)とされる。  
ユレーター初期粒子がなりた量の(10%程度)とされる。  
2行く初期粒子がなりた量の(10%程度)とされる。  
の値が0.5%程度とされる。

### 6-7 まとめ

本章では、急速ろ過システムの理論的な扱いは、この中でフロックス社されり市けでほなる。  
ッキュレーターを、①沈殿池、②ろ過池、③脱臭池、④脱臭池、⑤脱臭池、⑥脱臭池、⑦脱臭池、⑧脱臭池、⑨脱臭池、⑩脱臭池、⑪脱臭池、⑫脱臭池、⑬脱臭池、⑭脱臭池、⑮脱臭池、⑯脱臭池、⑰脱臭池、⑱脱臭池、⑲脱臭池、⑳脱臭池、㉑脱臭池、㉒脱臭池、㉓脱臭池、㉔脱臭池、㉕脱臭池、㉖脱臭池、㉗脱臭池、㉘脱臭池、㉙脱臭池、㉚脱臭池、㉛脱臭池、㉜脱臭池、㉝脱臭池、㉞脱臭池、㉟脱臭池、㊱脱臭池、㊲脱臭池、㊳脱臭池、㊴脱臭池、㊵脱臭池、㊶脱臭池、㊷脱臭池、㊸脱臭池、㊹脱臭池、㊺脱臭池、㊻脱臭池、㊼脱臭池、㊽脱臭池、㊾脱臭池、㊿脱臭池、  
た。適用の可能性がある。との関係で連続ろ過の装置を、  
このまうな取扱いは、  
沈殿池、ろ過池と密接に  
て評価しえず、したかっ  
た急速ろ過システムの扱  
えている。

次に、連続ろ過システムのフロッキュレーターでのフロック形成を考  
えるに、当って本章で明らかにした事項に、  
先ず、トレーサーとして、  
化を測定して、  
った。その結果、  
度の混合特性に、  
範囲では使用したフロッキュレーターは、  
して取扱うことが、  
完全混合型の攪拌槽が、  
れて、  
粒子群が、  
現象として、  
成長して、  
沈殿池で、  
は、

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存する。したがつて、3~5段程度の仕切水池を連続流フロッキュレーターから流出してくる現象を、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つ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ついて、も流水の特性と反応とを合成することから次式の形で示される。

$$\frac{C}{C_0} = \int_0^{\infty} e^{-K_c t \phi} \cdot E(\phi) d\phi \quad \text{----- (6-9)}$$

ここで、C: 反応時間tで残存する微小粒子濃度, C<sub>0</sub>: t=0で存在した微小粒子濃度, K<sub>c</sub>: 吸合反応速度係数 (1/sec), t: 反応時間 (sec), φ: 無次元化平均滞留時間 (槽列全体の滞留時間基準), E(φ): 装置内の滞留時間分布関数。

完全混合槽列の場合は、E(φ)は次式で与えられる。

$$E(\phi) = j^j \phi^{j-1} \exp(-j\phi) / (j-1)! \quad \text{----- (6-7)}$$

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<sub>j</sub>は、

$$C_j = \frac{C_0}{(1 + K_{c1} t_1)(1 + K_{c2} t_2) \cdots (1 + K_{cj} t_j)}$$

----- (6-10)

ここで、t<sub>j</sub>: 第j段の平均滞留時間 (sec), K<sub>cj</sub>: 第j段の吸合反応速度係数で次式で表わされる。

$$K_{cj} = \frac{9}{\sqrt{15}} \bar{P}_j \sqrt{\frac{E_0}{\mu}} V_{fj} \quad \text{----- (3-39')}$$

そこで、式(3-39')によつて  $K_{cj}$  を算定すれば、式(6-10)を用ひてフロックエレ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出来る。

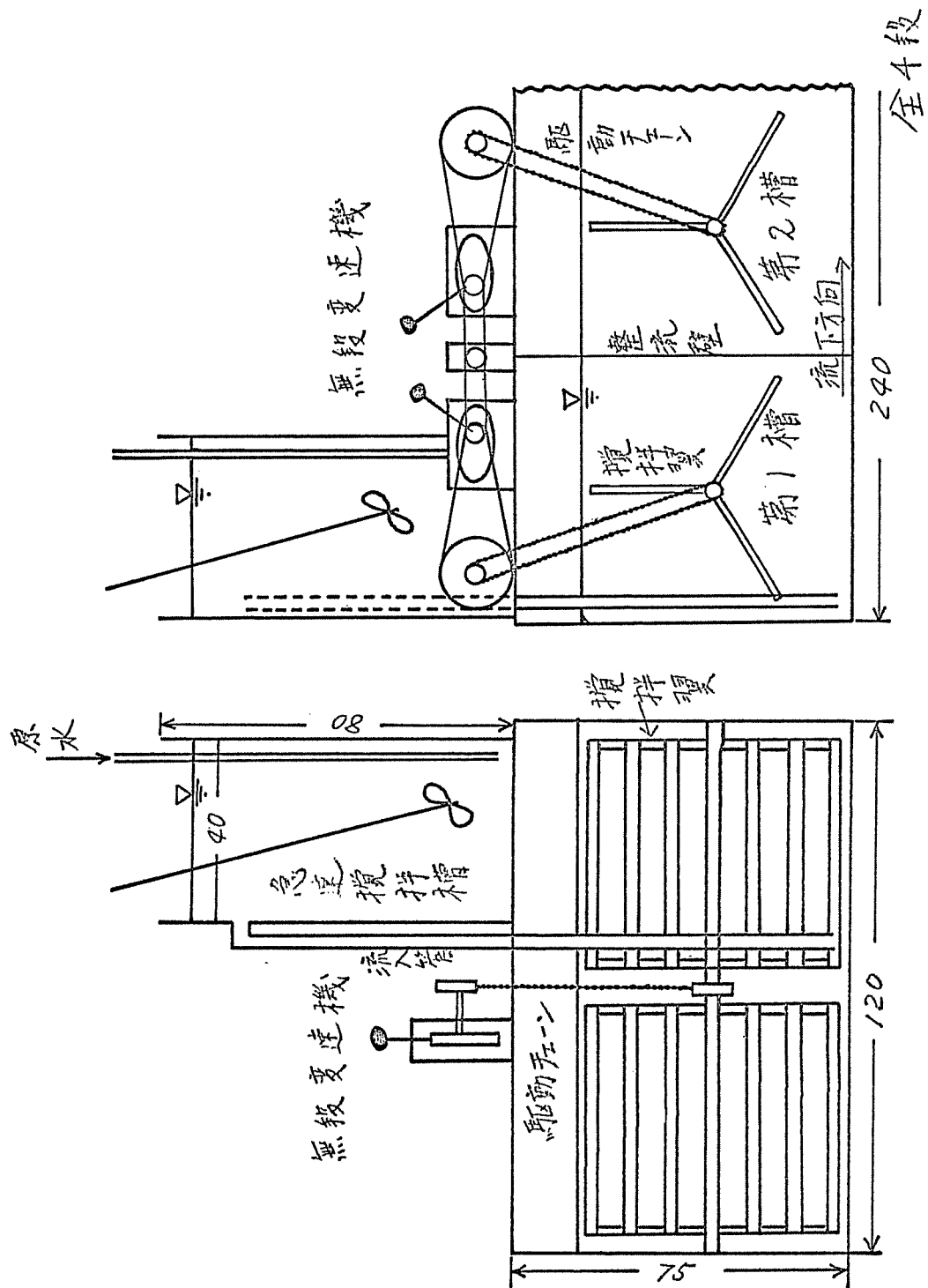
フロック体積率  $V_f$  とその時のフロック群の平均的衝突合-確率  $\bar{P}$  は式(6-13')で示される関係にあることが実験によつて示された。

$$\bar{P} V_f \doteq K_1 \left( \frac{t}{T^*} \right)^{-0.6} = K_1 \left( \frac{m}{m_e} \right)^{-0.6} \text{-----} (6-13'')$$

$$K_1 \doteq \frac{1}{45} V_f^*$$

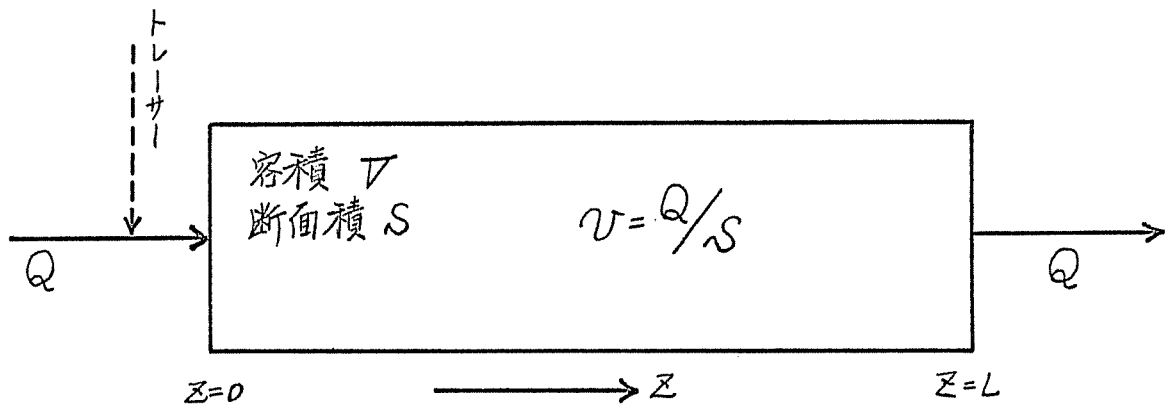
したがつて、式(3-39')の運用に當つては  $\bar{P} V_f$  の作用を一括して計算を行なうことが出来る。

上述の方法によつて計算した  $C_j$  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。

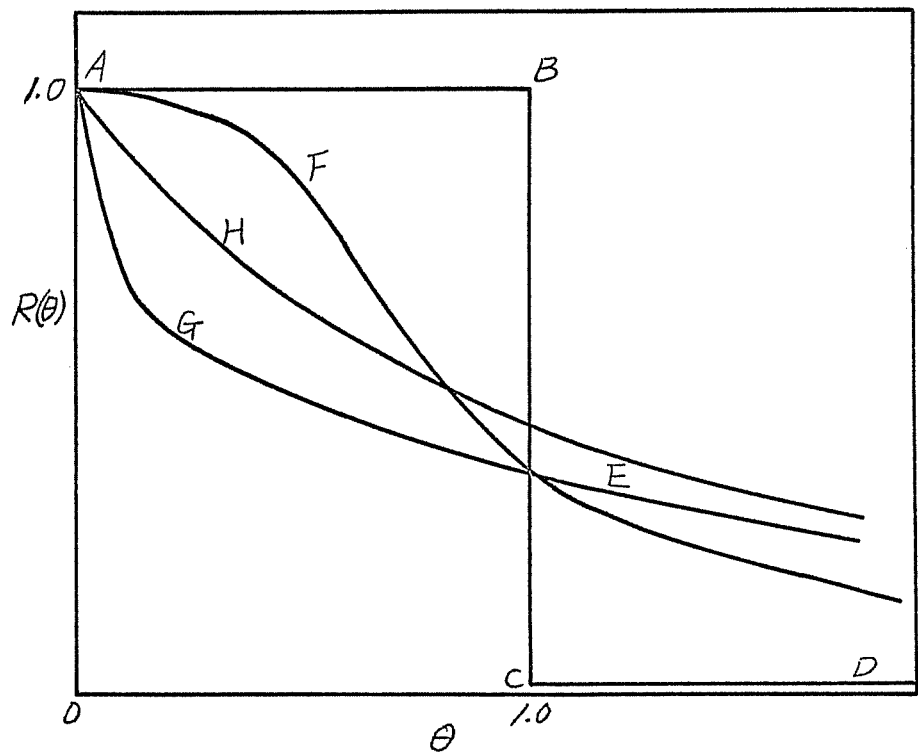


(単位：cm)

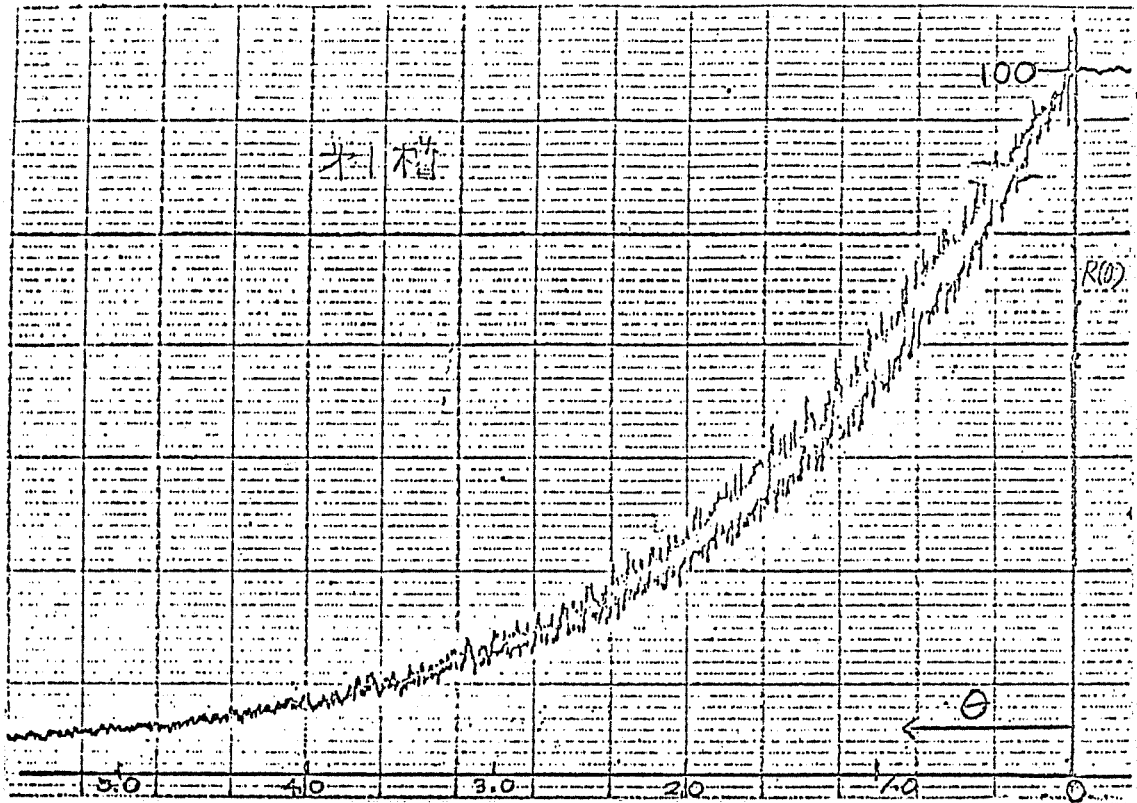
図(6-1) 連続流フローケルター



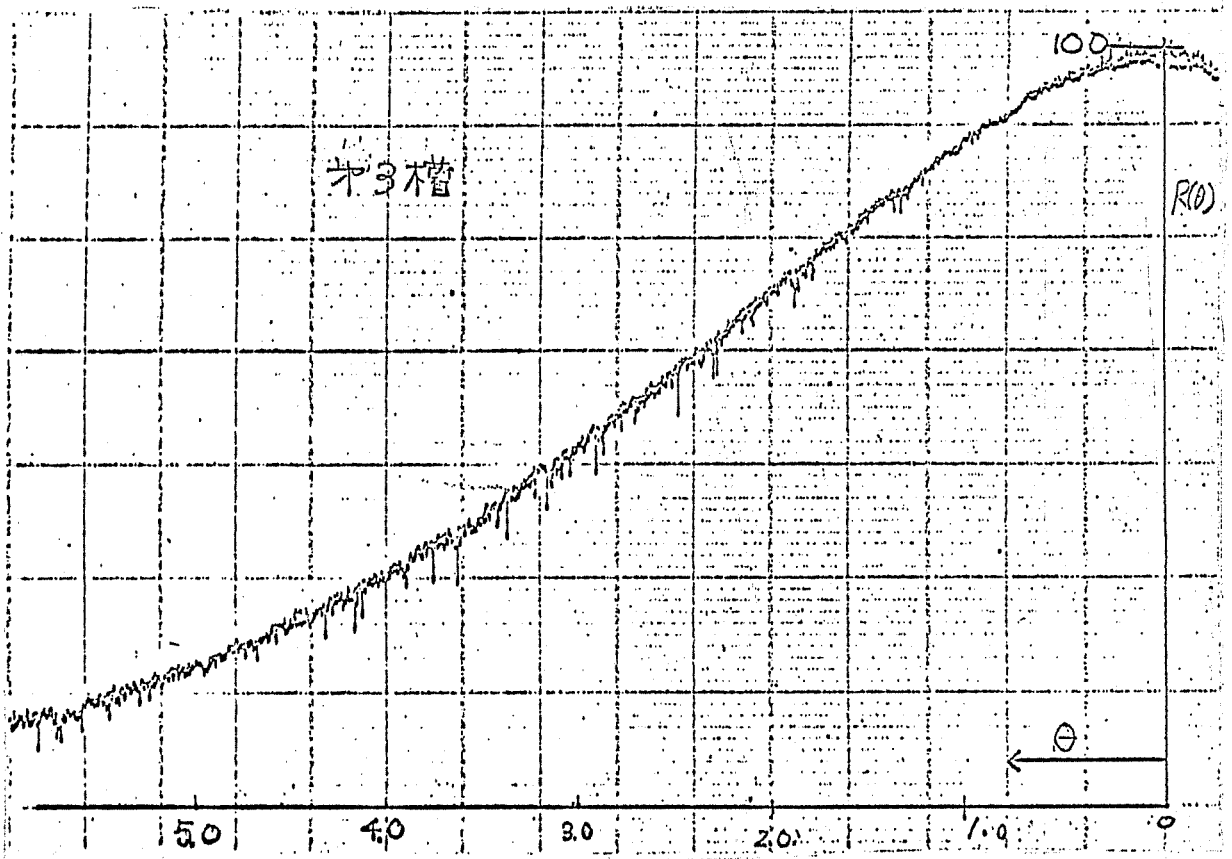
図(6-2) 流水モデル



図(6-3) 単独槽の残余濃度曲線の模式図

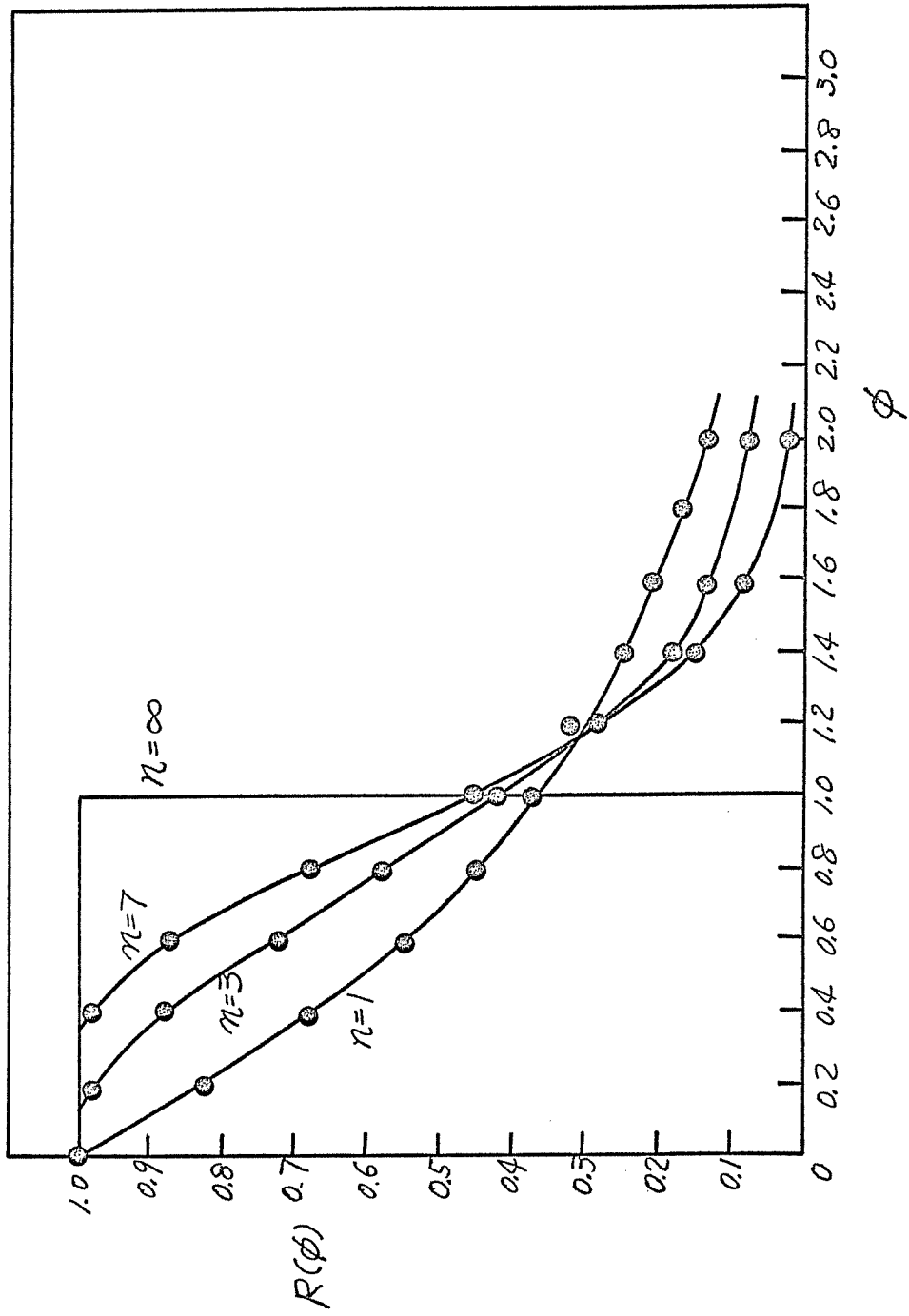


図(6-4) 実フロッキュレーターの残余濃度曲線

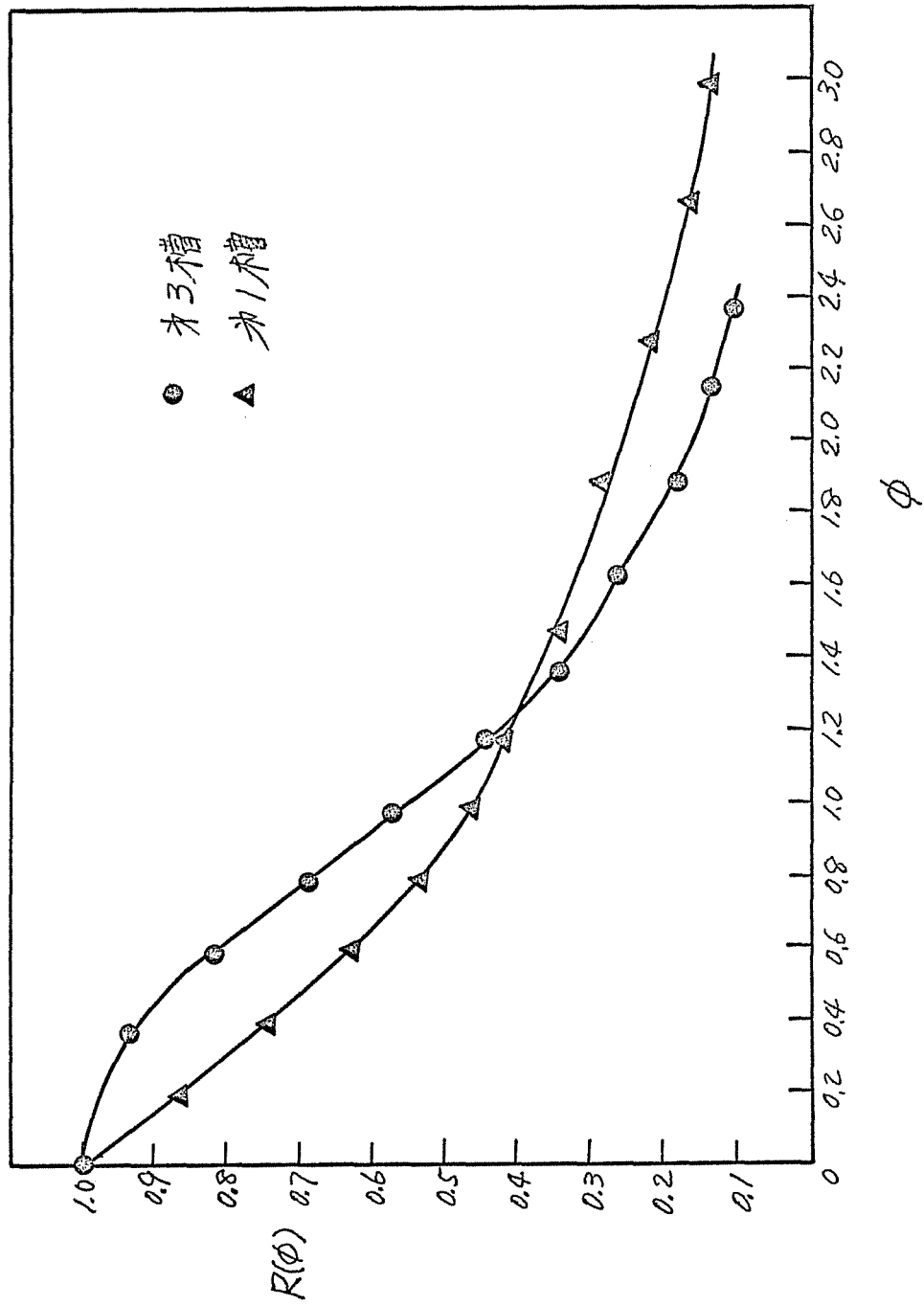


図(6-5) 実フロッキュレーターの残余濃度曲線

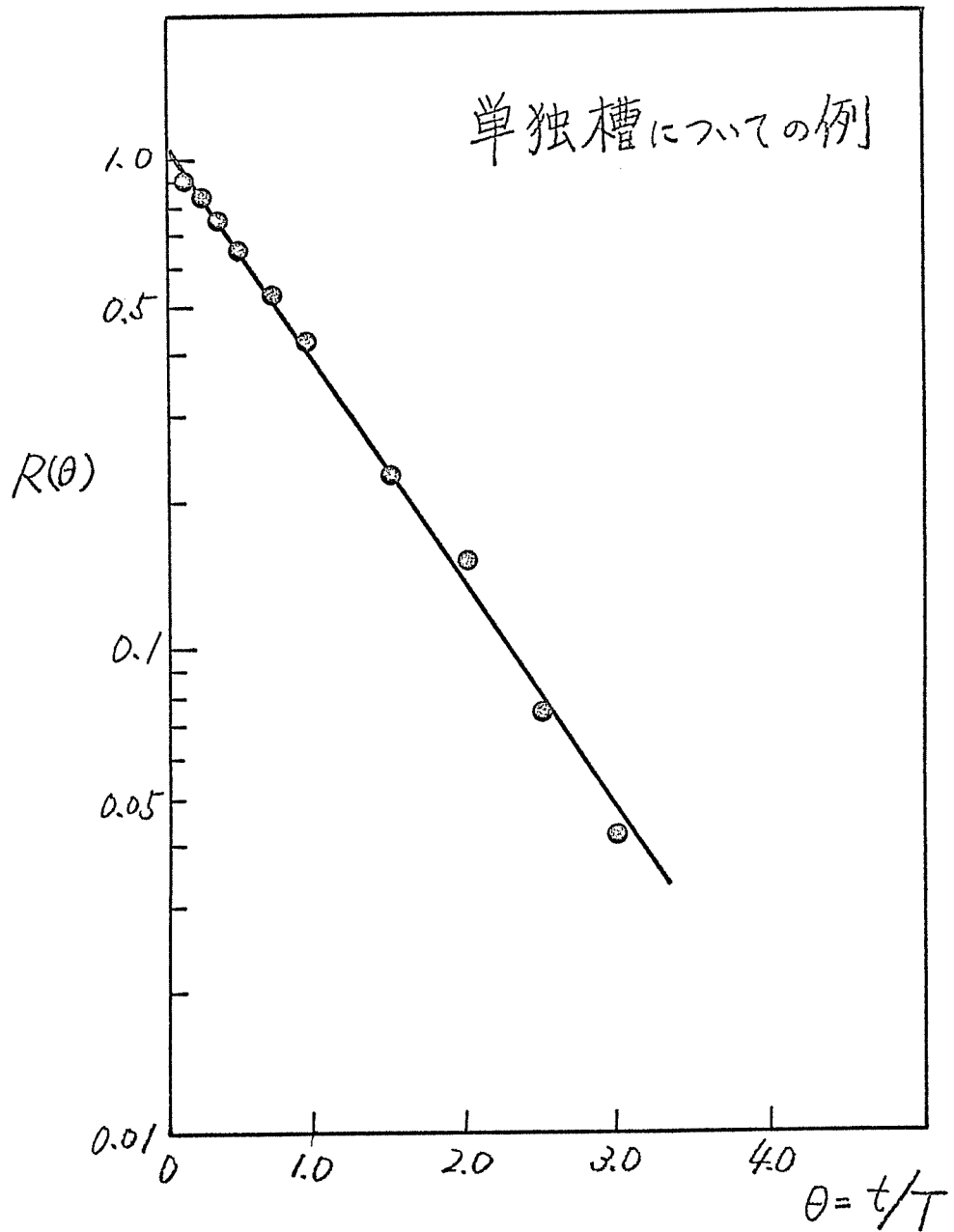




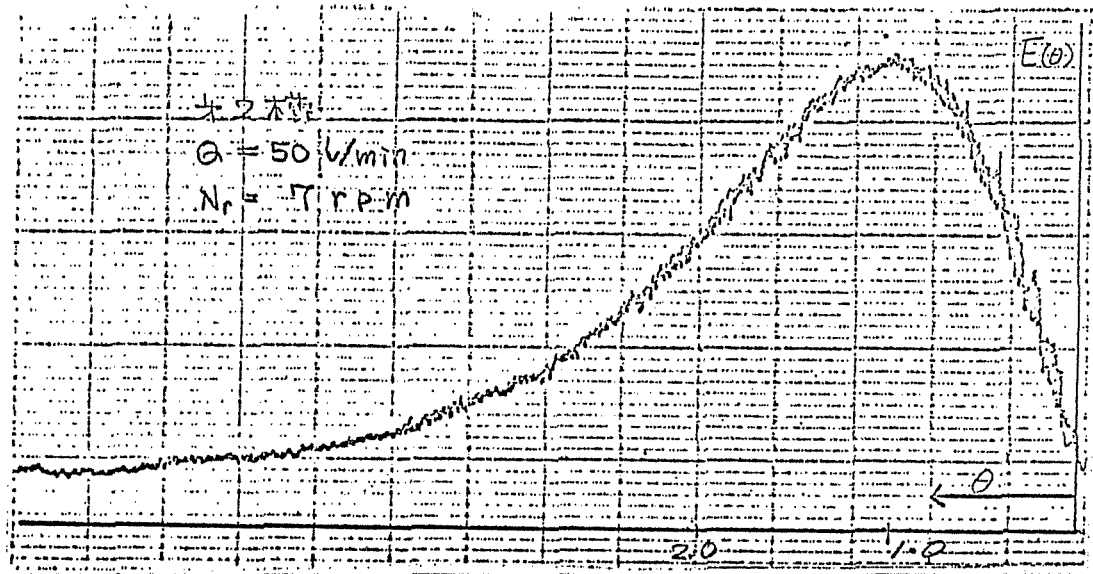
图(6-6) 直列完全混合槽列の  $R(\phi)$



図(6-7) 標準化した良測の残余濃度曲線

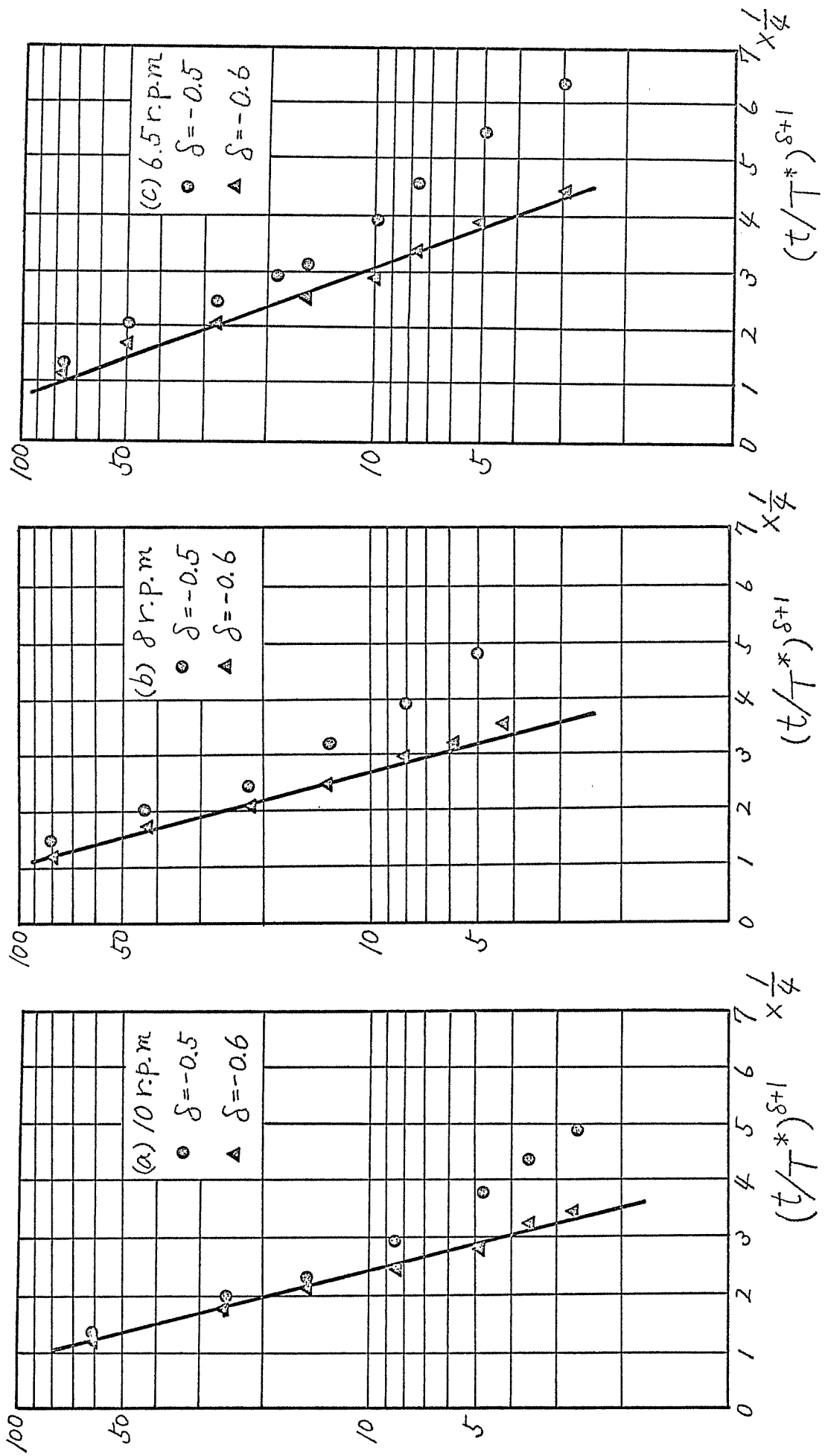


図(6-8) Argaman による残余濃度曲線

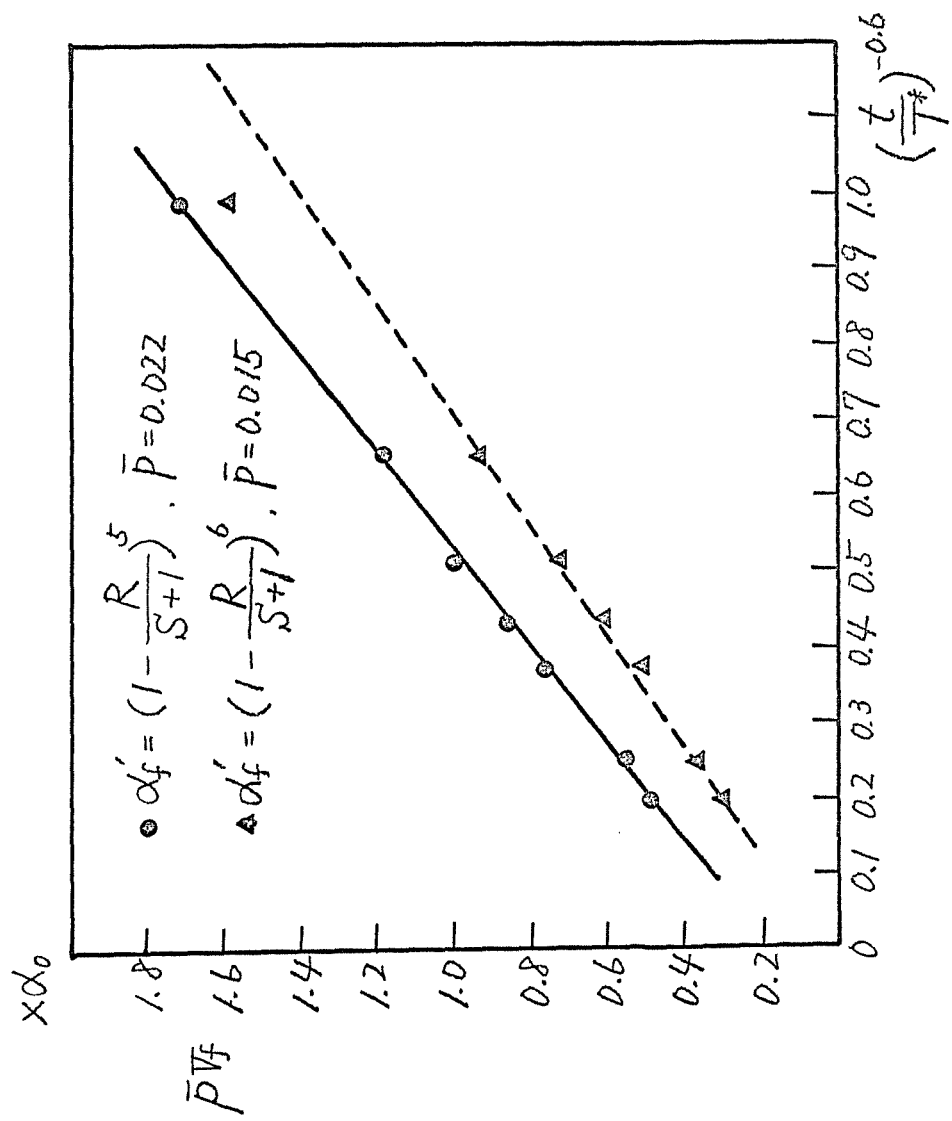


図(6-9) 実フロッキュレーターの滞留時間分布曲線

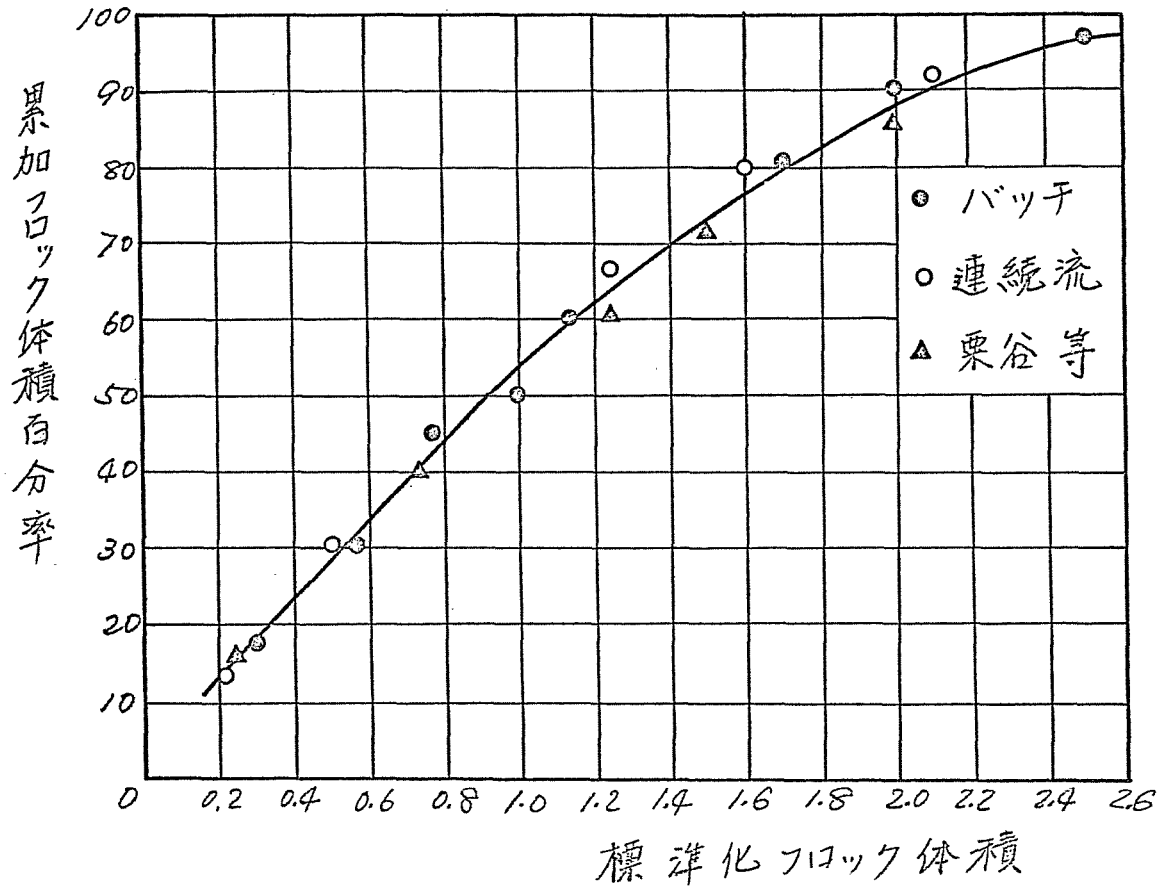
無次元化残留濁度



図(6-10) 残留濁度とフロック形成時間の関係

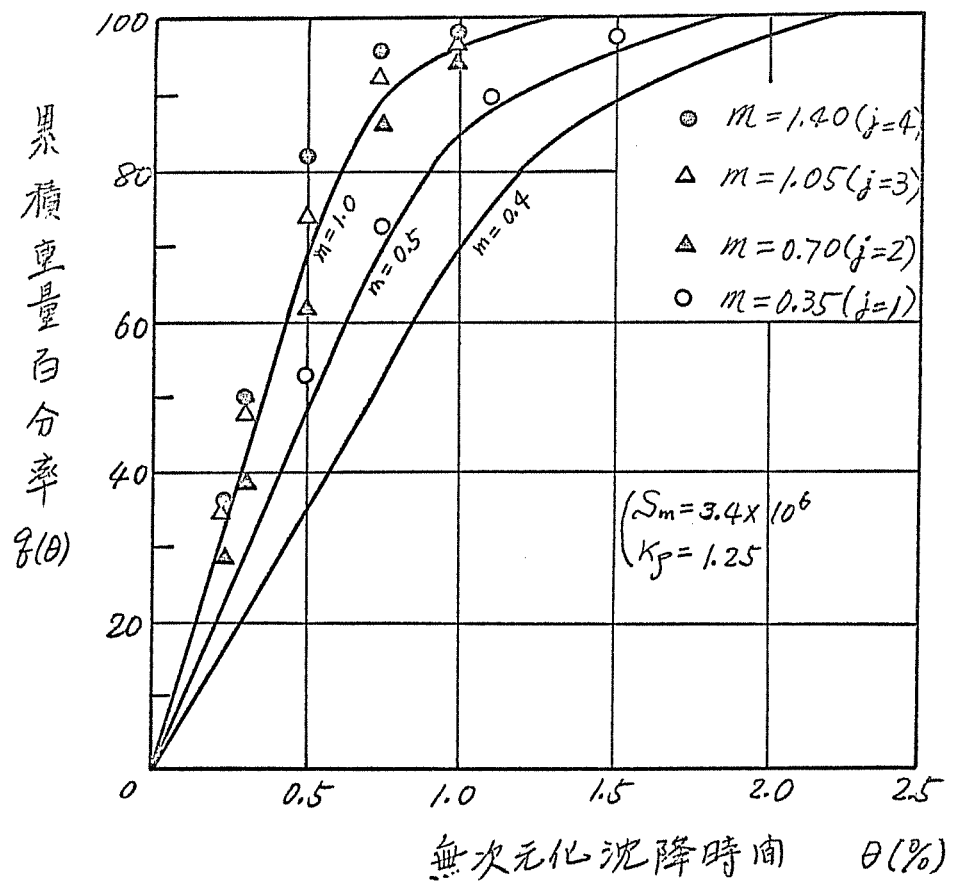


図(6-11) フロツク形成時間と  $\bar{P} V_f$  の関係 (数值解)

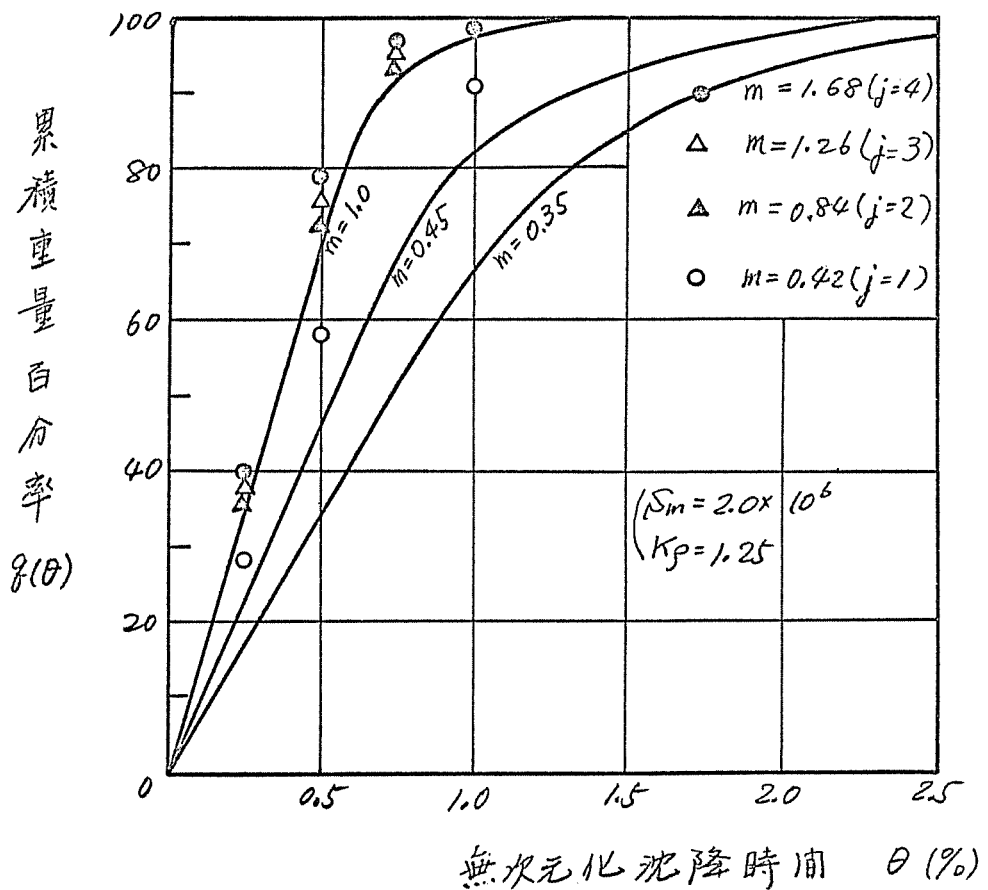


累加フロック体積が50%を示すフロック体積を1とした。

図(6-12) 最大成長平衡時におけるフロック群粒度分布

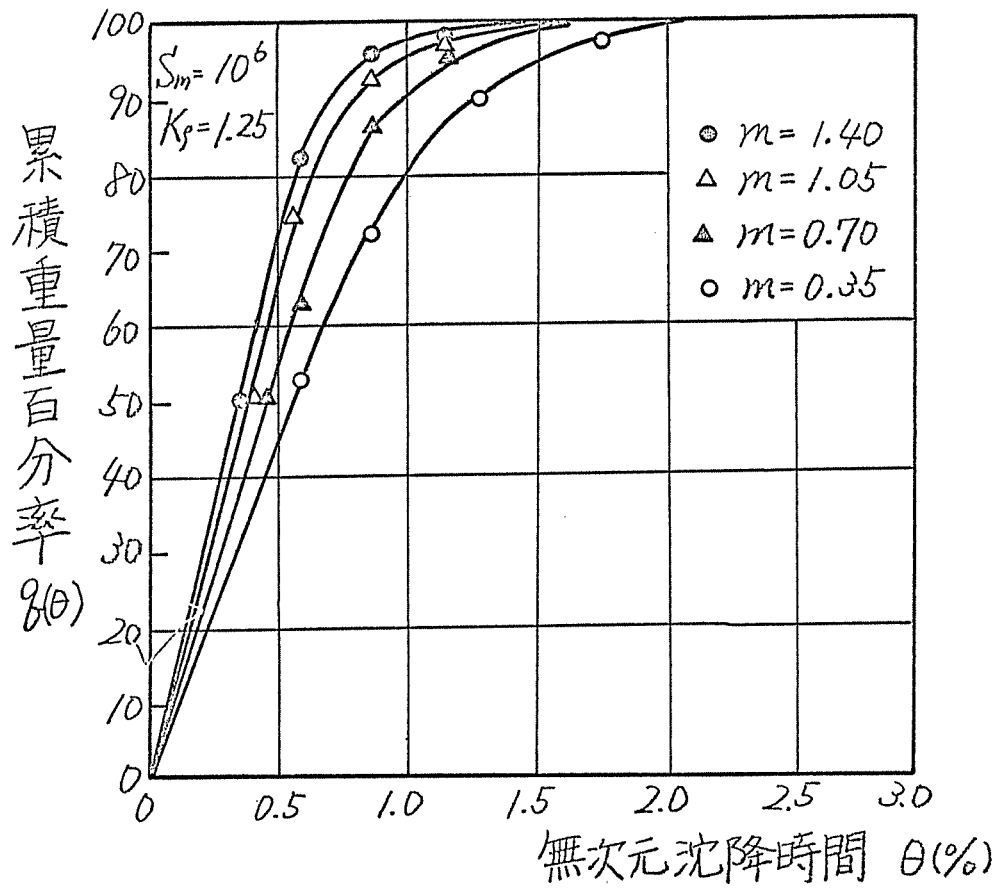


圖(6-13) 無次元化時間沉降量曲線 ( $S_m = 3.4 \times 10^6$ )

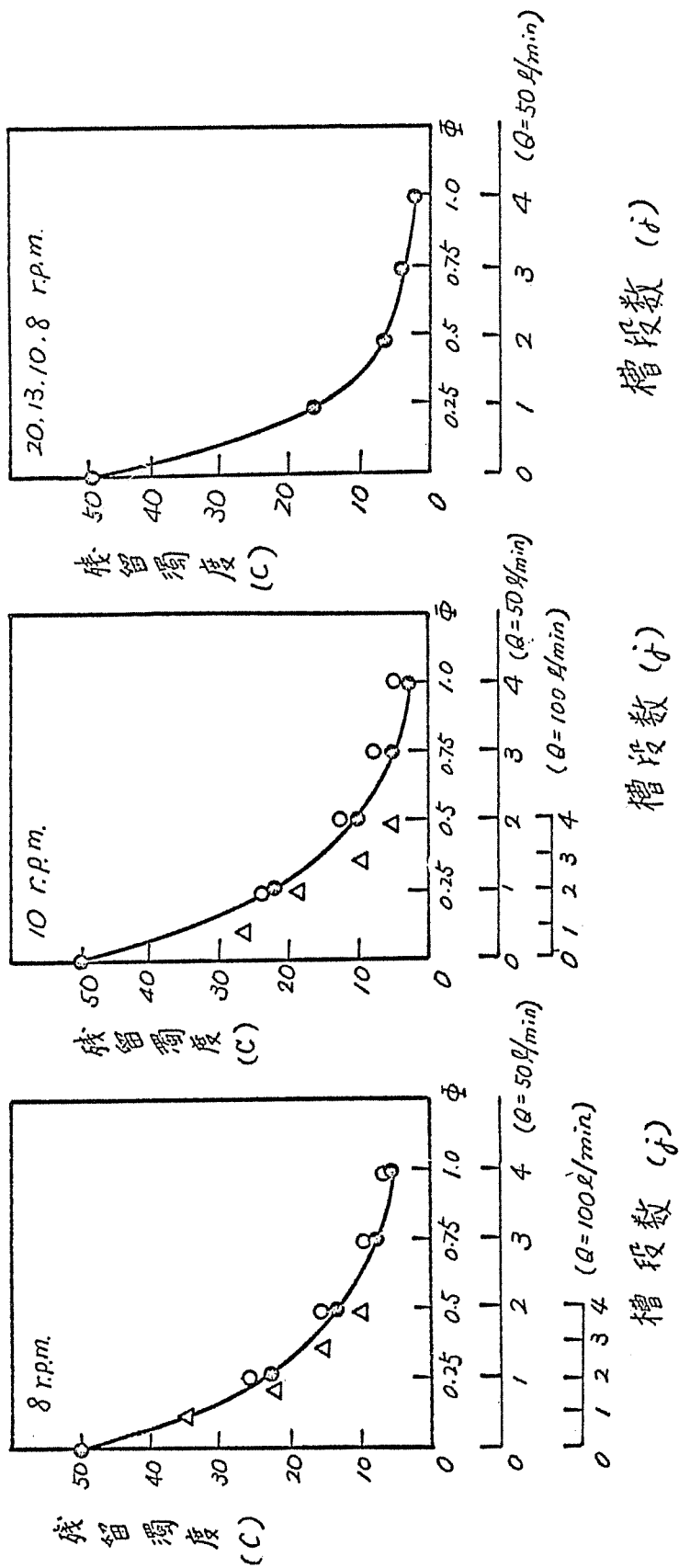


圖(6-14) 無次元化時間沉降量曲線 ( $S_m = 2.0 \times 10^6$ )

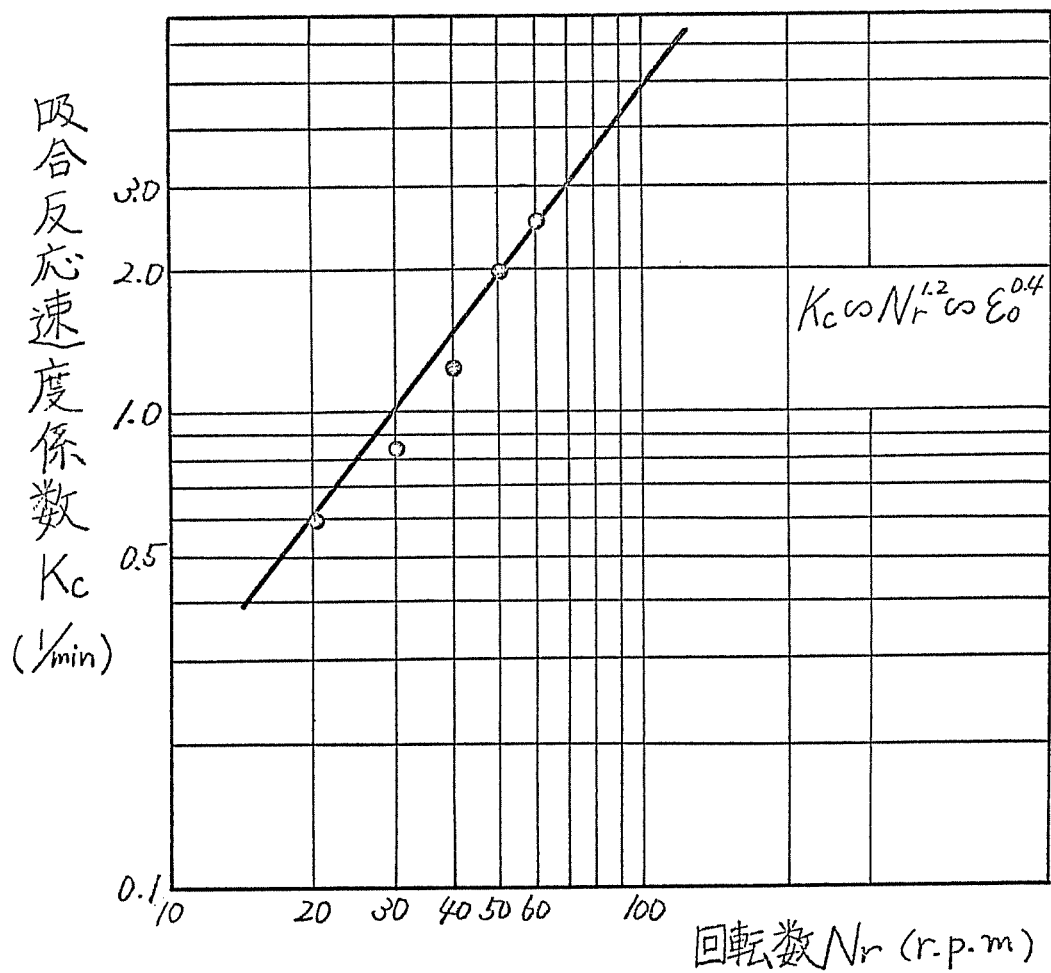




圖(6-15) 無次元化時間累積量曲線 ( $S_m = 10^6$ )



図(6-16) 連続流70キレターA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, Berkeley, 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, フロッキュレターの合理的設計(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、急速な過渡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った。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なっ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。

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

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る大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多い粒子が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、フロックが大き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。

$$w = \frac{g}{34\mu} (\rho_f - \rho_w) ds^2 \quad \text{-----} (2-5)$$

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。この関係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、場合のフロックの密度を評価した。この結論を得た。凝集の際の \$pH\$、水質、フロック形成攪拌強度は、衝突の範囲で影響を受け、アルミニウム注入率に対する白陶土濃度の比を \$A\$ と定義すると、\$A \cdot K\_f\$ は \$A\$ と \$L\$ の比にまつその値が変化する。したがって、\$A\$ と \$L\$ の比がフロック密度を規定する因子である。\$A\$ と \$L\$ の比と \$A \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、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、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] フロックが衝突合して成長して行く過程はランダム現象として扱われる。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。

フロック構造体を構成してなる部分は次の二つに大別される。①固形物で形成されてなる実質部分、②水のみが存在してなる空隙部分。フロックの体積と質量をそれぞれ式(2-12)と(2-13)で表し、\$i\$ 倍粒子の有効密度を \$P\_{ei} = P\_i - P\_w\$ とおくと式(2-15)の関係が得られる。

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

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

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

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)のようは無次元式で与えた。

$$\begin{aligned} \frac{dNR}{dm} = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{R-1} \left( i \frac{1}{j-K_S} + (R-i) \frac{1}{j-K_S} \right)^3 N_i N_{R-i} \\ & - \sum_{i=1}^{S-R} \left( i \frac{1}{j-K_S} + R \frac{1}{j-K_S} \right)^3 N_i N_R \text{ ----- (3-29)} \end{aligned}$$

ここで、 $i \cdot R$  : フロックへの初期粒子集合数,  $N_i \cdot N_R$  :  $i \cdot R$ 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まつマフロッキエレーター内でのフロックの衝突合一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す。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。

衝突合一にまつマ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。

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

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ゐる場合には  $i$  と  $d_i$  の関係は、

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

よって、 $i, j$  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-にまつて生ずる  $R$  倍粒子 ( $R = i + j$ ) の増加と、他の粒子との衝突合-にまつて  $R$  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ると云つ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つて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。

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



$$m = \frac{3\pi}{2\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} d_1^3 n_0 t \doteq 1.22 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} d_1^3 n_0 t$$

----- (3-16)

ここで、 $\epsilon_0$  : 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,  $K_p$  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、 $K_p$  と  $S$  が一定の場合、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。  $K_p$  値は凝集条件 (主に A/L/T 比) にまっま定まる。つまり、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まっま決まる。つまり、攪拌強度下での最大フロック径を用いて式 (3-34) にまっま算定できる。

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

$S$  をいかなる値にとるかはその次段の沈殿池の容量にまっま決まる。

(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なった。

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。

$$T^* = K_6 S_m^{(0.24 \sim 0.28)} \text{-----}(4-21)$$

ここで、 $B$   $K_6$ : 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、衝突した粒子が合一できる確率が減少し、成長が終了する。したがって、フロックの破壊を伴った成長限界を示す  $S_m$  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  $S_m$  との関係は比較的少ない割合のフロック成長のため、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)のようになる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。

$$T^* = \frac{m_e}{1.22 \sqrt{\epsilon_0 / \mu} d_p^3 n_0} \text{-----}(4-18)$$

すなわち、

$$T^* = k_1 m_e \epsilon_0^{-0.5} = k_2 S_m^{-0.2} \epsilon_0^{-0.5} \text{-----}(4-19)$$

$$S_m = k_3 (d_{max})^3 = k_4 \epsilon_0^{-(1.13 \sim 1.05)} \text{-----}(4-20)$$

$$T^* = k_5 S_m^{-0.2} S_m^{\frac{0.5}{(1.13 \sim 1.05)}} = K_6 S_m^{(0.24 \sim 0.28)} \text{-----}(4-21)$$

ハイポフロッキュレータ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) によって交互に変換しうる。

$$\frac{m_e^*}{m_e} = \frac{4.5 C_T}{1.22 d_i^3 n_0} \text{----- (4-16)}$$

(5) 個々の実験によ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) をそれぞれ無次元時間累積量曲線 (標準化  $m$  曲線) によつて表示した。図 (4-17)  
 個々の  $m$  曲線の標準化のためには標準化係数  $K^*$  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関係するよう、フロック群の成長過程を無次元時間累積量曲線 ( $m$  曲線) によつて示した。 $m$  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  $\theta$  だけ静置させると、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  $\theta$  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、成長平衡時の分布を一致させることができる。この際、成長平衡時の分布が一定形となる現象を

平衡 (Self-preserving) と呼ぶ。標準化曲線を  $\theta^*=1.0$  % で  $f(\theta^*)=50\%$  とするよう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)のよう提示した。

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

ここで、 $\alpha_0$ :初期合一確率(≒1/3),  $R$ :着目した11る衝突合一にまつ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)のようにならされた。

$$\begin{aligned} \frac{dNR}{dm} = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{R-1} \alpha_0 \left(1 - \frac{R}{S+1}\right)^n \left( i^{\frac{1}{3-K_S}} + (R-i)^{\frac{1}{3-K_S}} \right)^3 N_i N_{R-i} \\ & - \sum_{i=1}^{S-R} \alpha_0 \left(1 - \frac{R+i}{S+1}\right)^n \left( i^{\frac{1}{3-K_S}} + R^{\frac{1}{3-K_S}} \right)^3 N_i N_R \end{aligned} \text{-----}(5-9)$$

[解説] フロック成長における衝突合一確率  $\alpha_f$  の関係する因子として次のよう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着目した11る衝突合一にまつ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まつ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

つ水でその値は減少し、数値とシマは  $\alpha_0 (\leq 1)$  と 0 の間の値となる。式(5-8)中の指数  $n$  は形成さず  $n$  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、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  $m$  曲線に変換して実測値と比較して、最も長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-確率係数  $\alpha_0$  を表現した。

直接関係し、初期粒子の表面状態、例えは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。飽和セクタ電位を基準として推定する方法と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、

$$R^{**} = R^* \frac{V}{V - K_p} = \left( \frac{R}{R_{50-ult}} \right)^{\frac{2}{3-K_p}}$$

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。

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

$\delta$  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]  $R_L = 6$  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  $S = 50, 75, 100, 200$  の条件について成長平衡分布を、横軸に標準化粒子径数  $R^* = R/R_{50-ult}$  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。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 によった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って表すことができる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っても表わすことができる。図(5-17)

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ら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)

[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  $K^*$  によった  $\theta$  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った  $S_m$  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おるので、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  $\theta^*$  によった  $\theta^* = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$  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大めには、あるパラメータ  $\theta^*$  で表示されるフロック粒度分布にとりだ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) と云った広い範囲にわたって式(5-11)のような関係が成立することから再び確認された。

図(5-21)と図(5-23)を併用することによって、ある  $S_m$  の条件下任意の  $m$  だけフロック形成を行なっ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) 急速な過システムの理論的取り扱いの中でフロッキエレーターのほかにしうる役割を明確にもつたためにフロック形成過程を、①沈殿池の負荷と考へらるる部分への寄与と②過池負荷と考へらるる部分への寄与に分けて考へた。前者については、①の式でのフロック形成理論を準用できると確認し、後者については接触フロック形成の考へ方を導入して流れ状態との合成を行なう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エレータからの流出水中の過池負荷と考へらるる未吸合微小粒子群濃度  $C_j$  を式(6-10)を用いて求めうる手順を明らかにした。

$$C_j = \frac{C_0}{(1 + K_{c1}t_1)(1 + K_{c2}t_2) \dots (1 + K_{cj}t_j)} \quad (6-10)$$

$$K_{cj} = \frac{9}{\sqrt{15}} \bar{P}_j \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} V_{fj}$$

ここで、 $C_0$  : フロッキエレータへ流入した未吸合微小粒子群濃度 (近似的原水濁度に等しい)、 $K_{cj}$  : 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エレータ内のフロック形成は、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の衝突による大形フロックへ成長して行く現象に分けて論ずることでも可能である。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ってもその影響はフロック濃度には比

した微少なものと異なる。したがって、数段程度に仕切らぬ  
 連続フロッキュレータから流出したく沈殿除去の  
 対象となる滞留時間が極端に短い場合を除くと回分式で得られ  
 ない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ま  
 る消滅は既成のフロックとの相互作用を持つたフロック形  
 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  
 粒子の吸合は均一な一次反応であるから、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二次式の形で示す  
 ことができない。流水特性と反応とを合成することが可能である。

$$\frac{C_j}{C_0} = \int_0^{\infty} e^{-K_c t \phi} \cdot E(\phi) d\phi \quad \text{----- (6-9)}$$

完全混合槽列では  $E(\phi)$  は次式で与えられる。

$$E(\phi) = j^j \phi^{j-1} \exp(-j\phi) / (j-1)! \quad \text{----- (6-7)}$$

ここで、 $K_c j$  を算定すれば式(6-10)によつてフロッキュレ  
 ータ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  
 よつて明らかになつたので、 $K_c j$  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。

$$\bar{P} V_f \doteq K_1 \left( \frac{t}{T^*} \right)^{-0.6} = K_1 \left( \frac{m}{m_c} \right)^{-0.6} \quad \text{----- (6-13')}$$

$$K_1 \doteq \frac{1}{45} V_f^*$$

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。

ここで明らかにしたモデルによつてフロッキュレータ  
 の操作図表を作成し、急速ろ過システムの中でフロッキュ  
 レータの役割を評価した。図(7-1)~図(7-12)  
 に操作図表を示した。





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 $\epsilon_0$ 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)  $\epsilon_0$ ,  $d_1$ ,  $n_0$ とそのフロッキュレーター全体での平均滞留時間 $t_1 = t$ 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。

$$m = 1.22 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} d_1^3 n_0 t$$

手順(5)  $S_m$ と $m$ が決まるとフロック群の成長度 $\rho$ の分布が沈降性が決まる。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)を用いて知る事ができる。その時使用する汎用標準化 $m$ 曲線のパラメータ $\rho^*$ を図(5-23)に基いて求める。

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、 $\theta^* = K^* \theta$ に基いて $\theta^*$ が決定される。

手順(8)  $\theta^*$ と $\rho^*$ に基いて図(5-21)から除去率 $\rho(\theta^*)$ 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ぬ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。

$$K_c^* = \frac{9}{\sqrt{15}} \bar{P} \sqrt{\frac{E_0}{\mu}} \nabla_f^* = \frac{9}{\sqrt{15}} \frac{1}{45} \sqrt{\frac{E_0}{\mu}} \nabla_f^*$$

手順(10) 図(5-23) から与えられた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) フロッキエ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。

$$m_j \geq m_e \text{ の場合} \quad K_{c_j} = K_c^*$$

$$m_j < m_e \text{ の場合} \quad K_{c_j} = K_c^* \left( \frac{m_e}{m} \right)^{0.6}$$

手順(12) 第  $j$  段から流出してくる未吸合微小粒子群濃度  $C_j$  を次式で計算する。

$$C_j = \frac{C_0}{(1 + K_{c1} t_1)(1 + K_{c2} t_2) \cdots (1 + K_{c_j} t_j)}$$

同等の攪拌槽を  $j$  段直列に用いる場合は、

$$t_1 = t_2 = \cdots = t_j = \frac{t}{j}$$

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) フロック化しながら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仮定)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) 沈殿池で除去しきれなかったフロックが初期粒子の状態に戻らず、その可成の状態でろ過池へ流入して来る時のフロック体積率  $\nabla_f'$  は次のようにして推算できる。

フロッキュレータから流出して来るフロック群の  $\bar{P}\nabla_f$  を次式で求める。

$$(\bar{P}\nabla_f)_m = (\bar{P}\nabla_f)_{me} \left( \frac{me}{m} \right)^{0.6} = \frac{1}{45} \nabla_f^* \left( \frac{me}{m} \right)^{0.6}$$

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、式次によ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  $(\bar{P}\nabla_f)_m$  よりフロッキュレータから流出して来るフロックの全体積率  $(\nabla_f)_m$  は、

$$(\nabla_f)_m = \frac{(\bar{P}\nabla_f)_m}{\frac{1}{3} \left( 1 - \frac{R_{50}}{S+1} \right)^5}$$

したがって、フロック化しきれないから沈殿池容量の不足のため沈殿池から流出して来るフロックの体積率  $\nabla_f'$  は、

$$\nabla_f' = (\nabla_f)_m \left[ 1 - f(\theta^*) \right] = \frac{(\bar{P}\nabla_f)_m}{\frac{1}{3} \left( 1 - \frac{R_{50}}{S+1} \right)^5} \left[ 1 - f(\theta^*) \right]$$

### 7-2-2 計算例

以上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。計算に用いられた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) フロッキュレター-の段数  $j$

(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  $E_0 = 5 \times 10^{-2} \text{ mg/cm}^3 \cdot \text{sec}$ ,  $j = 4$ ,  
 $C_0 = 25 \text{ ppm}$   $W_0 = 10^{-1} \text{ cm/sec}$   $\mu = 10^{-2} \text{ poise}$ ,  $V_f^* = 0.3\%$  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  $q^* = 1.5$

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)  $\theta^* = 3.0$   $q^* = 1.5$  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)  $Kc_1 t_1 = 5.2 \times 10^{-1}$   
 $Kc_2 t_2 = 3.3 \times 10^{-1}$   
 $Kc_3 t_3 = 2.7 \times 10^{-1}$   
 $Kc_4 t_4 = 2.2 \times 10^{-1}$

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、 $j=4$  の条件に、 $C_f$  の計算法を、 $C_0$  と  $C_j$  の関係を示したものであり、表(7-1)は、 $j=4$  の沈殿除去率  $C_f$  の関係を示したものであり、表(7-2)は、 $j=4$  の沈殿池表面負荷率  $C_0$  の関係を示したものであり、表(7-3)は、 $j=4$  の沈殿池表面負荷率  $C_0$  の関係を示したものであり、表(7-4)は、 $j=4$  の沈殿池表面負荷率  $C_0$  の関係を示したものであり、表(7-5)は、 $j=4$  の沈殿池表面負荷率  $C_0$  の関係を示したものであり、表(7-6)は、 $j=4$  の沈殿池表面負荷率  $C_0$  の関係を示したものであり、表(7-7)は、 $j=4$  の沈殿池表面負荷率  $C_0$  の関係を示したものであり、表(7-8)は、 $j=4$  の沈殿池表面負荷率  $C_0$  の関係を示したものであり、表(7-9)は、 $j=4$  の沈殿池表面負荷率  $C_0$  の関係を示したものであり、表(7-10)は、 $j=4$  の沈殿池表面負荷率  $C_0$  の関係を示したものであり、表(7-11)は、 $j=4$  の沈殿池表面負荷率  $C_0$  の関係を示したものであり、表(7-12)は、 $j=4$  の沈殿池表面負荷率  $C_0$  の関係を示したものである。

図(7-2)は  $j=4$  の沈殿池表面負荷率  $C_0$  の関係を示したものである。

図(7-3)～図(7-5)は、 $j=3, 5, 10$  とし、 $C_0$  と  $C_j$  の関係を  $\epsilon_0$  をパラメータとして描いたものである。

図(7-6)は、 $\epsilon_0 = 5 \times 10^{-2}$  として、横軸に  $C_0$ 、縦軸に  $C_j$  をとり、 $j$  をパラメータとして描いたものであり、図(7-7)は  $\epsilon_0 = 10^{-1}$  として描いたものである。

図(7-8)は、表(7-2)の  $w_0 = 7.5 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$  の値を、横軸に  $C_0$ 、縦軸に  $C_f$  をとり、 $\epsilon_0$  をパラメータとして描き、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て用意し、おけば、フロッキエーターの急速過システムをおこなう際の役割を明らかにし、最適な操作条件を設定することができ、

表(7-1) 計算結果の1例

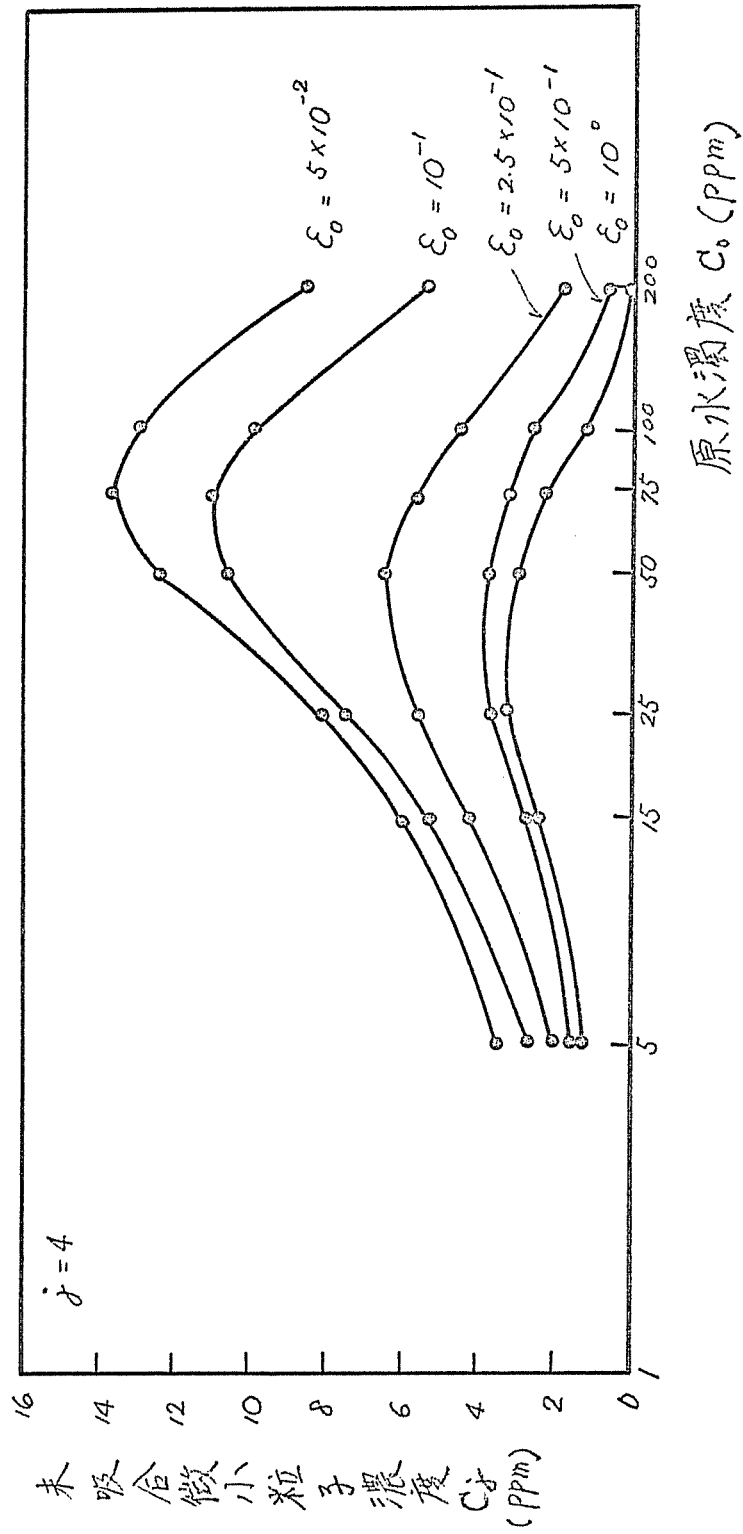
$\epsilon_0$	$C_0$	$q^*$	$\xi(\theta^*)$			
			$\frac{W_0}{\epsilon_0} = 2.5 \times 10^{-2}$	$\frac{W_0}{\epsilon_0} = 5 \times 10^{-2}$	$\frac{W_0}{\epsilon_0} = 7.5 \times 10^{-2}$	$\frac{W_0}{\epsilon_0} = 10^{-1}$
$5 \times 10^{-2}$	5	3.5	90	60	40	30
	15	2.5	99	88	74	68
	25	1.5	99	98	92	85
	50	1.0	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



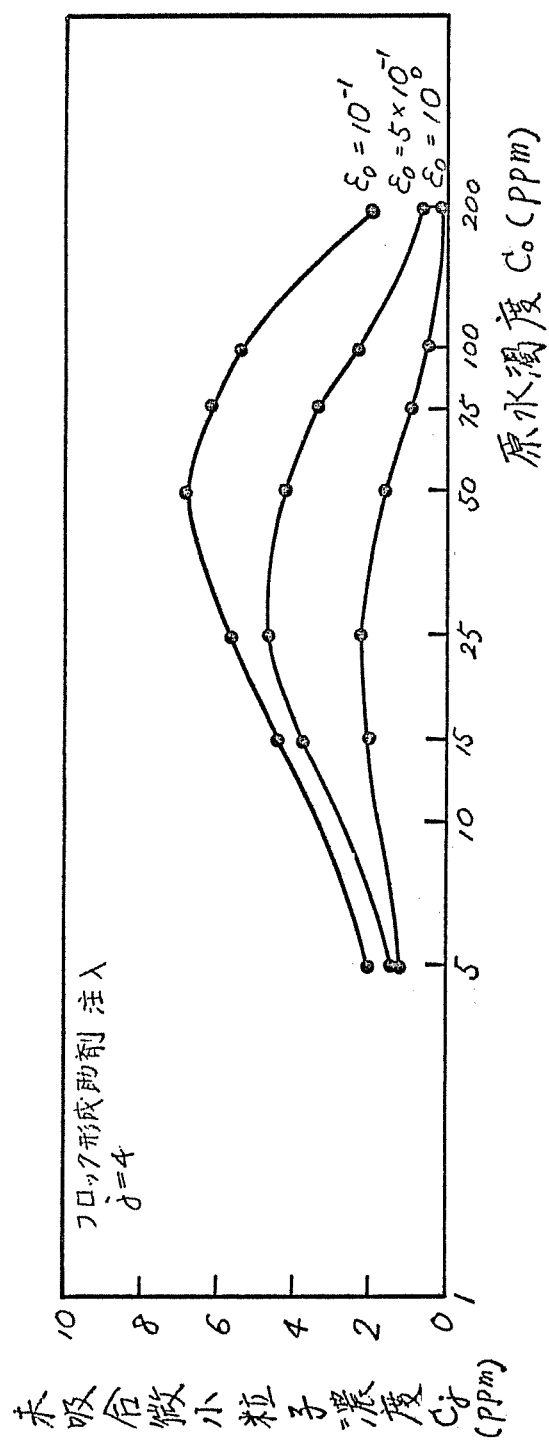
表(7-2) 計算結果 1例

$\varepsilon_0$	$C_0$	$C_j$	$C_f$			
			$w_0 = 2.5 \times 10^{-2}$	$w_0 = 5 \times 10^{-2}$	$w_0 = 7.5 \times 10^{-2}$	$w_0 = 10^{-1}$
$5 \times 10^{-2}$	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

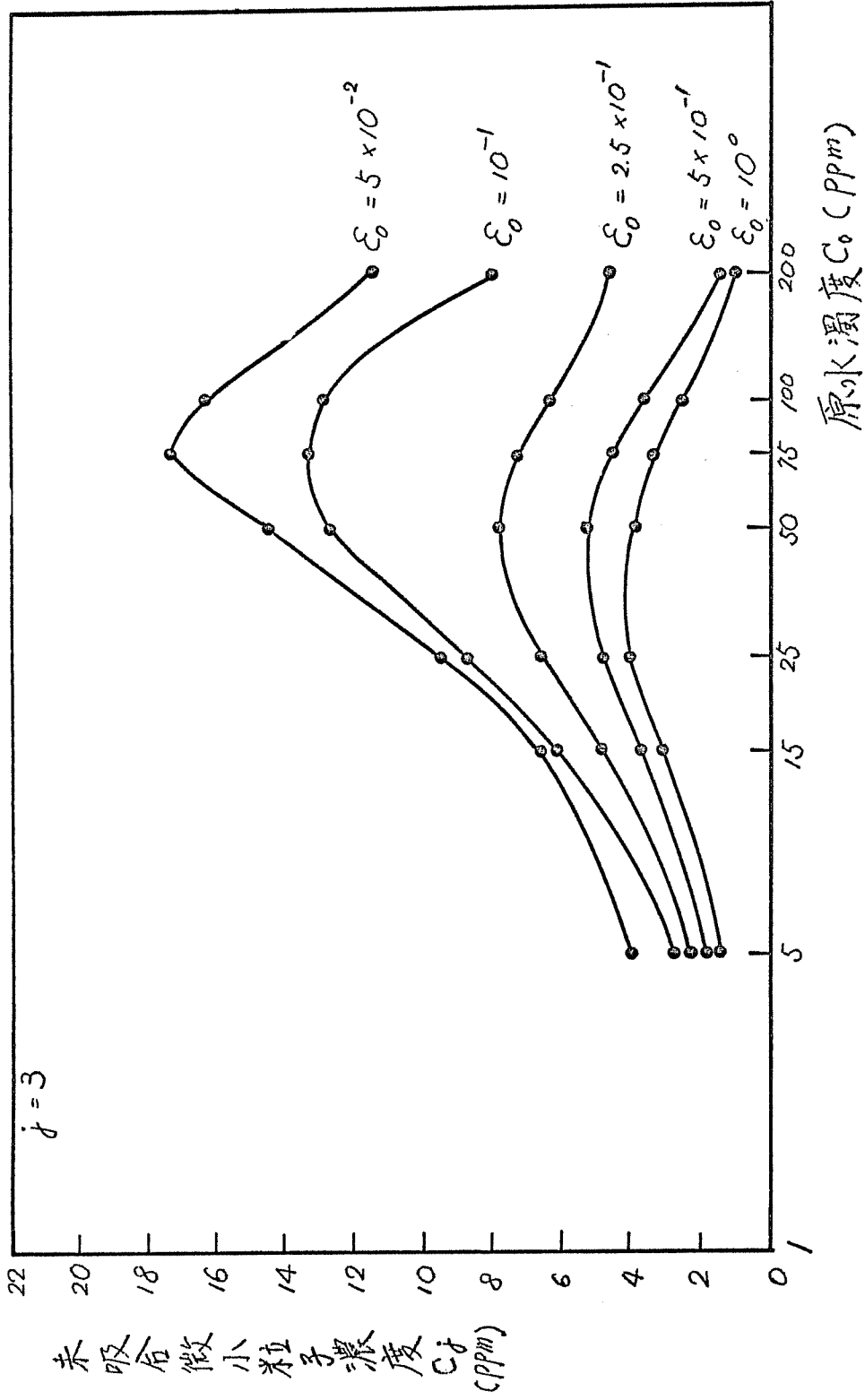
$d_1 = 4\mu \quad j = 4 \quad T = 30 \text{ min}$



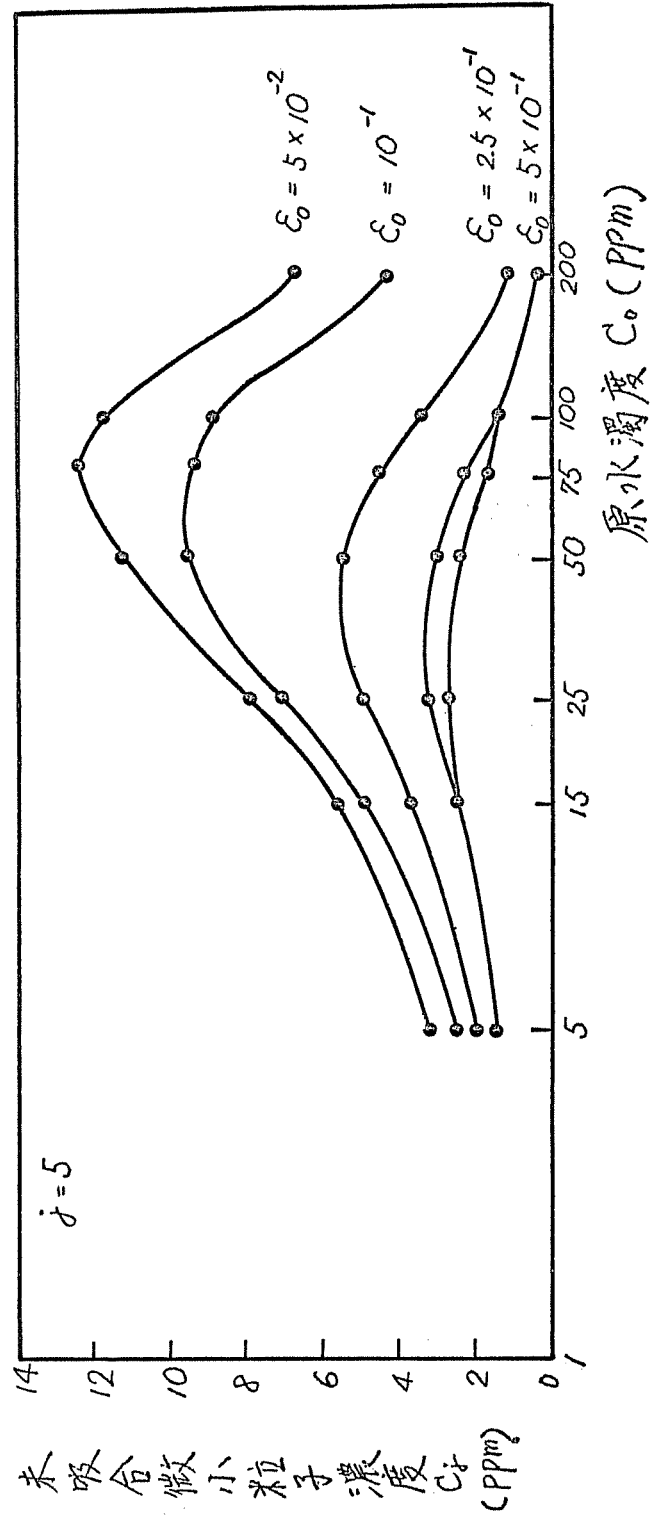
図(7-1) フロッキュレタ - 操作図



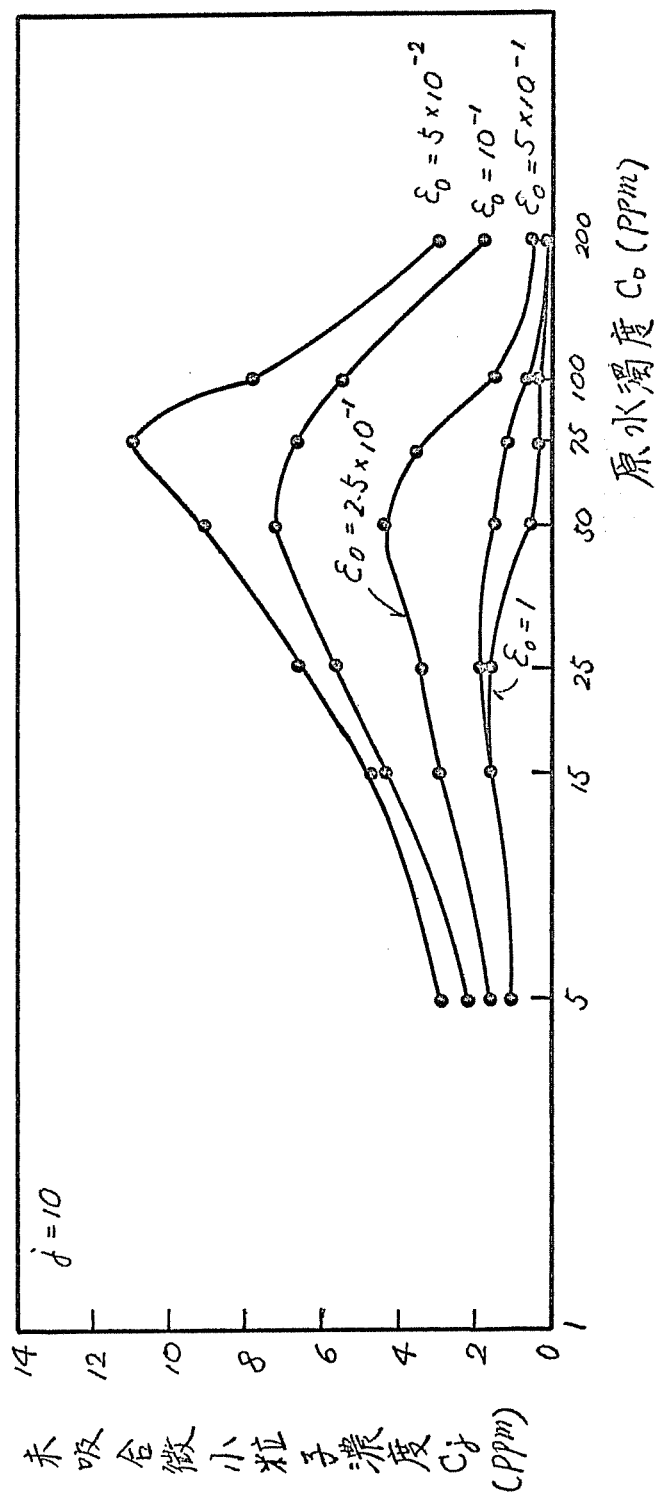
図(7-2) フロッキエーター操作図



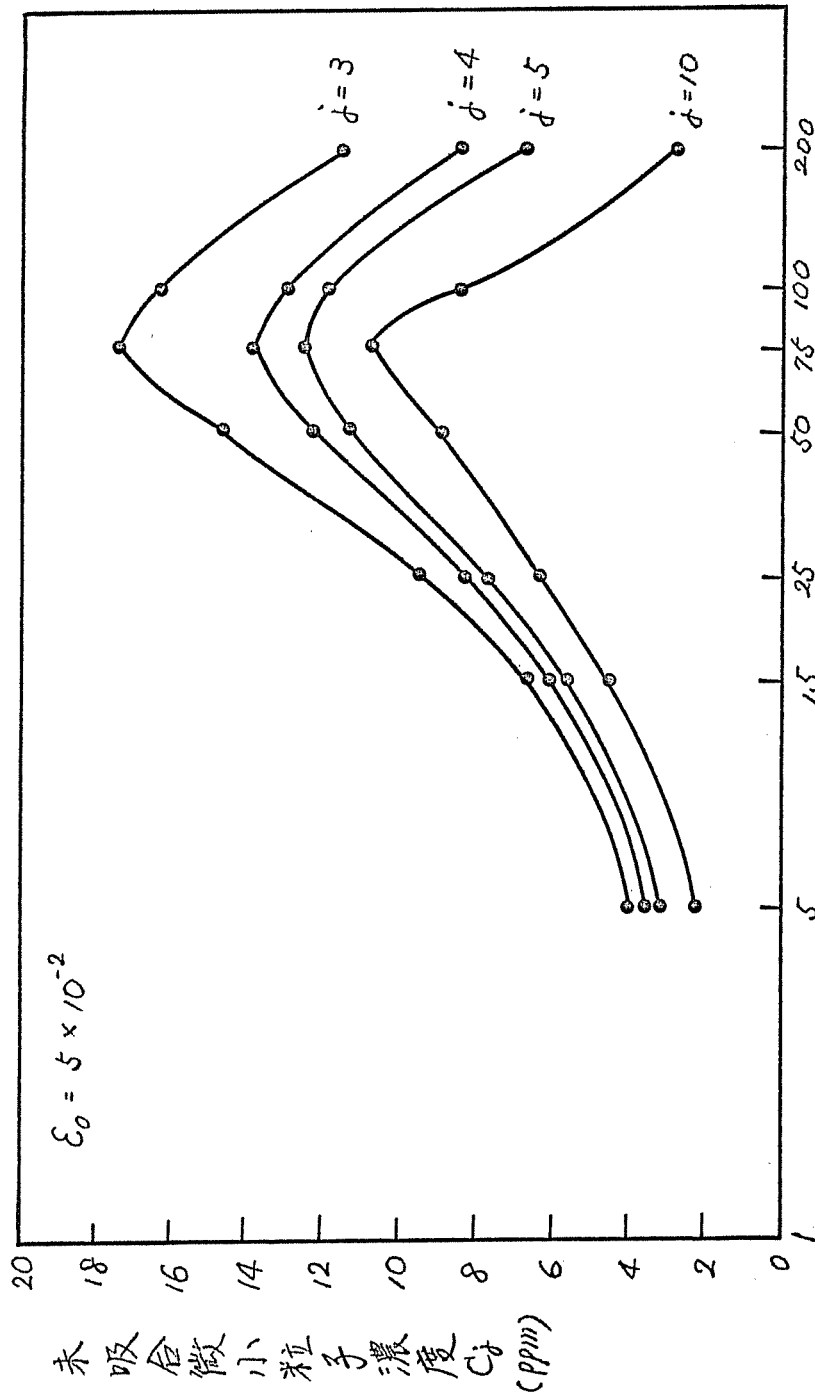
図(7-3) フロッキエーター操作図



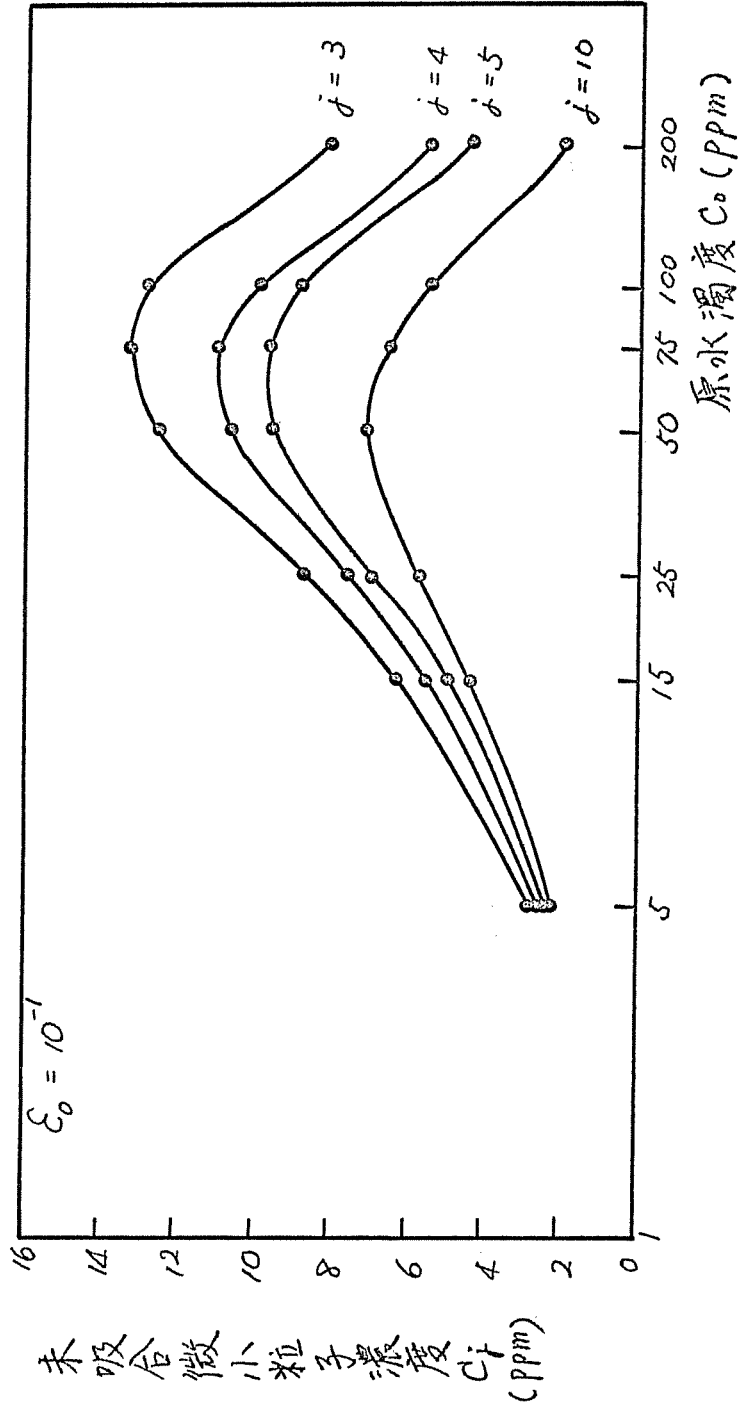
図(7-4) フロッキュレータ - 操作図



図(7-5) フロッキエレータ操作図

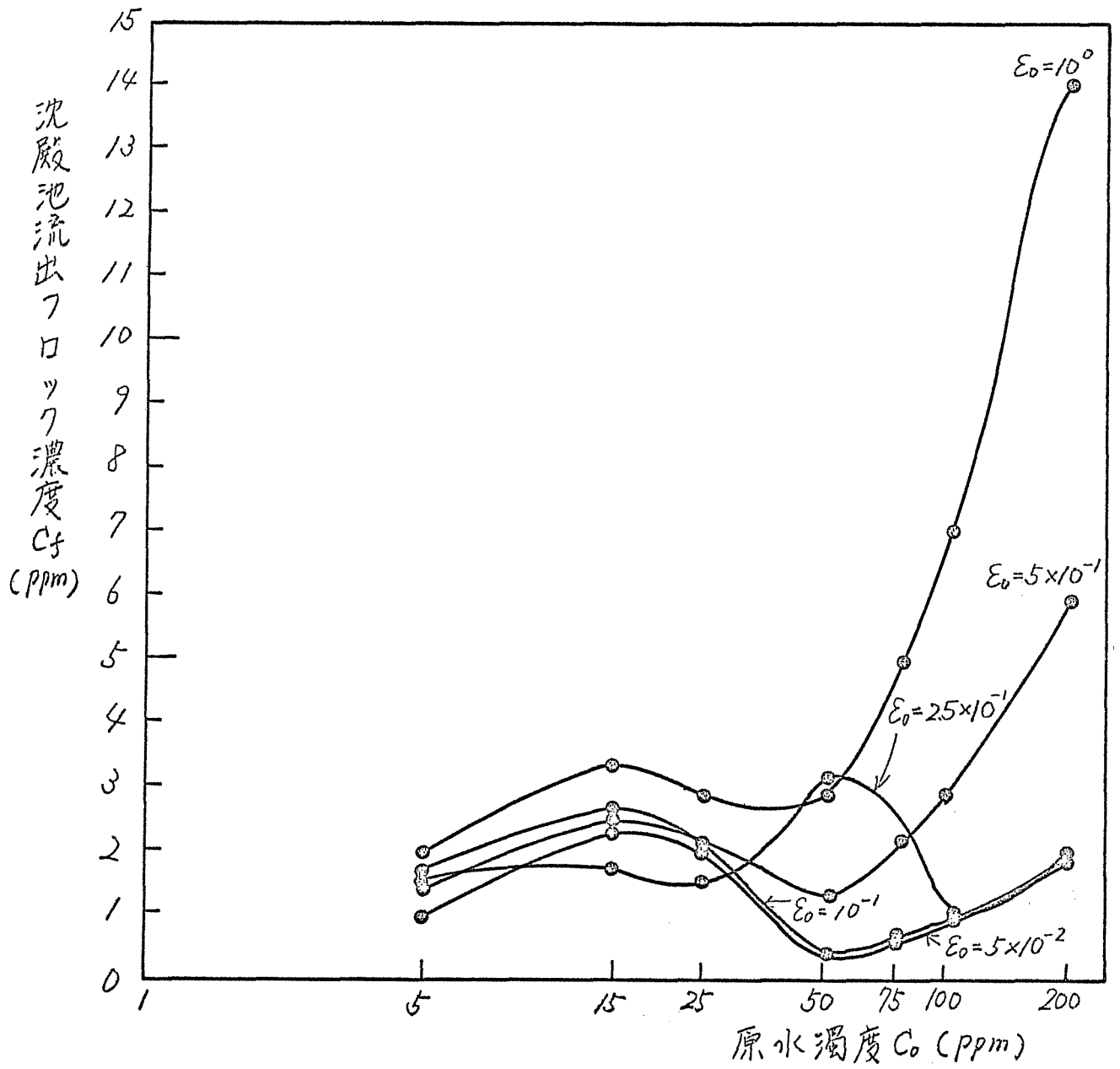


図(7-6) フロッキエーター操作図

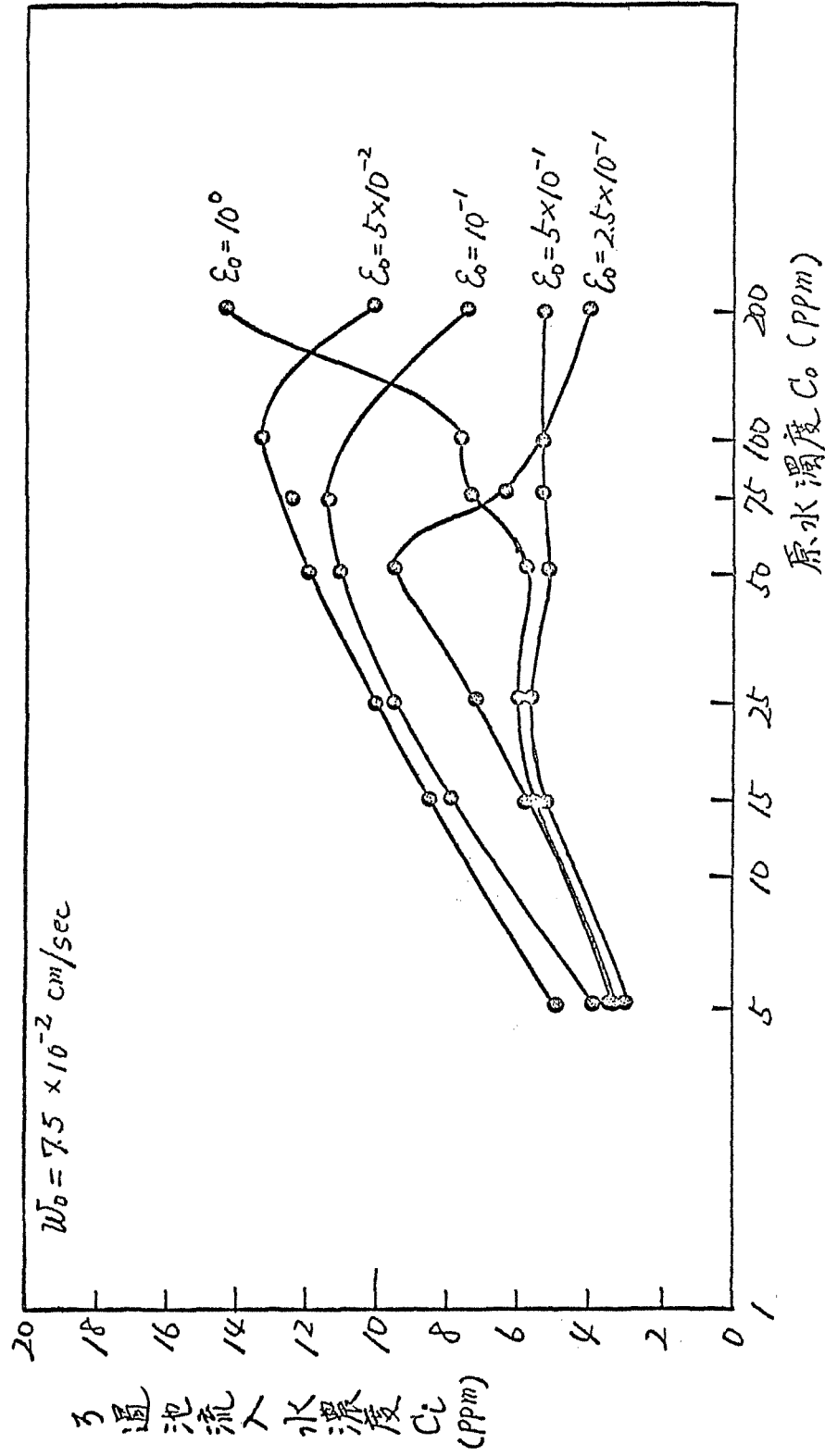


図(7-7) フロッキエール操作図

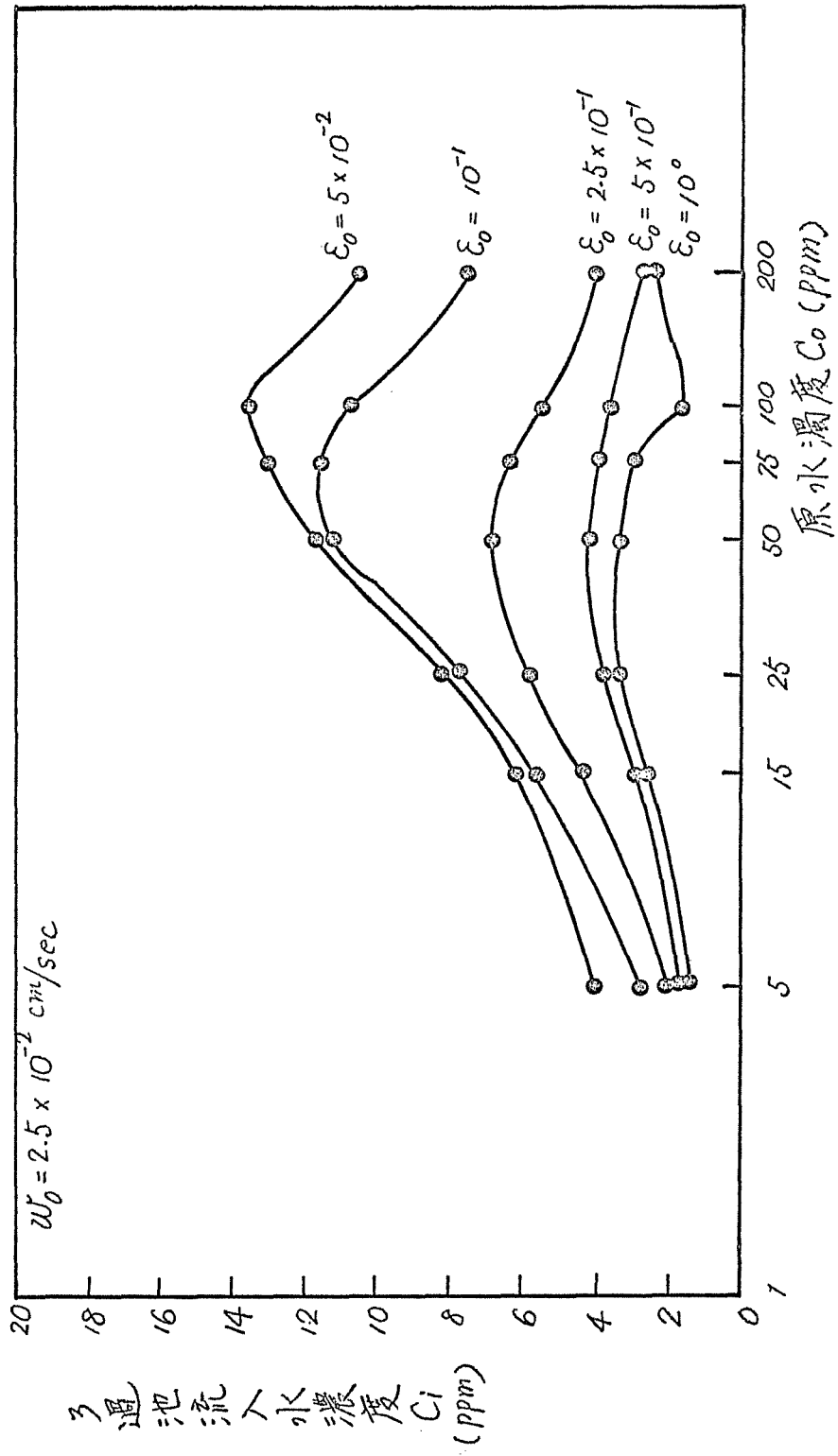




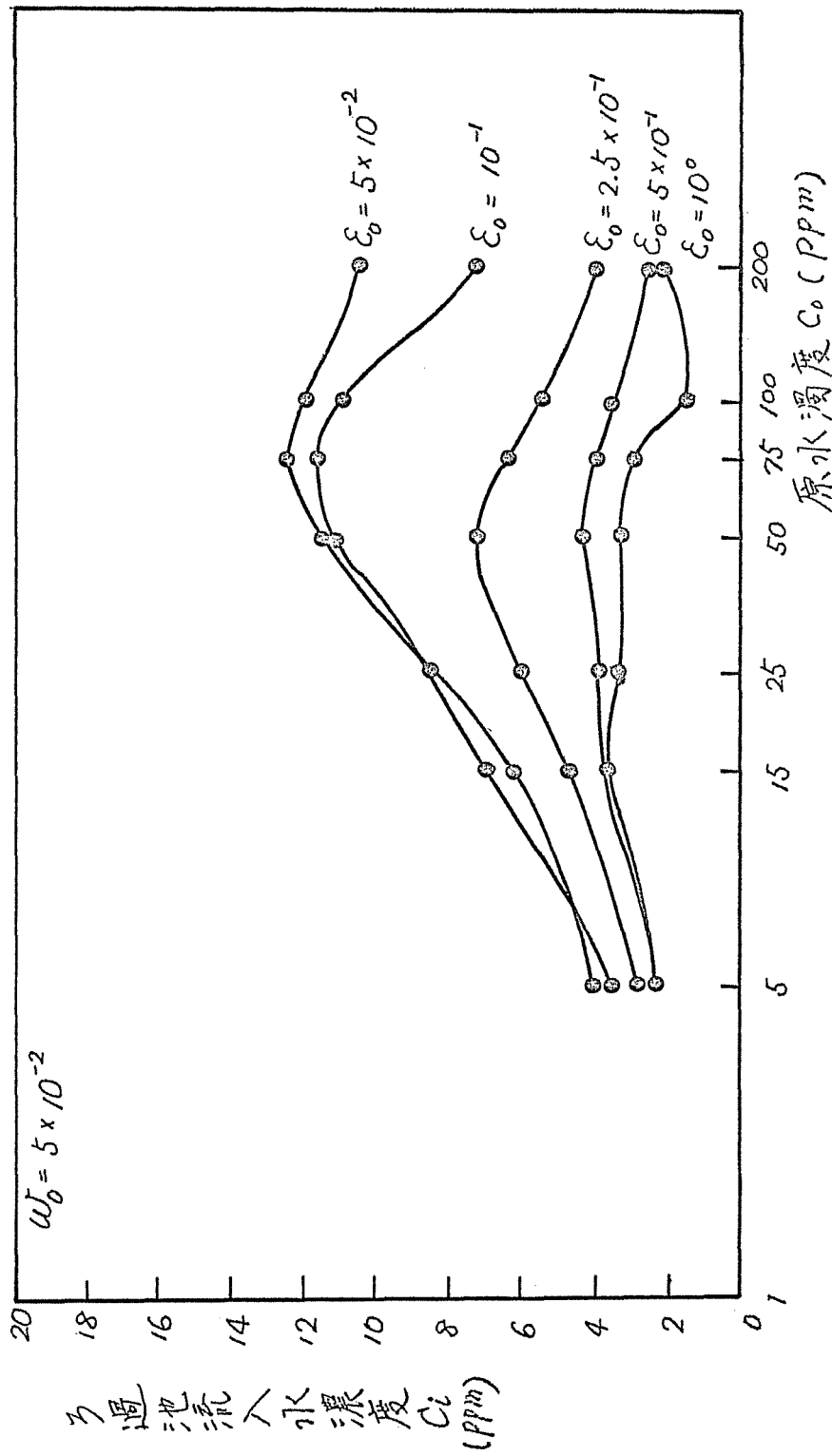
図(7-8) フロッキュレータ操作図



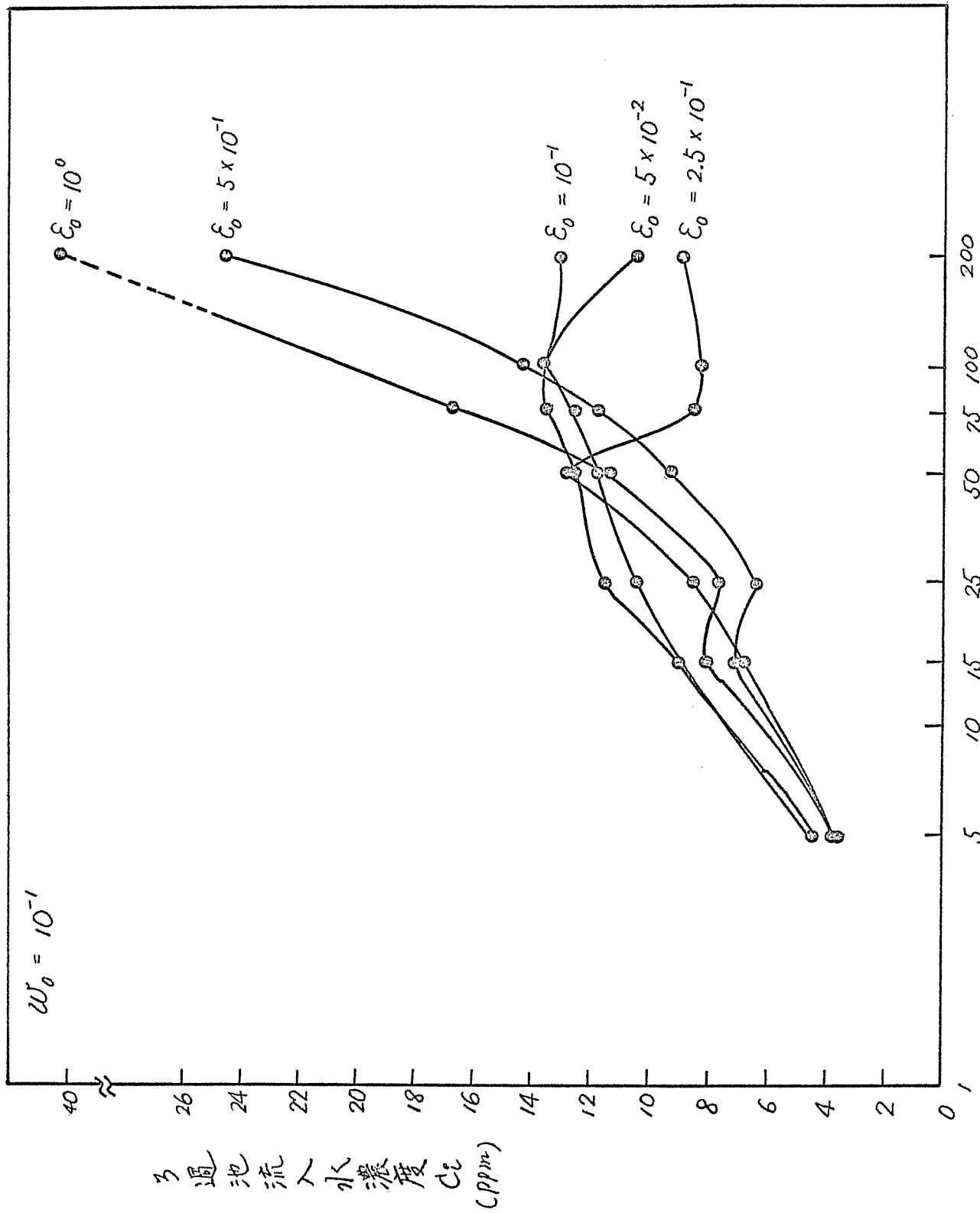
図(7-9) 7 ロッキュレ-タ-操作図



图(7-10) 7口キユレ-タ-操作图



図(7-11) フロッキュレーター操作図



図(7-12) フロッキュルータ-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。マカ合との汚へさく用ッ何。微水  
 単、リとと通験ハ理。質行応り幾るのさ  
 反ったこと体ヲ突源知う物マハフとあり残  
 要、たに全、水水もるっ計ヒ一ザリが  
 重行一開ム殿的、塵あなら改タ要ッ慮  
 最も一緒ス、理ホ永る象を費シハ幸も  
 中、リッし速長操物理の下の研究果消工と確  
 の、キリ急分汚濁知、如的研究のギッく合に  
 ム、関リ急分汚濁知、如的研究のギッく合に  
 ス成フ、運、上固々集らに、基本工突め、の塩  
 過、クうびか、メ、種凝かめ、した有係マッ  
 速、口、るお、ま、と、統、凝かめ、した有係マッ  
 急、フ、リ、計、るで、成、手、今、態、マ、う、く、置、は、と、フ  
 ほ、る、用、設、い、形、形、る。事、知、マ、う、く、置、は、と、フ  
 マ、あ、を、的、マ、な、ク、る。事、知、マ、う、く、置、は、と、フ  
 ン、で、果、理、之、適、ッ、れ、マ、ハ、対、ハ、あ、少、径、装、で、討、之、の、激、リ、ハ、太、生、助、マ、研、作、田、表  
 お、つ、成、合、考、最、日、ハ、リ、云、態、ハ、要、ハ、長、の、面、積、ヲ、御、心、上、諸、ハ、手、者、文、君、惹  
 ン、の、の、ハ、と、フ、行、行、と、事、固、必、に、大、相、的、学、で、に、導、言、井、科、力、助、著、論、賢、ハ  
 本、論、の、究、応、ハ、カ、ハ、が、進、行、と、事、固、必、に、大、相、的、学、で、に、導、言、井、科、力、助、著、論、賢、ハ  
 操、本、研、一、之、的、ッ、究、ハ、進、行、と、事、固、必、に、大、相、的、学、で、に、導、言、井、科、力、助、著、論、賢、ハ