

九州大学 工学部

正 海田輝元

正 楠田哲也

正 栗谷陽一

学 石原達弘

学 二 我 了

1. はじめに 河川やエスチュアリー等の水域において、巻き上げられた底泥や直接はみろ水域に流入した微細粒子(主にシルト及び粘土)は水流によりかなり遠くまで輸送される。こゝろ微細粒子はSS自体や粒子に吸着した有害物質の拡散・輸送等の水環境問題、あるいは水深の確保というような港湾の維持・管理の問題等に密接にかかわっている。従って、水流の挙動に伴う微細粒子の堆積位置・堆積に要する時間・輸送距離等の予測を早急に可能とする事が必要であると考えられる。以上の観点から、着目するシルト分が多くほとんど凝集しない粒子の一定剪断応力下での沈降では、大粒子から徐々に沈降する事、初期粒度分布式から沈降過程が予測できる事を明らかにした。本研究では、粘土成分が多く粒子のフロック化が顕著な試料について、一定剪断応力下での沈降実験を行ない、その結果フロック径の大きな粒子から先に沈降するとは限らず、大きなフロックでも軽いフロックは流水中に浮遊し続ける事が明らかになった。さらに、同一径のフロック粒子の沈降速度にずれがある事を考慮して、沈降過程を数式を導き、実験値と比較・検討を行なった。

2. 実験装置と方法 実験に用いた円形回転水路の概略を図-1に示す。水路はリングと円筒水路(深さ25cm 内径90cm, 外径110cm)よりなっている。この様な水路では遠心力による半径方向の二次流が生じるが、リングと水路を逆方向に回転させ、二次流の影響が底面付近で最小となるような両者の回転速度をあらかじめ決めてある。実験は所定の濃度の粘土懸濁液を充分に混合攪拌した後、所定の一定剪断応力の下で行なった。SSの測定は経時的に水面下7cmのところから採水した試料を孔径 $0.1\mu\text{m}$ のメンブレンフィルターを用いて求めた。また、浮遊状態にあるフロックの粒度分布はサンプルの顕微鏡写真から体積粒度分布として求めた。フロックの沈降速度は図-2に示したサンプラーの下面に引っ掛けたフロックを沈降させ、次にサンプラーを裏返して下面に沈降するまでの時間から算出した。また、下面に達したフロックを撮影しフロック径を求めた。実験時の水深は15cmに保ち、水深基準のレイノルズ数は $(5\sim11) \times 10^4$ であった。また、すべての実験は、比重1.025(塩水使用)の塩水中で行なった。試料としては、市販カオリン(Engelhard ASP 600)を用いた。この試料の物性値は、比重2.66, 平均径 $0.69\mu\text{m}$, 粘性限界6%, 塑性限界6%であった。なお、実験中における試料の物性変化を防ぐ為、実験は $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の恒温室内で行なった。

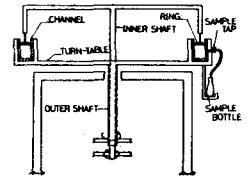


図-1 円形回転水路

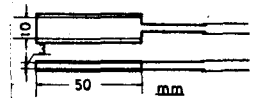


図-2 サンプラー

3. 実験結果 図-3に初期濃度(C_0)を2g/lとして、剪断応力(τ)を0.05, 0.1, 0.2 N/m²とした場合のSSの経時変化を示す。SSは時間の経過と共に減少し、その後減少率が低下し、最終的にはほぼ一定値(C_∞)に近づく。各々について沈降し得ない粒子や粒子群(フロック)が存続する事を示している。図-4には顕微鏡写真より求めたフロックの平均径(d_{50})の経時変化を示した。どの条件についても沈降開始から1~2時間程度まで d_{50} は増加するが、その後はSSが減少するにもかかわらず d_{50} はほとんど変化していない。また、図-5では $\tau=0.075\text{ N/m}^2$ での沈降開始時、1時間後の浮遊状態にあるフロック径(d)と沈降速度(v)との関係を示した。各時間において d と v との関係は、 $v = \alpha \left(\frac{d}{d_0}\right)^n$ ($\alpha: d=d_0$ での沈降速度)で示され、本研究で用いた試料の場合 n の値は、ほぼ1となる。

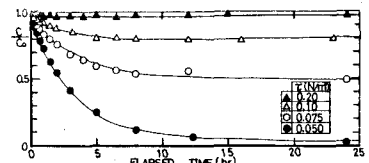
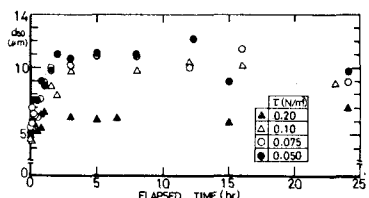


図-3 SSの経時変化

図-4 d_{50} の経時変化

ている。さらに、 α の値は同一の d では、時間の経過と共に小さくなる傾向が認められる。これより、フロック化が顕著な粒子が剪断流下で沈降する場合、フロック径の大きなものから沈降するとは限らず、同一の径のフロックでも密度の大きなフロックが先に沈降し、充分時間が経過した時点では密度の小さなものが浮遊し続けているものと考えられる。また、24時間後のSSが変化しなくなった時点でも、浮遊状態のフロックはその径に対応した沈降速度を有し、実験値で $d=25\mu m$ の時、 $U=0.03mm/sec$ 、 $d=8\mu m$ と $U=0.01mm/sec$ 程度(図-5 参照)であり、ほぼ倍率となっている。この事は、剪断流下では粒径と正の相関のある何らかの浮力が生じている事を示唆している。

4. 凝集性を持つ試料の剪断流下での沈降過程

ここでは、3で得られた結果を基に沈降過程を仮定式を導いてみる。まず、

1. 水路主流部は混合板が充分に行なわれるため、濃度の鉛直分布は線状とみなす。
2. 粘土の様な粒子は一度沈降すると同一剪断能力下での再浮上はほとんどない。

という実験結果を踏まえて、次の仮定をおく。

1. フロックは成長を繰り返しているとし、分布は $f(d) = \delta d^2$ とする。
2. フロックの出来方にばらつきがあり、同じ粒径でも密度は異なるが、その出来具合の分布は均一分布とする。また、 U (沈降速度) の分布幅は d に比例し、さらに、 $U = \alpha \left(\frac{d}{d_0}\right)^2$ とする。

3. 沈降を始めようとする力は d^2 に比例するとする。従って、剪断流下での沈降速度は $U = \alpha \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 - \beta d$ とする。

これより、主流部におけるある出来具合のある粒径のフロックの水深方向に平均した濃度 $\bar{C}(d, t)$ の変化は、

$$H \frac{\partial \bar{C}(d, t)}{\partial t} + U(d, t) \bar{C}(d, t) \Big|_{z=0} = 0 \quad \text{----- (1)}$$

$t=0$ で $\bar{C}(d, 0) = \bar{C}_0(d, 0)$ とすると

$$\bar{C}(d, t) = \bar{C}_0(d, 0) \exp \left[- \frac{U(d, t)}{H} t \right] \quad \text{----- (2)}$$

沈降速度を $U = \alpha \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 - \beta d$ とし、 $U > 0$ のフロックは沈降し、 $U \leq 0$ のフロックは沈降しないといえ、沈降しないフロックの濃度 C_{∞} は全体としての濃度 C は、

$$C_{\infty} = \int_0^{d_{\max}} d \int_{d_0(1-\delta)}^{d_0} \frac{f(d)}{2\delta d_0} dd = \frac{1}{2\delta d_0} \{ \beta d_0 - d_0(1-\delta) \} C_0 \quad \text{----- (3)}$$

但し、 $C_0 = \int_0^{d_{\max}} f(d) dd$ 、 $d_0 \pm \delta d_0$: フロックの出来具合の分布幅 である。

$$C = C_{\infty} + \int_0^{d_{\max}} d \int_{\beta d_0}^{d_0(1-\delta)} \frac{f(d)}{2\delta d_0} \exp \left\{ - \frac{\alpha \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 - \beta d}{H} t \right\} dd \\ = C_{\infty} + \int_0^{d_{\max}} \frac{\gamma d_0 H}{2\delta d_0 t} d \left[1 - e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{d_0(1-\delta)}{d_0} - \beta \right) t} \right] dd \quad \text{----- (4)}$$

$T = \frac{1}{H} \frac{2d_0\delta}{d_0} d_{\max} t$ とすると

$$\frac{C}{C_0} = \frac{C_{\infty}}{C_0} + \frac{3}{T} \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{T(1-C_{\infty}/C_0)} \left[1 - (1+T(1-C_{\infty}/C_0)) e^{-T(1-C_{\infty}/C_0)} \right] \right\} \quad \text{----- (5)}$$

となる。(5)式の計算結果を C/C_0 をパラメーターにして無次元時間 T と C_{∞}/C_0 の関係を示したのが図-6の曲線群である。また、計算値の $\frac{C-C_{\infty}}{C_0-C_{\infty}} = 0.5$ となる T と実験値(図-3参照)の $\frac{C-C_{\infty}}{C_0-C_{\infty}} = 0.5$ とを求め、 t と T に換算して実験値を示したのが図-6中のプロットである。剪断能力の相違によるが、計算値と実験値はよく一致している。しかしながら、上述の仮定より求められるものの他に、以下若干考慮する点が残っており、無次元時間の取り方については今後の研究課題としたい。最後に実験に御協力いただいた古賀憲一助に感謝いたします。〈参考文献〉 1) 原ら、剪断流下における花びら沈降特性に関する研究、土木学第36回年講pp56、1981.10。

2) 海ら、底泥の巻き上げ沈降に関する研究、第11回橋工工学研究討論会pp42-48、1981.1。

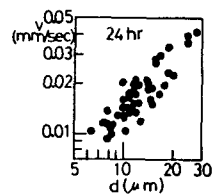
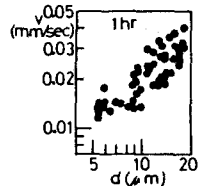
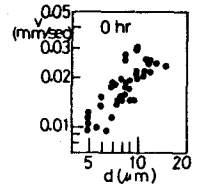


図-5 粒径と沈降速度の関係

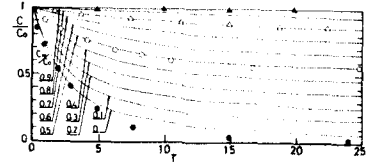


図-6 計算値と実験値