

港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 464 Sept. 1983

塩水中におけるベントナイトのフロック形成について(その2)

安立重昭

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. 実験概要	3
2.1 供試土	3
2.2 塩 水	4
2.3 実験方法	4
2.4 実験条件	4
3. 実験結果および考察	5
3.1 フロックの粒径加積曲線と中位径	5
3.2 最大成長中位径と濁算濃度, 攪拌強度	5
3.3 フロックの粒度分布	7
3.4 フロックの形成過程に関する実験式	12
3.5 フロックの密度と沈降速度	15
4. 結 論	19
5. あとがき	20
参考文献	20
記号一覧表	20

Flocculation of Bentonite in Salt Water (Part 2)

Shigeaki ADACHI*

Synopsis

The soil particles causing turbidity in the sea compose flocs. The behavior of flocs composed in the sea is different from individual soil particles. The basic knowledge concerning the behavior of soil particles in the sea was gained by observing flocs composed in salt water under the microscope.

The maximum median floc particle size is proportional to the nearly $-0.3\sim-0.5$ th power of concentration of SS and to the nearly $-0.4\sim-0.8$ th power of velocity gradient. Distribution of floc particle size can be expressed Rosin-Rammler distribution. The number of flocs in the unit volume is proportional to the nearly 1.7th power of concentration of SS. The average value of relative floc density is proportional to the nearly -1.3 th power of the maximum median floc particle size. The settling velocity of flocs which calculated using Stokes' law exists between 0.001 cm/sec and 0.01 cm/sec. The median settling velocity of flocs is proportional to the nearly 0.7th power of the maximum median floc particle size.

* Senior Research Engineer, Machinery Division

塩水中におけるベントナイトのフロック形成について(その2)

安立 重昭*

要 旨

海域において濁りの原因となる土粒子は、フロックを形成し、個々の土粒子とは異った挙動をする。このため、ベントナイトを用いて、従来、研究されていない比較的高い濁質濃度の範囲において、塩水中で形成されたフロックの大きさと濁質濃度、攪拌強度との関係等を調べ、海域における微細土粒子フロックの形成についての基礎的データを得た。

フロックの最大成長中位径は、濁質濃度のほぼ $-0.3 \sim -0.5$ 乗に、攪拌強度のほぼ $-0.4 \sim -0.8$ 乗に比例している。フロックが十分成長した場合の粒度分布は、ロジン・ラムラー分布によって表すことができ、単位体積中のその数は、濁質濃度のほぼ 1.7 乗に比例している。この場合のフロックの平均相対密度は、最大成長中位径のほぼ -1.3 乗に比例し、ストークスの法則から計算した沈降速度は、ほぼ $10^{-3} \sim 10^{-2}$ cm/secの範囲に分布している。また、沈降速度の中位値は、最大成長中位径のほぼ 0.7 乗に比例している。

1. まえがき

海域において浚渫・埋立を行う場合、ある程度の濁りを発生することは避けられず、これが国民の環境に対する意識の高まりに連れて問題となっている。このため、浚渫・埋立によって発生する濁りとその防止に関する研究、さらに発生した濁りの拡散に関する研究が急速に進められ、かなりの成果をあげている。

濁りの原因となる物質は、浚渫によって海底から巻きあげられたり、埋立地から排出される余水に含まれる微細な土粒子であるが、海域においてこれらの土粒子は、単独で存在することなく、海水中の塩分の働きによって凝集してフロックを形成し、個々の土粒子とは異った挙動をする。河口感潮部において埋没現象が起こるのも、塩分の働きによって上流から流れてきた土粒子が凝集してフロックが形成されることが原因の一つである。

土粒子が塩分の働きによりフロックを形成することは、以前から知られていたが、現象が複雑であるためもあってか、塩分による土粒子の凝集に着目した研究は、わずかに楠田ら¹⁾、川名ら²⁾に見られるだけである。

海域における濁りの発生・拡散に関する現象についてのより正確な情報を得るためには、海域における微細土粒子の挙動を一層明らかにする必要がある。このため筆者は、この問題に関する研究の一環として、塩水中における微細土粒子フロックの形成についての研究を進めて

おり、前報³⁾では、形成されたフロックの大きさと塩分濃度、濁質濃度の関係、DLVO理論を塩水中の土粒子の凝集に適用した場合の問題点等について検討を行った。しかし、前報の検討は、現象事体の把握を主眼としたため、ほぼ定性的な検討に終始し、実際の問題に直ちに適用できるものではない。そのため引き続いて本報では、実際の問題との橋渡しを目的として、従来、研究されていない比較的高い濁質濃度の範囲において塩水中におけるフロックの形成と形成されたフロックの大きさおよびその密度について、濁質濃度、攪拌強度との関係に絞ってできるだけ定量的に検討を行った。また、従来ほとんど研究されていないフロックの粒度分布についても検討した。さらにフロックの沈降にストークスの法則を適用した場合の沈降速度についても検討した。

2. 実験概要

2.1 供試土

実験では微細土粒子として、市販のベントナイトを用いた。図-1に、顕微鏡法により求めたこの供試土の体積基準粒径加積曲線を示す。なお、顕微鏡法による粒度分布の測定は、他の測定方法と比較して粒径を直接測定し得る点で優れているが、顕微鏡の分解能より小さい粒子は測定し得ないことに留意する必要がある。光学顕微鏡の場合、その分解能は可視光線の波長(平均 $0.55 \mu\text{m}$)より小さくなることはもちろんないが、対物レンズの開

* 機材部 主任研究官(汚濁防止担当)

口数にも関係し、この場合の分解能はほぼ $2\mu\text{m}$ である。したがって、ここに示した粒径加積曲線は、粒径 $2\mu\text{m}$ 以上の粒子についてのものである。

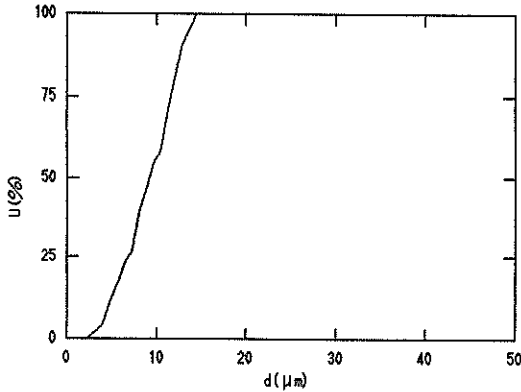


図-1 供試土の粒径加積曲線

2.2 塩 水

陸水の影響のない海水 1 kg には 30g 前後の塩類が含まれており、この塩類が土粒子のフロック形成に大きな役割を果たしていることは前報にも述べたとおりである。これらの塩類の中で最も多いのは、塩化ナトリウム (NaCl) であり、塩類総量の 69% を占める。次いで、塩化マグネシウム (MgCl_2)、硫酸ナトリウム (Na_2SO_4) と続き、それぞれ塩類総量の 14%、11% を占めている。

実験では海水にあたるものとして、蒸留水に塩化ナトリウムを溶解させたもの（以下「塩水」という）を使用した。これは、海水中に含まれる塩類は、土粒子のフロック形成に際していずれも電解質として働き、その大部分を占める塩化ナトリウムをもって、その働きを代表させることができると考えたからである。塩分濃度は、すべてのケースを通じて 25g/l とした。これは海水の塩分濃度としては低目であるが、陸水の影響の大きい港湾内や河口部を想定したためである。

2.3 実験方法

実験は、平板型の攪拌翼 ($2\text{cm} \times 1.7\text{cm}$) 4 枚を持つジャーテスターを用いて行った。

土粒子として使用したベントナイトは、実験に先立ち 24 時間以上蒸留水に浸漬してよく水になじませた。このベントナイトを蒸留水に懸濁させた懸濁液 50ml をビーカー中の塩水 450ml に加えて 500ml とし、これを所定の強度で攪拌してフロックを形成させた。なお、ベントナイトの懸濁液と塩水は、混合した後、所定の濃度になるようにあらかじめその濃度を調整した。

形成されたフロックの粒径の測定は、ベントナイトを加え、攪拌を開始した時点から所定の時間が経過したごとに、採水した濁水をスライドグラス上に取り、これを顕微鏡下で撮影し、写真上から個々のフロックの長径（フロックの輪郭に接する最長間隔の二つの平行線間の距離）を読みとり、ここではこれをフロックの粒径とした。

また、幾つかのケースにおいては、カバーグラスとの組み合わせによって一定の体積を検鏡できるスライドグラスを用いて、単位体積中のフロックの数を測定した。

2.4 実験条件

(1) 実験条件

フロックの形成は、塩分濃度、土粒子の濃度（以下「濁質濃度」という）、乱流変動の強さ＝攪拌強度に支配されると考えられる。ここでは、前述のとおり塩分濃度を一定とし、濁質濃度を 50mg/l 、 80mg/l 、 120mg/l 、 200mg/l 、 320mg/l 、 500mg/l の 6 とおり、攪拌強度については、ジャーテスターの攪拌翼の回転数を 60rpm 、 80rpm 、 110rpm 、 150rpm の 4 とおり（この値の意味については(2)で述べる）とし、これらを組み合わせたケースについて実験を行った。

(2) G 値

ところで、攪拌強度をジャーテスターの攪拌翼の回転数で示した場合、これは必ずしも客観的な攪拌強度を意味しない。何故ならば回転数が同一であっても攪拌翼の形状や面積さらには攪拌を受ける媒体の体積 V_0 が変われば攪拌強度も変化することは容易に理解できる。そのため、攪拌翼の回転数を Camp⁽¹⁾ によって提唱され、現在も水処理の分野において広く用いられている G 値に換算して実験結果を整理した。

G 値は次式で定義される。

$$G = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu}} \quad (1)$$

ここで

ε_0 : 媒体の単位体積、単位時間あたりのエネルギー消費量

μ : 媒体の粘性係数

さらに、平板型の攪拌翼をもつジャーテスターのような場合、 ε_0 は次式によって求められることを Camp は示している。

$$\varepsilon_0 = \frac{ArC_D \{2\pi r(1-k)S\}^3}{2V_0} \quad (2)$$

ここで

- A : 攪拌翼の進行方向に直角な投影面積
- τ : 媒体の単位体積重量
- r : 攪拌翼重心と回転軸間の距離
- S : 攪拌翼の回転数
- kS : 媒体の主体部分の回転数
- C_D : 攪拌翼の抗力係数

式-1と式-2を使えば、攪拌翼の回転数からG値を計算することができる。ただし、 kS は発泡スチロール製の浮きを浮べてその回転数を測定することにより求めた。このようにして計算されたG値は、攪拌翼の回転数が60 rpm, 80 rpm, 110 rpm, 150 rpmのときにそれぞれ 11.6 sec^{-1} , 17.9 sec^{-1} , 28.8 sec^{-1} , 45.9 sec^{-1} となる。

実際の海域における攪拌強度は必ずしも明らかではないが、ここでは、浄水場におけるG値が $20 \sim 70 \text{ sec}^{-1}$ 程度⁴⁾であるので、これを参考としてその低い方を中心として攪拌強度のG値を $11.6 \sim 45.9 \text{ sec}^{-1}$ に設定した。

3. 実験結果および考察

3.1 フロックの粒径加積曲線と中位径

(1) 粒径加積曲線

形成されたフロックの粒径は均一でなく、ある範囲に分布している。このような分布の状態を表示するためには粒径加積曲線が一般に用いられる。図-2は、粒径が大きい場合と小さい場合について粒度分布を体積基準の粒径加積曲線で示した例であり、横軸は粒径 d 、縦軸は粒径がこれより小さいフロックの体積の全体積に対する割合(ふるい下) U である。ここからは、粒径加積曲線が時間の経過にともなって変化するようすを知ることができる。

(2) 中位径

このようにフロックの粒度は分布をもっている(粒度分布がどのような関数で表示されるかについては、3.3節で述べる)が、実際的には、これをその粒度分布を代表する1つの粒径で表すと取り扱いに便利である。一般に代表径としては、モード径(対象とする粒子群の中に最も多く含まれている粒径)、中位径(粒径加積曲線の50%に相当する粒径であり、この径より大きい粒子の量と小さい粒子の量は等しい)等が用いられている。ここでは代表径として、体積基準の中位径を用いることにする。

図-2で $U=50\%$ に相当する d が中位径である。このようにして求めた中位径の時間的変化を示したものが図-3,4である。図-3は、攪拌強度を一定にしたときの

中位径 D の時間的変化が濁質濃度 C_t によって異なることを濁質濃度 $C_t = 50 \sim 500 \text{ mg/l}$ の場合について示したものである。

図-3,4からは次のことを読み取ることができる。第1は、フロックの中位径 D は、実験の範囲内においては、どのケースもほぼ攪拌開始後200 minまでにもうこれ以上成長しない最大成長中位径に達していることである。第2は、最大成長中位径は濁質濃度 C_t と攪拌強度 G に関係し、いずれもそれが大きくなると、最大成長中位径は小さくなることである。中位径の時間的変化については、3.4節で検討することとし、次節では、最大成長中位径と濁質濃度、攪拌強度の関係について検討する。

3.2 最大成長中位径と濁質濃度、攪拌強度

フロックの最大成長中位径は、フロックの密度とともに十分成長したフロックの沈降速度を決定する要素であり、工学的にも重要な問題である。本節では、濁質濃度、攪拌強度との関係について検討するが、厳密に言えば、濁質濃度 C_t 、攪拌強度 G は、それぞれ独立して最大成長中位径 D_{\max} に寄与しているのではない。つまり、

$$D_{\max} = K f(C_t) \cdot g(G) \quad (3)$$

ここで

$f(C_t)$: C_t のみを含む関数

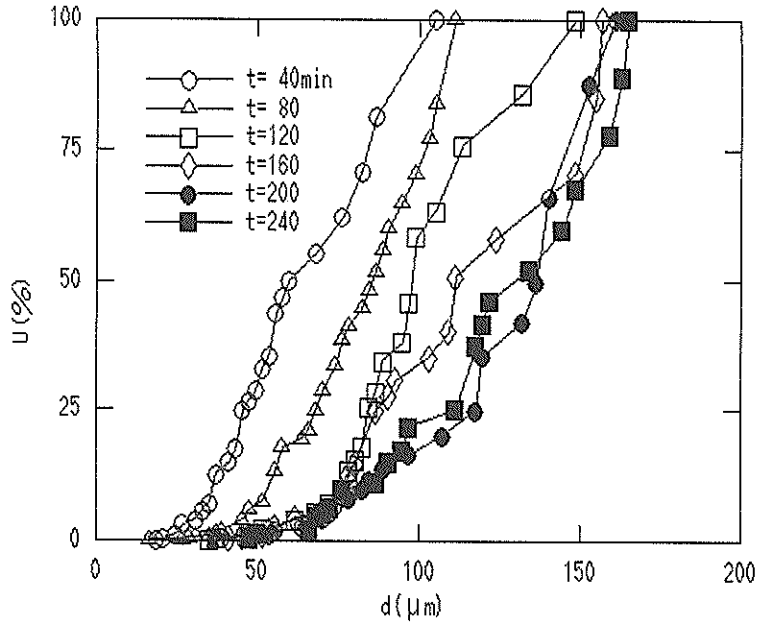
$g(G)$: G のみを含む関数

K : 定数

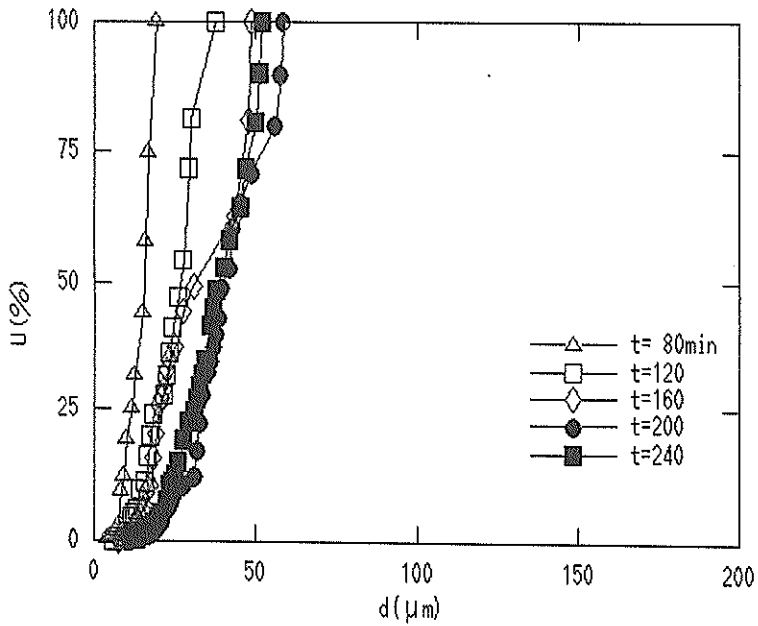
と表すことはできないであろう。このことは、図-5,6における直線がすべて平行でないことから推察される。しかし、ここではその傾向の概略をつかむことを目的として、濁質濃度と攪拌強度との関係について個別に論ずることとする。

(1) 濁質濃度との関係

図-5は、濁質濃度 C_t と最大成長中位径 D_{\max} の関係を示したものであり、図中の直線は、実験値から最小二乗法により求めたものである。ここから、濁質濃度が高くなると、最大成長中位径が小さくなることがわかる。詳しく見ると、攪拌強度 $G = 17.9 \sim 45.9 \text{ sec}^{-1}$ の場合には、直線の傾きはいずれもほとんど等しく平行であり、この攪拌強度の範囲では、攪拌強度の影響は独立に寄与していることをうかがわせ、最大成長中位径は、ほぼ濁質濃度の-0.5乗に比例していることがわかる。一方、攪拌強度 $G = 11.6 \text{ sec}^{-1}$ の場合には、最大成長中位径は、ほぼ濁質濃度の-0.3乗に比例し、攪拌強度 $G = 17.9 \sim 45.9 \text{ sec}^{-1}$ の場合と異なる傾向を示し

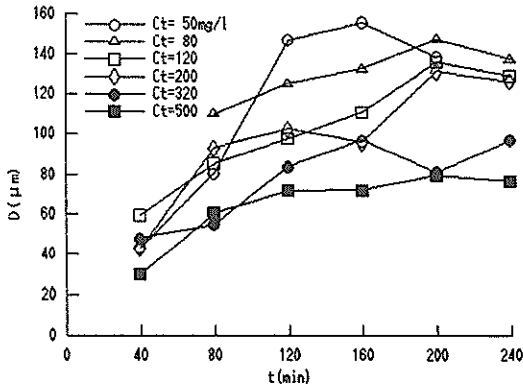


(1) $C_i = 120 \text{ mg/l}$, $G = 11.6 \text{ sec}^{-1}$

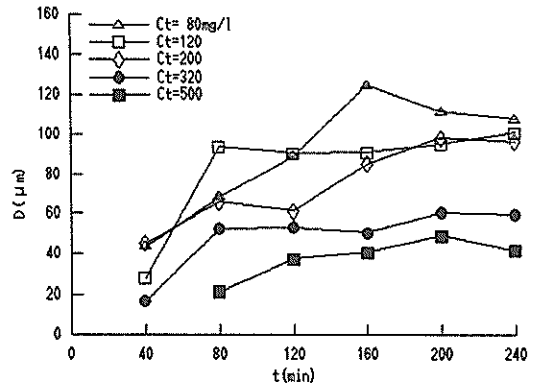


(2) $C_i = 320 \text{ mg/l}$, $G = 45.9 \text{ sec}^{-1}$

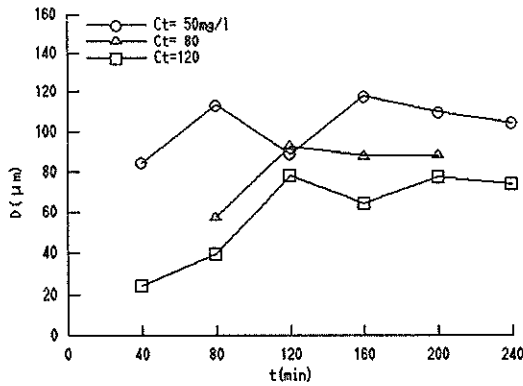
図-2 フロックの粒径加積曲線



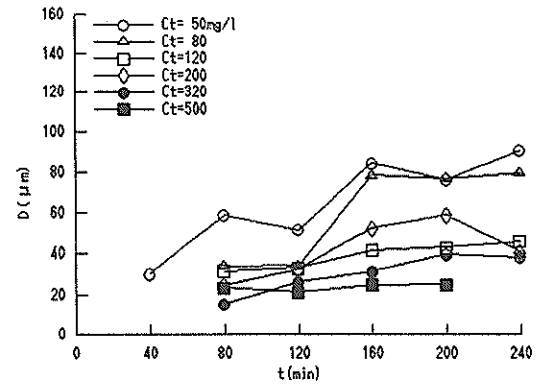
(1) $G = 11.6 \text{ sec}^{-1}$



(2) $G = 17.9 \text{ sec}^{-1}$



(3) $G = 28.8 \text{ sec}^{-1}$



(4) $G = 45.9 \text{ sec}^{-1}$

図-3 中位径の時間的变化 (濁質濃度による違い)

ている。

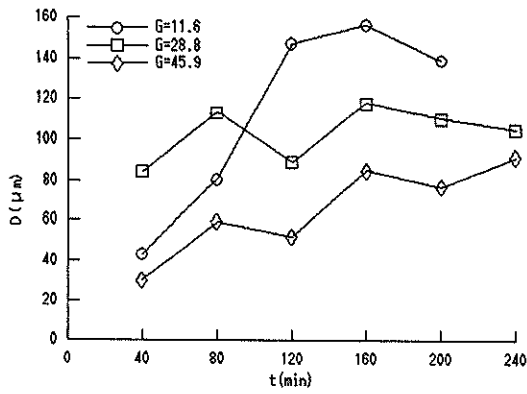
(2) 攪拌強度との関係

図-6は、攪拌強度 G と最大成長中位径 D_{max} の関係を示したものであり、図中の直線は、実験式として実験値から最小二乗法により求めたものである。ここから、攪拌強度が大きくなると、最大成長中位径が小さくなることわかる。ここには、図-5に見られるような明らかな平行関係は見られず、濁質濃度が高くなると、直線の勾配も大きくなっている。これは、図-5において攪拌強度 $G = 11.6 \text{ sec}^{-1}$ の場合だけ他の場合と異なる直線の勾配をしていることの反映である。このように、攪拌強度と最大成長中位径の関係は一様でないが、濁質濃度 $C_t = 50 \sim 500 \text{ mg/l}$ に対応して最大成長中位径は、ほぼ攪拌強度の -0.4 乗 ~ -0.8 乗に比例していることがわかる。

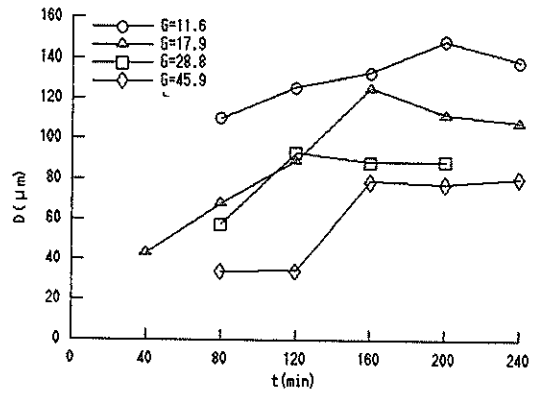
3.3 フロックの粒度分布

前述のようにフロックの粒度は分布をもっているので、中位径のような代表径だけでは、その工学的性質を完全に説明することはできない。後述するようなフロックの密度から沈降速度分布を求めるためには、フロックの粒度分布を知らなければならない。また、濁度計測や海洋環境保全という観点から重要である海中における光の吸収作用の基礎となる濁水中における光の透過・散乱現象の解明についても粒度分布に関する知識が不可欠である。

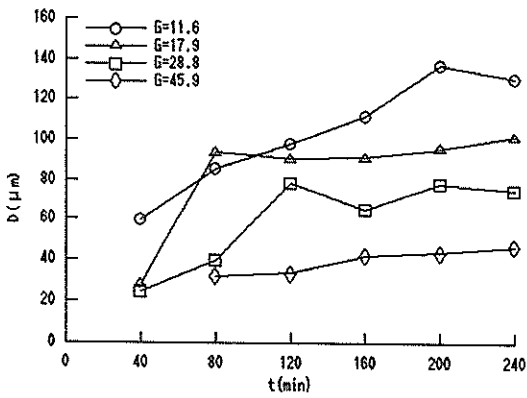
粒度分布について理論的検討を行う場合を別とすれば、これらの粒度分布を比較的簡単な分布関数で表現できれば便利である。このような分布関数として一般に用いられているものとしては、正規分布、その修正されたものである対数正規分布および以下で検討を行うロジック・ラ



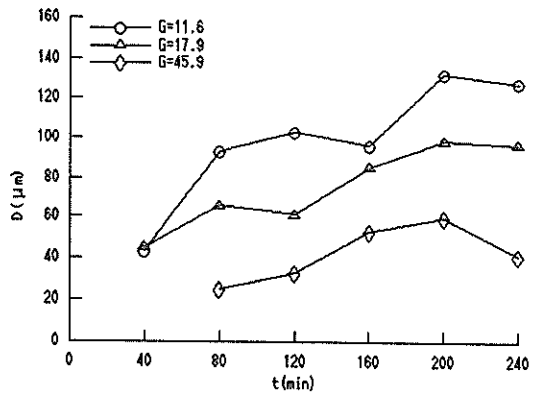
(1) $C_i = 50 \text{ mg/l}$



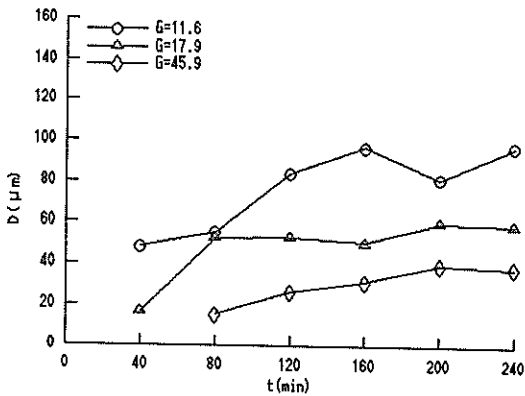
(2) $C_i = 80 \text{ mg/l}$



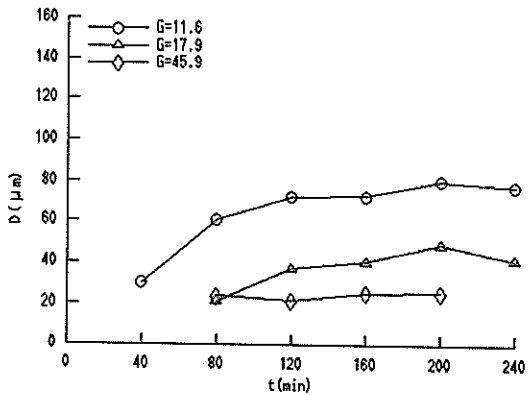
(3) $C_i = 120 \text{ mg/l}$



(4) $C_i = 200 \text{ mg/l}$



(5) $C_i = 320 \text{ mg/l}$



(6) $C_i = 500 \text{ mg/l}$

図-4 中位径の時間的变化 (攪拌強度による違い)

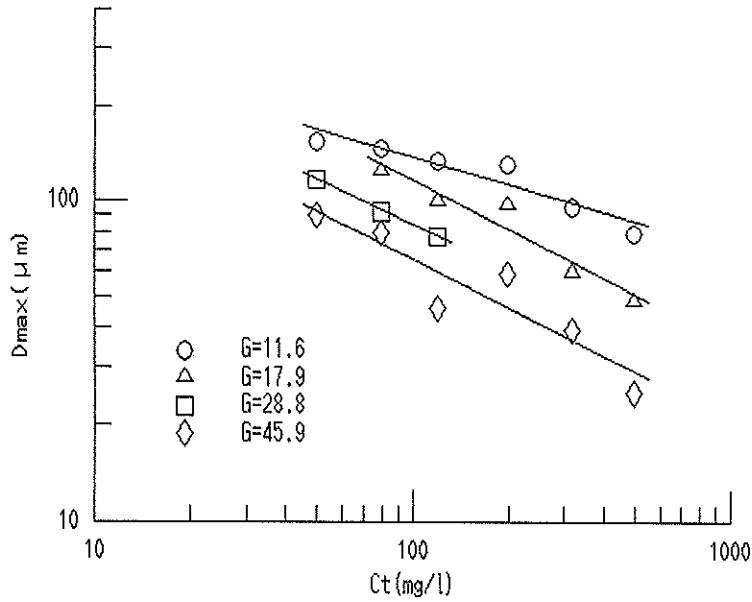


図-5 濁質濃度と最大成長中位径の関係

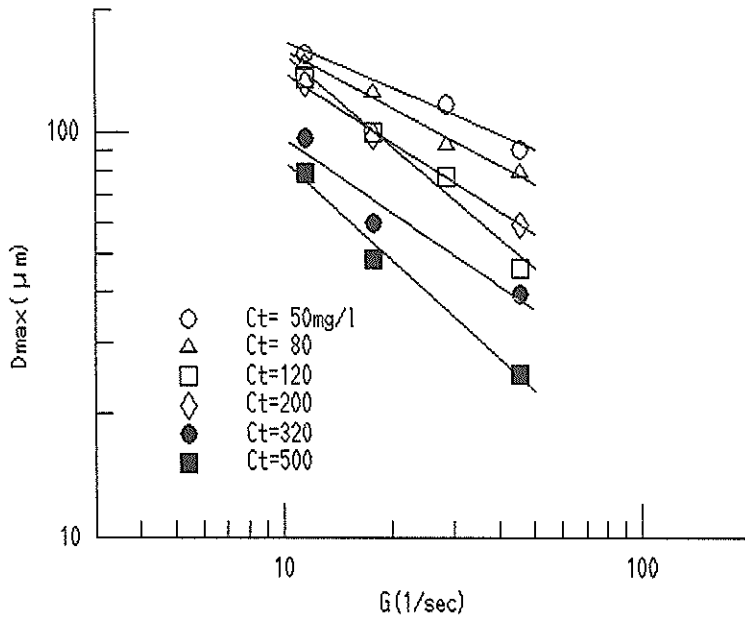


図-6 攪拌強度と最大成長中位径の関係

ムラー分布等がある。もとより、ある粒度分布が理論的にこれらの分布関数で表現されるということはほとんどなく、要は、いかにその分布関数が実際の粒度分布を記述し得るかということである。ここでは、塩水中で形成

されたフロックの粒度分布をロジン・ラムラー分布で表示することを試み、その妥当性等について検討する。

(1) ロジン・ラムラー分布

ロジン・ラムラー分布は、石炭の粉砕物についてロジ

ンとラムラーによって見いだされたものである。現在では、各種の微細土粒子、フライアッシュ、エアロゾル等についての粒度分布式として工業的に広く用いられていて、JIS*にも採用されている。この分布は、一般に次式で表される。

$$R = 100 e^{-b d^n} \quad (4.1)$$

または

$$R = 100 \times 10^{-b' d^n} \quad (4.2)$$

ここで、 R は粒径が d より大きい粒子の質量または体積の全質量または全体積に対する割合（ふるい上）である。また、係数 b または b' および指数 n は、実験的に定まる正の定数であり、 $b' = 0.434 b$ である。

前述の中位径は、 $U = 50\%$ つまり $R = 50\%$ のときの粒径 d であるから、このとき式-4.1は、次のようになる。

$$50 = 100 e^{-b D^n}$$

すなわち

$$0.5 = e^{-b D^n}$$

両辺の自然対数をとると

$$\ln 0.5 = -b D^n$$

となり、中位径 D は次式で表される。

$$D = \left(\frac{\ln 2}{b} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

ここから、係数 b または b' の大きい分布ほど、その粒子群の大きさが細かくなることがわかる。また、指数 n は分布指数とよばれ、その値は一般に0.5～2の範囲にあり、 n の値の大きい分布ほど、粒度分布の巾が狭く、粒子の大きさが比較的そろっていることを意味している。

次にある粒度分布がロジン・ラムラー分布にしたがっているかどうかは、次のようにして判定することができる。まず、式4.2の両辺の常用対数をとると

$$\log \left(\frac{100}{R} \right) = b' d^n$$

もう一度、両辺の常用対数をとると

$$\log \left\{ \log \left(\frac{100}{R} \right) \right\} = \log b' + n \log d \quad (6)$$

となる。これは、横軸に $\log d$ 、縦軸に $\log \{ \log (100 /$

$R) \}$ （このように座標軸をとったものをロジン・ラムラー線図という）をとったときの直線の方程式にはかならず、係数 b' は直線のY切片から、分布指数 n は直線の勾配として求められる。なお、ここでは式-4.2の常用対数をとったが、これはこの方が実用上やや便利のためであって、式-4.1の自然対数をとっても全く同じことである。結局、ある粒度分布がロジン・ラムラー分布にしたがうか否かは、座標軸をこのようにとった場合に、その粒度分布を直線で表すことができるか否かに帰する。

(2) ロジン・ラムラー分布による表示

塩水中で形成された微細土粒子のフロックの粒度分布がロジン・ラムラー分布にしたがうか否かを判断するために、横軸に $\log d$ 、縦軸に $\log \{ \log (100 / R) \}$ をとって、フロックが十分成長した攪拌開始後200 minにおける粒度分布を示したものが図-7である。これらは、それぞれ攪拌強度 $G = 11.6 \sim 45.9 \text{ sec}^{-1}$ の場合を示したものであり、直線は実験値から最小二乗法により求めたものである。図-7から、粒度分布はほぼ直線で近似でき、したがって十分成長したフロックの粒度分布は、この実験の範囲内においてはロジン・ラムラー分布で表示できるとして差し支えないことがわかる。

粒度分布を表示する直線は、攪拌強度、濁質濃度に係らずほぼ平行でその傾きはほぼ等しく、したがって分布指数 n は、4.22～5.30の範囲にあってほぼ等しいことがわかる。濁質濃度 C_t は、係数 b または b' のみに関係し、濁質濃度が高くなるにしたがって、粒度分布を表示する直線は、左側に平行移動し、 b または b' が大きくなっていることがわかる。

図-8は、濁質濃度 $C_t = 120 \text{ mg/l}$ の場合におけるものであり、ここからは攪拌強度 G が大きくなるにしたがって粒度分布を表示する直線は、左側に平行移動し、 b または b' が大きくなっていることがわかる。

図-9は、濁質濃度 $C_t = 120 \text{ mg/l}$ 、攪拌強度 $G = 28.8 \text{ sec}^{-1}$ における場合を例にとって、実験値とこれをロジン・ラムラー分布によって表示した分布曲線を一般の粒径加積曲線の形で示したものである。この場合の分布式は、

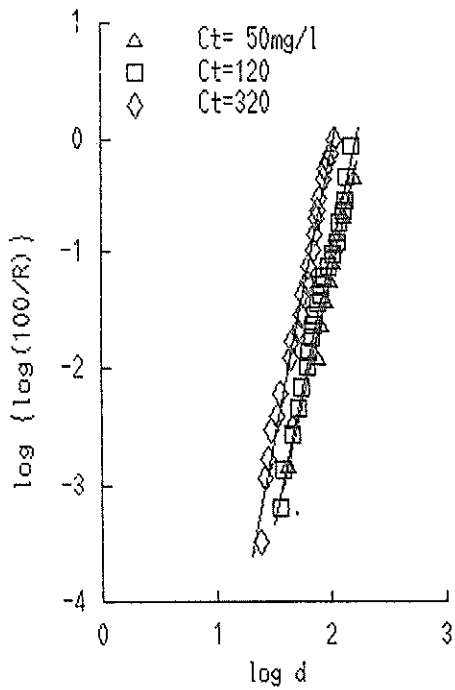
$$R = 100 e^{-8.56 \times 10^{-11} \cdot d^{5.30}} \quad (7.1)$$

または

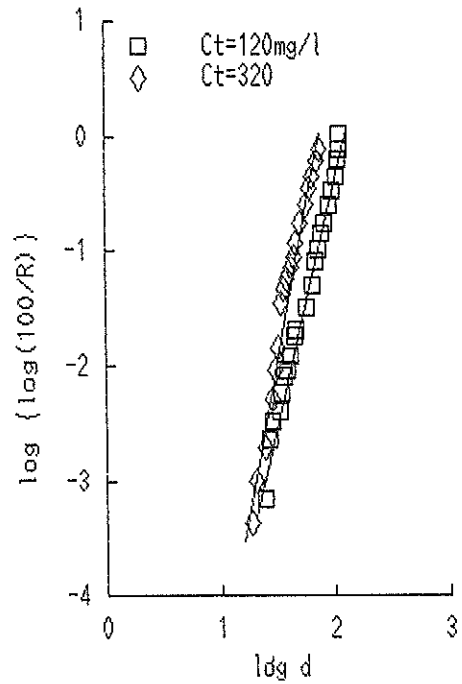
$$R = 100 \times 10^{-3.72 \times 10^{-11} \cdot d^{5.30}} \quad (7.2)$$

となり、ロジン・ラムラー線図上では直線となるが、図-9では $U = 0$ および100%に漸近する曲線で表され、

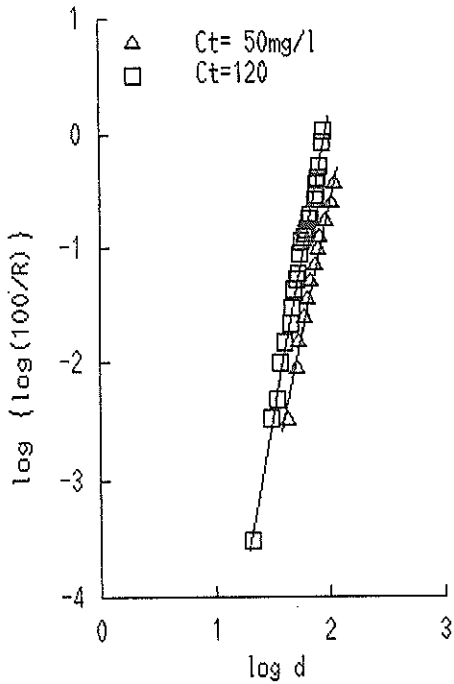
* JIS Z 8901 試験用ダスト



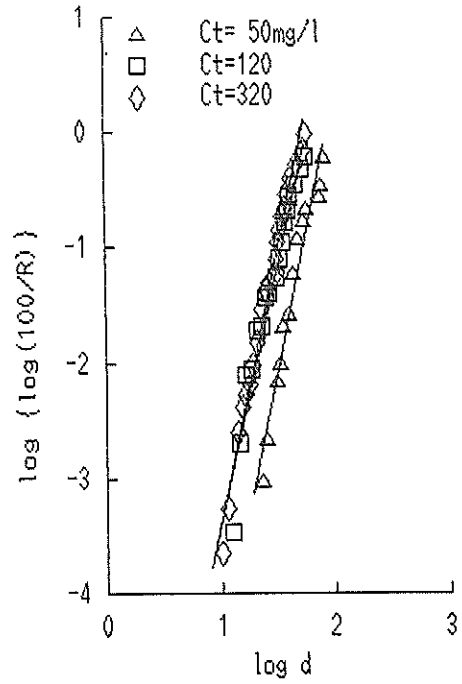
(1) $G = 11.6 \text{ sec}^{-1}$



(2) $G = 17.9 \text{ sec}^{-1}$



(3) $G = 28.8 \text{ sec}^{-1}$



(4) $G = 45.9 \text{ sec}^{-1}$

図-7 フロックの粒度分布 (濁質濃度による違い)

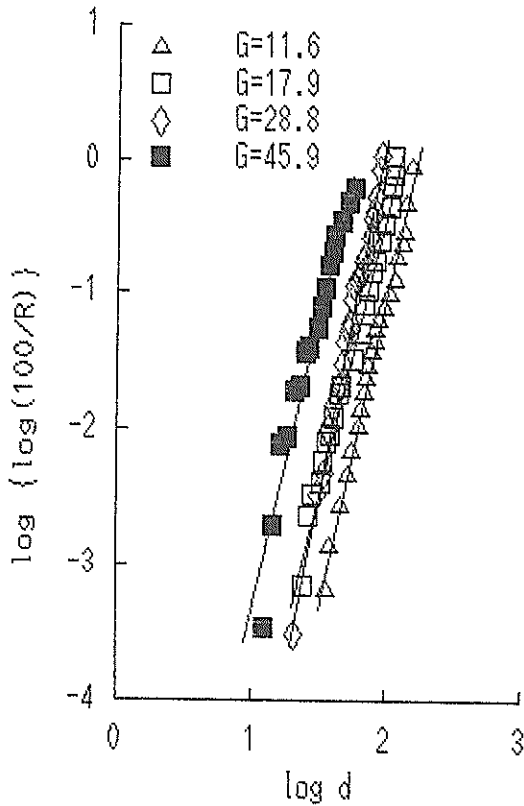


図-8 フロクの粒度分布 (攪拌強度による違い, $C_i = 120 \text{ mg/l}$)

実験値とかなりよく一致していることがわかる。

3.4 フロクの形成過程に関する実験式

フロクは、最大成長径に達するまでその成長が続けるが、その過程を時間の関数として記述できれば、實際上、役立つことが多い。この問題については、コロモゴロフの局所等方性乱流理論から導かれたフロクの衝突関数を基礎とした理論的研究⁹⁾もあるが、フロク形成過程の複雑さのためもあって必ずしも十分なものといえず、理論のみでこの問題を取り扱うのは、困難であると考えられる。このため、ここではより実際的な方法として、フロクの粒径を時間の関数として記述した実験式を求めることにする。

(1) 中位径に関する実験式

フロクの粒径は、図-3,4に示されたように時間の関数であるが、ここから直接、実験式を求めることは容易でない。そこで、実験の範囲内では、ほぼ攪拌開始後200 minで等しく最大成長中位径に達していることに着眼して、中位径 D を最大成長中位径 D_{\max} によって無次元化した D/D_{\max} と攪拌開始後の時間 t の関係を調べることにする。図-10は、攪拌強度 $G = 11.6 \text{ sec}^{-1}$ における D/D_{\max} と t の関係を示したものであり、 D/D_{\max} が濁質濃度 C_i に係らず時間 t のみの関数となり、 $D/D_{\max} = f(t)$ と表示できることを示している。次に、この $f(t)$ を実験値から求めなければならないが、この場合、 $t = \infty$ で当然 $D/D_{\max} = 1$ となることから f

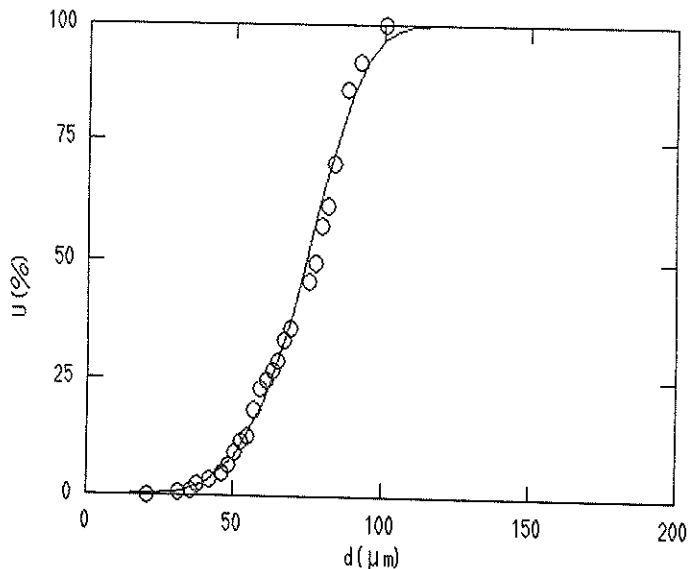


図-9 フロクの粒径加積曲線 (実験値とロジック・ラムラー分布による表示)

(t) の関数形を

$$f(t) = 1 - e^{-\alpha t} \quad (8)$$

と仮定し、 α を実験値から求めることにする。最小二乗法によって求めた α はこの場合、0.0142 となり、図中の実線は、このようにして求めた実験式を表している。

同様にして攪拌強度 $G = 17.9, 28.8, 45.9 \text{ sec}^{-1}$ の場合についても α を求めるとそれぞれ 0.0128, 0.0148, 0.0134 となる。図-11 は、攪拌強度 $G = 11.6 \text{ sec}^{-1}$ の場合を含めて、それぞれの攪拌強度に対してこのようにして求められた実験式を示している。ここから、 $f(t)$ つまり α の値は、攪拌強度に係らずほぼ同じになり、結局、 $f(t)$ は t のみの関数、つまり α は攪拌強度に無関係な定数とすることができることがわかる。そこで、全ての実験値から α を求めると $\alpha = 0.0137$ となり、次の実験式を得ることができる。

$$D = D_{\max} (1 - e^{-0.0137 t}) \quad (9)$$

なお、中位径の時間的変化を最大成長中位径と時間のみの関数の積として表すことができるというこの結論は、あくまでも実験の範囲内についてのみ妥当性を確かめたものである。

(2) フロックの成長速度

フロックの中位径を時間の関数として記述した実験式

である式-9 を攪拌開始後の時間 t で微分すれば、

$$\frac{dD}{dt} = 0.0137 D_{\max} e^{-0.0137 t} \quad (10)$$

となり、フロックの中位径の成長速度 dD/dt に関する実験式を得ることができる。

また、攪拌開始後の時間 $t = \tau$ におけるフロックの成長速度は、次式を用いて実験により求められた中位径 D から直接、求めることができる。

$$\left(\frac{dD}{dt}\right)_{t=\tau} = \frac{D_{t=\tau+\frac{1}{2}\Delta t} - D_{t=\tau-\frac{1}{2}\Delta t}}{\Delta t} \quad (11)$$

実験によって 40 min 間隔で中位径 D が得られているので、 $\Delta t = 40 \text{ min}$ として $t = 60, 100, 140, 180 \text{ min}$ におけるフロックの成長速度 dD/dt を実験より得られた中位径 D の値を用いて計算したうえで、最大成長中位径 D_{\max} により無次元した値のすべてのケースについての平均値を図-12 に○で示す。また、図中の実線は、式-10 で示される実験式を最大成長中位径 D_{\max} で無次元したものである。これらの両者は導出過程は異なるが、もともと同一の実験値から求められたものであるため本来、一致すべきものである。しかし、攪拌開始後の時間 $t = 60 \text{ min}$ および 140 min において幾分の差異が見られる。この違いは、実験式を求める過程において、かな

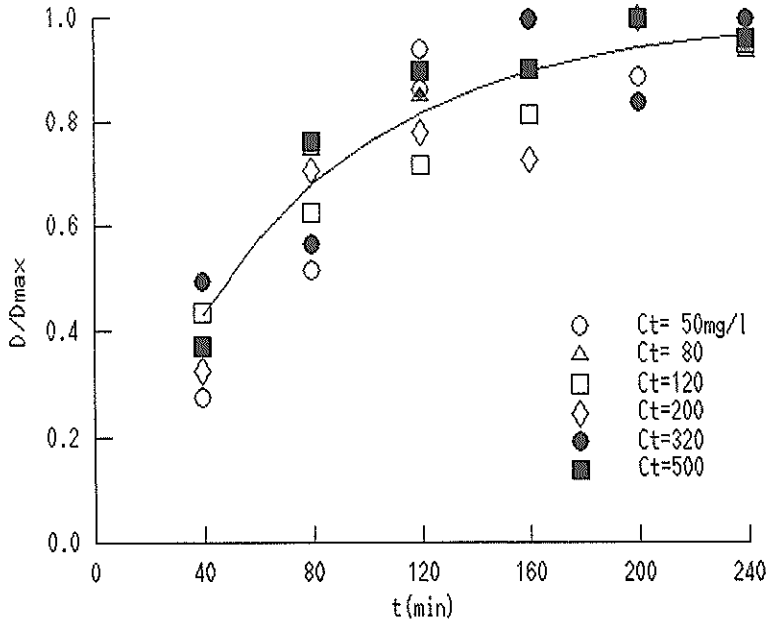


図-10 無次元化した中位径の時間的変化 ($G = 11.6 \text{ sec}^{-1}$)

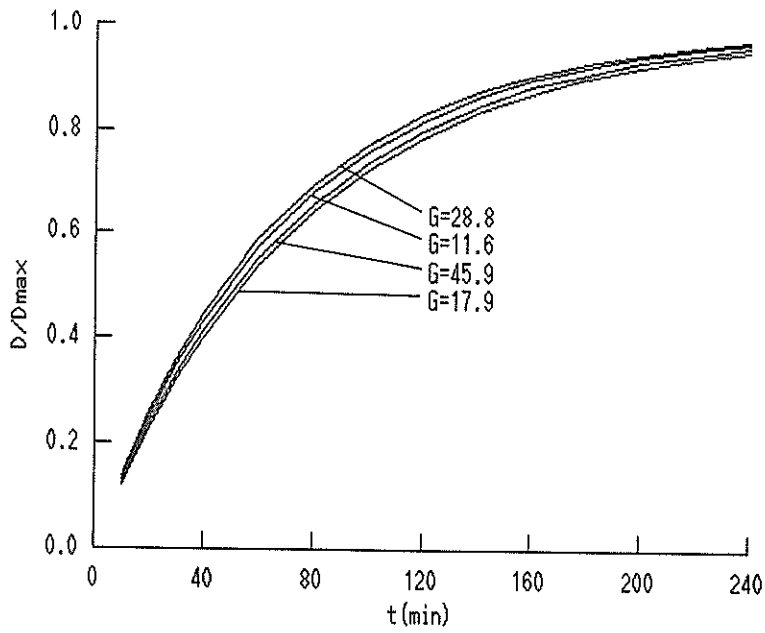


図-11 無次元化した中位径の時間的変化についての実験式

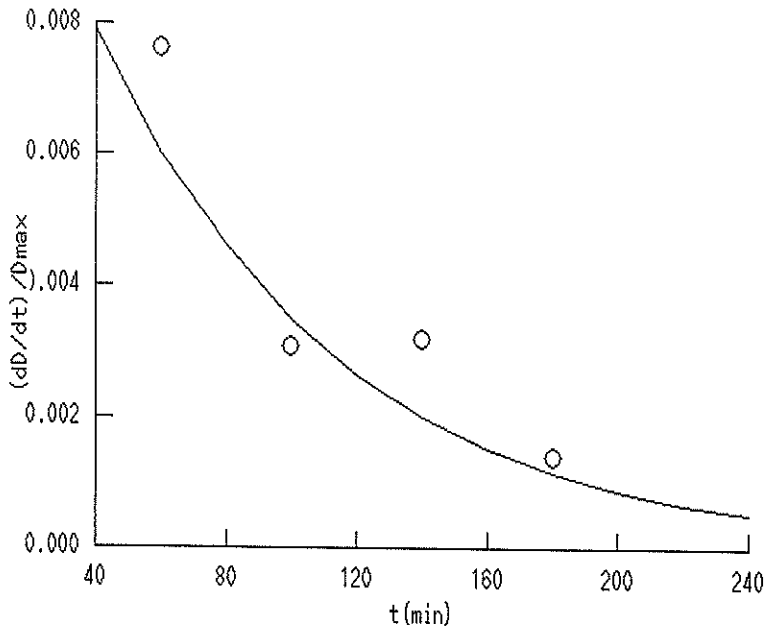


図-12 無次元化した成長速度の時間的変化

りの平滑化が行われているのに反して、式-11を用いてフロクの成長速度を求める過程においては、中位径の値についてのばらつきがそのまま計算結果のばらつきとなっているためである。

3.5 フロクの密度と沈降速度

フロクの強さや沈降速度を考えるうえで、フロクの密度は重要な要素である。フロクのせん断強度は、一般にフロクの相対密度に関係していると考えられているし、沈降速度はストークスの法則にしたがうことがよく知られている。そこでここでは、十分成長したフロクの密度をフロクの体積と濁質濃度から求めることにする。また、このようにして求められたフロクの密度と前節までに述べたフロクの粒径をストークスの法則に適用して求めることができるフロクの沈降速度についても検討する。

(1) フロクの密度

フロクの性質、ことに沈降速度を考える場合、重要なのはフロクそのものの密度 ρ_f でなく、媒体（塩水）の密度 ρ との差として定義される相対密度 $\rho_f - \rho$ である。体積 B のフロクに含まれている密度 ρ_s の土粒子が占める体積を B_s とすると、このフロクの密度 ρ_f は、

$$\rho_f = \frac{\rho_s B_s + \rho (B - B_s)}{B} \quad (12)$$

と表され、相対密度 $\rho_f - \rho$ は結局、次式で示される。

$$\rho_f - \rho = \frac{B_s}{B} (\rho_s - \rho) \quad (13)$$

フロクに含まれている土粒子の質量を M とすると、土粒子が占めている体積 $B_s = M / \rho_s$ であるので、この関係を式-13に代入すると次式が得られる。

$$\rho_f - \rho = \frac{M}{B} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) \quad (14)$$

式-14の M を媒体の単位体積中のフロクに含まれている土粒子の全質量 ΣM 、 B をフロクの全体積 ΣB に置き換えると、フロクの平均相対密度 $(\rho_f - \rho)_m$ についての次式が得られる。

$$(\rho_f - \rho)_m = \frac{\Sigma M}{\Sigma B} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) \quad (15)$$

式-15において、媒体の単位体積中の土粒子の全質量 ΣM は、濁質濃度から容易に求めることができる。媒体の単位体積中のフロクの全体積 ΣB は、媒体の単位体積中のフロクの数 N とフロクの個数基準平均体積

B_m の積として求めることができるので、結局、式-15は、下式のようになる。

$$(\rho_f - \rho)_m = \frac{\Sigma M}{N \cdot B_m} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) \quad (16)$$

フロクは、必ずしも球型にならないので、その体積の求め方が問題であるが、十分成長したフロクについて見ると、その長径 d と短径 d_s (フロクの輪郭に接し、長径を決する平行線に直角方向の二つの平行線間の距離)の間には一定の関係がある。図-13は、この関係を攪拌開始後の時間 $t = 240$ min におけるフロクについて示したものの一例である。これから、 $d_s = 0.69d$ とできることがわかる。さらに、すべてのフロクを長径を回転軸とする相似な回転楕円体とすると、その体積 B は、

$$B = \frac{4}{3} \pi d \cdot d_s^2 \quad (17)$$

であるので、 $d_s = 0.69d$ とすれば、結局、 $0.249d^3$ となり、この関係を用いて長径 d の測定値からフロクの個数基準平均体積を求めた。

図-14は、十分成長したフロク ($t = 240$ min) について、攪拌強度 $G = 17.9, 45.9 \text{ sec}^{-1}$ の場合における濁質濃度 C_t と媒体の単位体積中のフロクの数 N の関係を示したものである。ここから、単位体積中のフロクの数、いずれの場合においても濁質濃度の増加とともに増加し、ほぼ濁質濃度の1.7乗に比例していることがわかる。また、攪拌強度の増加に対しても単位体積中のフロク数は増加するが、その割合は濁質濃度に係わらずほぼ一定で、攪拌強度 G が 17.9 sec^{-1} から 45.9 sec^{-1} に増加した場合、ほぼ6倍になっていることがわかる。

次に、十分成長したフロクのつまりフロクの最終的な平均相対密度は、前述の単位体積中のフロクの数と十分成長したフロクについて求められた個数基準平均体積を用いて、式-16から求められる。ただし、 $\rho_s = 2.6 \text{ mg/mm}^3$ とした。これを示したものが図-15である。ここから、フロクの平均相対密度 $(\rho_f - \rho)_m$ は、濁質濃度 C_t の増加にもなって急激に増加していることがわかる。また、攪拌強度 G の増加に対してもフロクの平均相対密度は増加するが、その割合は、単位体積中のフロクの数と同様に濁質濃度に係わらずほぼ一定で、攪拌強度 G が 17.9 sec^{-1} から 45.9 sec^{-1} に増加した場合、ほぼ1.5倍前後になっていることがわかる。平均相対密度の値そのものについて見ると、濁質濃度 $C_t = 80 \text{ mg/l}$ 、攪拌強度 $G = 17.9 \text{ sec}^{-1}$ の場合に $1.36 \times 10^{-2} \text{ mg/mm}^3$ 、 $C_t = 500 \text{ mg/l}$ 、 $G = 45.9 \text{ sec}^{-1}$ の場合に

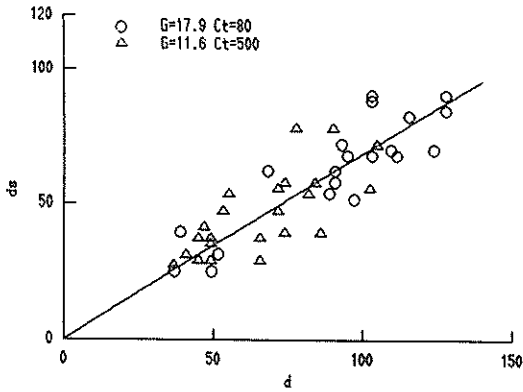


図-13 フロクの長径と短径の関係

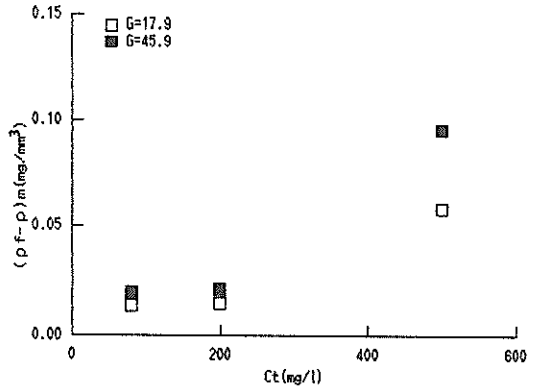


図-15 濁質濃度とフロクの平均相対密度の関係

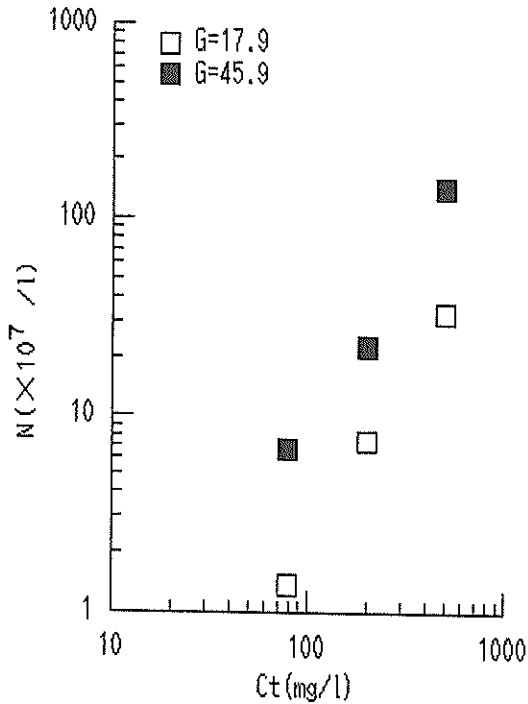


図-14 濁質濃度と単位体積中のフロクの数の関係

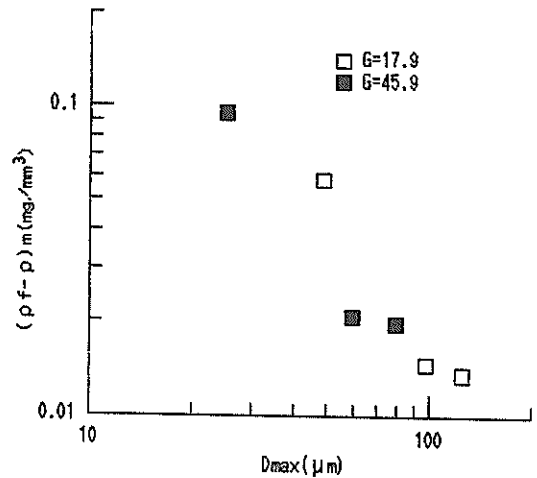


図-16 フロクの最大成長中位径と平均相対密度の関係

$9.58 \times 10^{-2} \text{ mg/mm}^3$ となりいずれの場合においても、フロクの内部が完全に土粒子で満たされている場合には、その相対密度は 1.6 mg/mm^3 となることを考えあわせると、塩水中で形成されたフロクの内部には、大量の水が取り込まれていることがわかる。

濁質濃度が本報におけるよりも低濃度の場合に塩水中で形成されたベントナイトのフロクについて楠田ら¹⁾は、その相対密度は濁質濃度にほとんど関係せず、粒径

の-1乗に比例することを示している。また、海水中で形成されたカオリナイトのフロクについて川名ら²⁾は、その相対密度は粒径の-0.82乗に比例することを示している。これらの値は、ある条件下で形成された個々のフロクについて、その粒径と沈降速度を同時に測定し、ストークスの法則からフロクの相対密度を求めたものである。ここでは、フロクの粒径と相対密度の関係を十分成長したフロク最大成長中位径 D_{max} と平均相対

密度 $(\rho_f - \rho)_m$ の関係として検討する。

図-16は、この関係を示したものである。ここから、フロックの最大成長中位径と平均相対密度の間には、濁質濃度、攪拌強度の違いにほとんど影響されない一定の関係があることがわかる。ここから、フロックの平均相対密度は、最大成長中位径のほぼ1.3乗に比例し、最大成長中位径の増加にともなって平均相対密度は減少していることがわかる。この1.3という指数は、先に述べた楠田らの示した指数の値より幾分か小さい。

ところで、塩水中で形成されたフロックの粒度分布の範囲は、かなり狭い（ロジン・ラムラー分布で表したとき、分布指数はほぼ4~5であった）ので、その粒径がフロック群の中位径に等しいフロック（仮に「中位フロック」と名付ける）の相対密度は、平均相対密度とほぼ等しいとして差し支えないと考えられる。このように考えると、図-16は、十分成長した中位フロックの粒径と相対密度の関係と理解することができる。さらに、異なる条件下で形成された中位フロックについてこのような関係が成り立てば、この関係を中位フロック以外のフロックに拡張して、十分成長したフロックの相対密度は、濁質濃度や攪拌強度にほとんど関係せず、その粒径のみによって決定されると考えることができるであろう。

(2) フロックの沈降速度

フロックの沈降速度は、拡散係数とともに海域において塩分の働きと海水中の乱流変動エネルギーによって形成されたフロックの拡散現象を支配する要素である。ここでは、十分成長したフロックの沈降速度をここまで求められたフロックの相対密度と粒度分布式から求めることにする。

粒子の直径 d_a を代表径にとったレイノルズ数が0.1より小さく、その密度が ρ_a である球型の粒子の沈降速度 v_a は、ストークスの法則にしたがい、次式で表されることが知られている。

$$v_a = \frac{(\rho_a - \rho) g d_a^2}{18 \mu} \quad (18)$$

フロックは、前述のとおり球型をしていないので、このような非球型の粒子の沈降速度として式-18をそのまま適用することはできず、何らかの補正が必要となる。この補正方法としては種々のものが発表されているが、ここでは、次に示す Durand の方法による。Durand によれば、非球型の粒子の最大寸法を l 、それと同体積の球の直径を d_{b0} 、その沈降速度を v_{b0} とすると、非球型の粒子の沈降速度 v_b は、次式で表される。

$$\frac{v_b}{v_{b0}} = \frac{d_{b0}}{l} \quad (19)$$

さらに、式-18と式-19から非球型の粒子の沈降速度 v_b は、次式で表される。

$$v_b = \frac{d_{b0}}{l} \left\{ \frac{(\rho_b - \rho) g d_{b0}^2}{18 \mu} \right\} \quad (20)$$

ここで、沈降速度を求めようとするフロックの場合、前述のように $d_s = 0.69 d$ とすると、同体積の球の直径は $0.781 d$ となり、 $l = d$ であるので、式-20からフロックの沈降速度 v は、次式で表すことができる。

$$v = \frac{0.476 (\rho_f - \rho) g d^2}{18 \mu} \quad (21)$$

フロックの粒度分布を粒径の関数として表すことができれば、これと式-21を組み合わせることにより、沈降速度分布を表すことができる。この粒度分布式として、3.3節に述べたロジン・ラムラー式を用いると、この沈降速度分布は次式で表される。

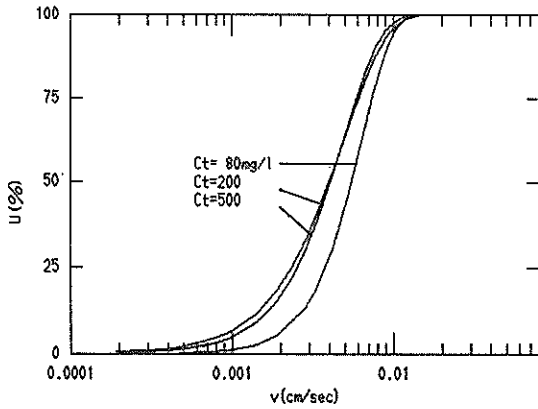
$$U = 100 \left\{ 1 - 10^{-b' \left\{ \frac{18 \mu v}{0.476 (\rho_f - \rho) g} \right\}^{\frac{n}{2}}} \right\} \quad (22)$$

ここで、 U は沈降速度が v より小さいフロックの全体積に対する割合である。先に求めたフロックの相対密度と粒度分布をロジン・ラムラー式で表示したときの係数 b' 、分布指数 n を用いて式-22からフロックの沈降速度分布を計算することができる。ここでは、相対密度 $(\rho_f - \rho)$ に関して2とおりの計算を行う。

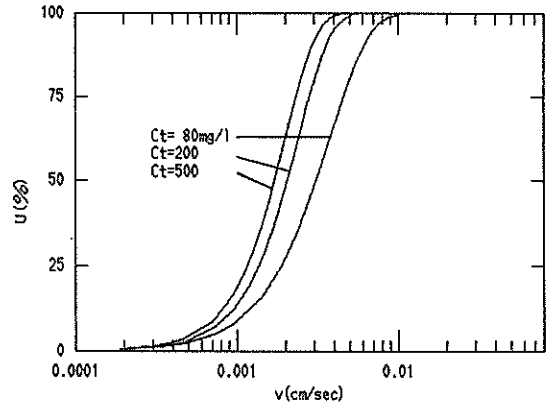
第1は、前述したようにフロックの粒度分布の範囲はかなり狭いので、ある条件下で形成されたフロックの相対密度はすべて一定でその平均値に等しい、したがって $(\rho_f - \rho) = (\rho_f - \rho)_m$ とした場合である。図-17は、それぞれ攪拌強度 $G = 17.9, 45.9 \text{ sec}^{-1}$ において、このようにして計算されたフロックの沈降速度分布を示している。

第2は、フロックの相対密度が粒径によって異なることを考慮し、フロックの相対密度 $(\rho_f - \rho)$ と粒径 d の間に、図-16に示したのと同様な関係が成り立つとした場合である。この関係を図-16から最小二乗法によって求めると、次式で表される。

$$(\rho_f - \rho) = 7.12 d^{-1.33} \quad (23)$$

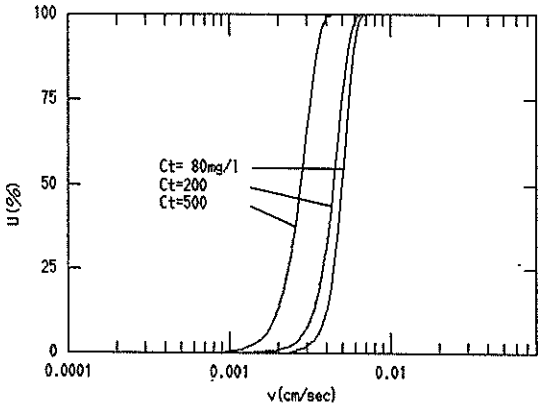


(1) $G = 17.9 \text{ sec}^{-1}$

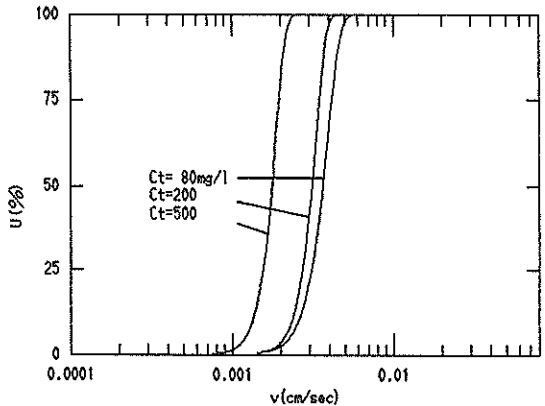


(2) $G = 45.9 \text{ sec}^{-1}$

図-17 フロックの沈降速度分布 ($\rho_f - \rho = (\rho_f - \rho)_m$)



(1) $G = 17.9 \text{ sec}^{-1}$



(2) $G = 45.9 \text{ sec}^{-1}$

図-18 フロックの沈降速度分布 ($\rho_f - \rho \propto d^{-1.33}$)

図-18は、それぞれ攪拌強度 $G = 17.9, 45.9 \text{ sec}^{-1}$ において、このようにして計算されたフロックの沈降速度分布を示している。ここから、いずれの場合においてもフロックの沈降速度は、ほぼ $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ cm/sec}$ の範囲に分布していることがわかる。

図-17と図-18を比較すると、フロックの相対密度が粒径の -1.33 乗に比例するとした場合は、相対密度が粒径にかかわらず一定であるとした場合に比べて、粒度分布の範囲が狭くなっていることがわかる。沈降速度分布の範囲を v_{95} ($U = 95\%$ となる v) / v_5 ($U = 5\%$ となる v) について見ると、図-17においては $5.561 \sim 11.63$ であるのに対して図-18においては $1.776 \sim 2.272$ となっている。

図-19は、濁質濃度 $C_t = 80 \text{ mg/l}$ 、攪拌強度 $G = 17.9 \text{ sec}^{-1}$ の場合について、フロックの相対密度を一定として求められた沈降速度分布 (実線1) および粒径の -1.33 乗に比例するとして求められた沈降速度分布 (実線2) を示していて、相対密度を粒径の -1.33 乗に比例するとした場合、粒度分布の範囲が狭くなるようすがよくわかる。

図-18ないし図-19の実線2に示した場合、粒度分布の範囲が狭くなるのは、 $(\rho_f - \rho) = (\rho_f - \rho)_m$ とした場合に比べて、 $U = 100\%$ 側の相対密度は、平均相対密度より小さくなり沈降速度曲線は左側に移動するのに対して、 $U = 0\%$ 側の相対密度は平均相対密度より大きくなり沈降速度曲線は右側に移動するためである。

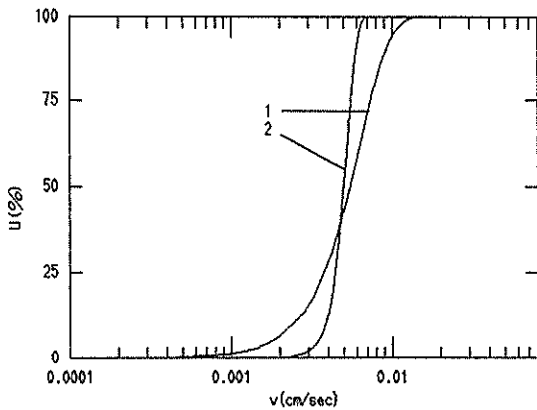


図-19 フロックの相対密度の違いによる沈降速度分布の違い

沈降速度の中位値 ($U=50\%$ の値) について見ると、フロックの相対密度を平均相対密度に等しいとした場合と粒径の -1.33 乗に比例するとした場合の間に大きな違いはない。前者の場合、攪拌強度 $G=17.9 \text{ sec}^{-1}$ 、濁質濃度 $C_t=80, 200, 500 \text{ mg/l}$ のときには、それぞれ $6.17 \times 10^{-3}, 4.09 \times 10^{-3}, 4.06 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ となっている。攪拌強度 $G=45.9 \text{ sec}^{-1}$ 、濁質濃度 $C_t=80, 200, 500 \text{ mg/l}$ のときには、それぞれ $3.65 \times 10^{-3}, 2.14 \times 10^{-3}, 1.78 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ となっている。ここから、濁質濃度、攪拌強度のいずれが増加しても沈降速度は小さくなることがわかる。

図-20は、フロックの最大成長中位径 D_{max} とその密度を平均相対密度に等しいとした場合の沈降速度の中位値 V の関係を示したものである。ここから、この場合の沈降速度の中位値は、最大成長中位径のほぼ 0.7 乗に比例していることがわかる。これは、フロックの平均相対密度が最大成長中位径のほぼ -1.3 乗に比例していることの当然の帰結である。なんととなれば、式-21より

$$V \propto (\rho_f - \rho)_m D_{max}^2 \quad (24)$$

であり、 $(\rho_f - \rho)_m \propto D_{max}^{-1.3}$ したがって、 $V \propto D_{max}^{-1.3+2}$ となるからである。このことから、図-16と図-20は、ストークスの法則を媒介として同じ内容を表したものであることがわかる。

また、相対密度について述べたのと同様に考えれば、十分成長したフロックの沈降速度は、濁質濃度や攪拌強度にほとんど関係せず、その粒径のみによって決定されると考えることができるであろう。

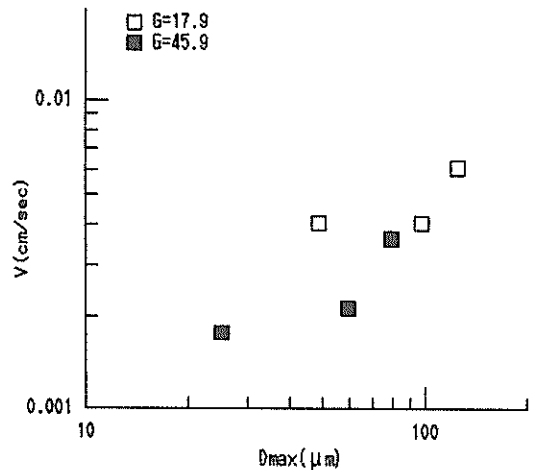


図-20 フロックの最大成長中位径と沈降速度の中位値の関係

4. 結 論

塩水中における微細土粒子フロックの形成について調べた。供試土にはベンナイトを用い、塩分濃度は一定とした。フロックの成長による粒径変化および単位体積中のフロックの数は、顕微鏡写真より測定した。この結果、以下の点が明らかになり、フロックの粒径と密度、沈降速度の関係については、濁質濃度が低い場合に対して他の研究者が示したものと傾向において大差がなかった。

- (1) フロックの最大成長中位径は、濁質濃度のほぼ $-0.3 \sim -0.5$ 乗に比例している。
- (2) フロックの最大成長中位径は、攪拌強度のほぼ $-0.4 \sim -0.8$ 乗に比例している。
- (3) 十分成長したフロックの粒度分布は、ロジン・ラムラー分布によって表示することができる。
- (4) フロックの中位径の時間的変化は、最大成長中位径によって無次元化することにより、時間のみ関数として整理できる。
- (5) フロックが十分成長した場合、単位体積中のその数は、濁質濃度のほぼ 1.7 乗に比例している。
- (6) 十分成長したフロックの平均相対密度は、最大成長中位径のほぼ -1.3 乗に比例している。
- (7) ストークスの法則から計算した十分成長したフロックの沈降速度は、ほぼ $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ cm/sec}$ の範囲に分布している。また、沈降速度の中位値は、最大成長中位径のほぼ 0.7 乗に比例している。

5. あとがき

塩水中における微細土粒子フロックの形成についての基礎的データが得られた意義は大きい。しかしながらこの結果、今後さらに検討すべき課題も少なくない。ここでは、次の2点を指摘しておく。

第1はフロックの形成についての理論的検討である。本報では、濁質濃度、攪拌強度そのいずれの増加に対しても、フロックの最大成長中位径は小さくなることさらに、フロックの平均相対密度は、濁質濃度や攪拌強度に関係せず、最大成長中位径のみによって決まり、それが増加すると平均相対密度は小さくなることを明らかにした。しかし、これらの結論を矛盾なく理論的に説明することは現状では難しく、新たな理論の展開が必要である。

第2は実際の問題への適用である。海域において微細土粒子がフロックを形成する場合、その形成に要するエネルギーは、海水中の乱流変動より供給される。すでに明らかにしたように、フロックの形成と攪拌強度つまり乱流変動との間には密接な関連がある。このため、海域におけるフロック形成について理論的に解明する場合、室内実験のデータをもとに解明する場合、そのいずれを問わず海水中の乱流変動の強さことにフロック形成に寄与するスケールの乱流変動の強さを明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 楠田哲也・古賀憲一・粟谷陽一：塩水中における粘土粒子の凝集，用水と廃水，Vol. 20, No. 3, 1978, pp. 31～36.
- 2) 川名吉一郎・谷本照己：実験水槽による淡塩二層流中の懸濁粒子の輸送機構の研究，中国工業技術試験所報告，No. 7, 1979, pp. 19～36.
- 3) 安立重昭：塩水中におけるベントナイトのフロック形成について，港湾技研資料，No. 421, 1982.
- 4) T. R. Camp: Flocculation and flocculation basins, Proc. of ASCE, Vol. 79, No. 283, 1953, pp. 283-1～18.
- 5) 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，No. 372, 1965, pp. 10～19.

記号一覧表

A	：攪拌翼の進行方向に直角な投影面積
b, b'	：ロジック・ラムラー分布の係数
B	：フロックの体積
B_m	：フロックの個数基準平均体積
B_s	：フロックに含まれている土粒子の占める体積
C_D	：攪拌翼の抗力係数
C_f	：濁質濃度
d	：フロックの粒径（長径）
d_s	：フロックの短径
D	：フロックの中位径
D_{max}	：フロックの最大成長中位径
G	：攪拌強度
M	：フロックに含まれている土粒子の質量
n	：ロジック・ラムラー分布の分布指数
N	：媒体の単位体積中のフロックの数
r	：攪拌翼重心と回転軸間の距離
R	：全体積に対する割合（ふるい上）
S	：攪拌翼の回転数
t	：攪拌開始後の時間
U	：全体積に対する割合（ふるい下）
v	：フロックの沈降速度
V	：フロックの沈降速度の中位値
V_0	：攪拌を受ける媒体の体積
τ	：媒体の単位体積重量
ϵ_0	：媒体の単位体積，単位時間あたりのエネルギー消費量
μ	：媒体の粘性係数
ρ	：媒体の密度
ρ_f	：フロックの密度
ρ_s	：フロックに含まれている土粒子の密度
$\rho_f - \rho$	：フロックの相対密度
$(\rho_f - \rho)_m$	：フロックの平均相対密度

港湾技研資料 No. 464

1983・9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 阿部写真印刷株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.