

振動流中で形成される高濃度浮泥層の保持機構に関する基礎的研究

楠 田 哲 也*・山 西 博 幸**

1. はじめに

シルテーションは、わが国の沿岸域をはじめ、韓国西海岸、黄海、インドネシア沿岸、アメリカ合衆国東岸、北海沿岸等において航路・泊地の埋没といった沿岸環境に多大な問題を及ぼしている。我国では、海底勾配 1/1000 の広大かつ平坦な干潟を有する有明海に建設された熊本港がこのシルテーション問題を抱えている港の代表である。この港内では年間 60 cm に及ぶシルトの堆積が観測されている。荒天時の観測結果によると、水深 4 m、有義波高 1.4 m の時に底面から 10 cm で懸濁物質の濃度が 10 g/l、25 cm で 1.5 g/l、50 cm で 0.75 g/l となっており、底面近傍の懸濁物質濃度が極めて高くなっている。熊本港における長期間にわたる物質収支の調査によると、底泥の堆積は水中高く巻き上げられた懸濁物質の鉛直方向からの沈積によるものよりも、上述のように巻き上げられた懸濁物質が底面近傍で高濃度層を形成し、それが海底面に沿って輸送され、低部に沈積するという水平輸送による懸濁物質の供給に起因していると推定されている。しかしながら、この高濃度層に作用する剪断応力あるいは剪断歪と濃度の関係、高濃度層内における鉛直混合速度と鉛直方向濃度分布の関係、剪断場における懸濁物質の沈降速度などをはじめとする高濃度浮泥層の保持機構に関わる素過程や保持機構そのものについて、未だ解明されていないところが数多く存在している。

振動流下における高濃度浮泥層の形成過程とその特性の概要については既に報告済みである（楠田ら，1991；山西ら，1992）。本報告では高濃度浮泥層の流動特性と層内圧力分布の計測結果を踏まえ、高濃度浮泥層の保持機構に関して、①剪断流場内での粒子群の混合効果、②浮泥層内に及ぼす剪断応力や圧力勾配の効果、③粒子間接触にともなう有効応力の影響等を考慮し、その検討を行った。また、上述した結果をもとに浮泥流動特性についての考察を加え、さらに種々のパラメータ相互の関係、についてまとめた。これらの検討を通して、振動流中で形成される高濃度浮泥層が沈積せずに浮泥として存在し

続ける機構について考察を加えた。

2. 実験方法

本実験では、長時間の実験に際しても高濃度浮泥層が一方方向に質量輸送されず、しかも流体の加速による水圧変動が重複波の場合と類似したものになる U 字型振動流水槽を用いた（図-1 参照）。なお、試料には有明海に注ぐ佐賀県六角川水系の現地泥（土粒子密度 $\rho_s = 2.54 \text{ g/cm}^3$ ，中央粒径 $d_{50} = 4.0 \mu\text{m}$ ）を用いた。これを所定の濃度に設定した後、振動流水槽に素早く注入し実験を開始した。実験中は、水路側面からの採水による濃度測定や浮泥層と上層水層内の圧力測定を随時行った。また、浮泥層内粒子の運動をビデオカメラやモータードライブ付一眼レフカメラによる写真撮影などによって観測した。

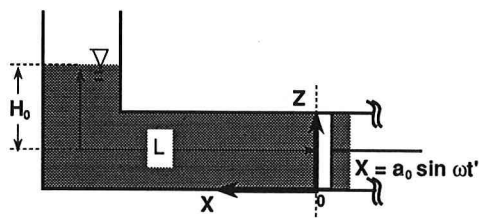


図-1 振動流水槽概略図

3. 実験結果及び考察

(1) 高濃度浮泥層の形成

図-2 は振動流水槽水平部の中央付近において得られた鉛直濃度分布の経時変化の一例である。層内にほぼ一様な濃度で存在していた懸濁物質は、時間の経過とともに底面付近へ沈積していく。この際、濃度勾配の急変する領域（ルートクライン）が見られ、この界面も時間の経過と共にその高さが低下していく。ルートクラインは水槽側面からの目視によって十分観測され、また濃度分布から得られる濃度急変領域との高さはほぼ一致している。本実験での高濃度浮泥層の上側界面の決定は、この2つの方法によって決定している。ルートクラインが形

* 正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科

** 正会員 工修 九州大学助手 工学部建設都市工学科

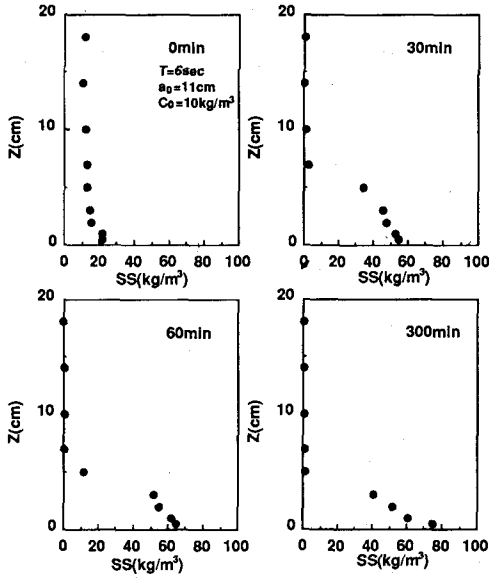


図-2 鉛直方向濃度分布

成された場合、その条件下では、ルートライン上での乱れによる界面での懸濁粒子の混合は生じて、それらの粒子群を上層水中へ連行させることはなく、またその界面が消滅することもなかった。この界面での混合現象はシルテーションを引き起こす原因の一つである高濃度浮泥層からの上層水中への巻き上げを考慮する際に重要な点ではあるが、今回この点については対象としていない。

図-3 は初期濃度が同一である場合の振動流中と静水中での界面高の経時変化である。振動流中・静水中ともにこの界面高は時間経過と共に低下していくが、実験開始1時間ではほとんど沈降を終え、さらに3時間程度で振動流中での界面高は一定となり、高濃度浮泥層内の粒子群が浮遊した状態で一定厚を保持した状態を形成する。また、界面の低下速度の減少は、振動流中での懸濁粒子群の沈降速度が見かけ上減少することによるが、この時の見かけ沈降速度はそのときの懸濁物質濃度や剪断速度などの条件によっても変化する(山西ら, 1992)。今回用いた試料による静水中の沈降実験より求めた濃度と沈降速度との関係を図-4 に示す。なお、本実験と同一試料を用いた実験により得られた経験式も同時に示す。

(2) 水槽内圧力分布

振動流水槽内で形成される高濃度浮泥層の流動特性やその浮上機構に関わる圧力項の影響を検討するため、今回、間隙水圧計を用いて高濃度層内や上層水中の圧力測定を行った。この際に、水槽内主流部における圧力分布を把握する必要があるが、その方法として水槽内の水塊の運動方程式より得る方法と水槽内の流れを渦無し流れ

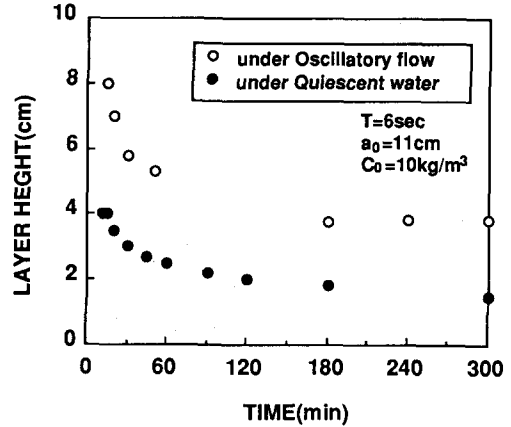


図-3 界面高の経時変化

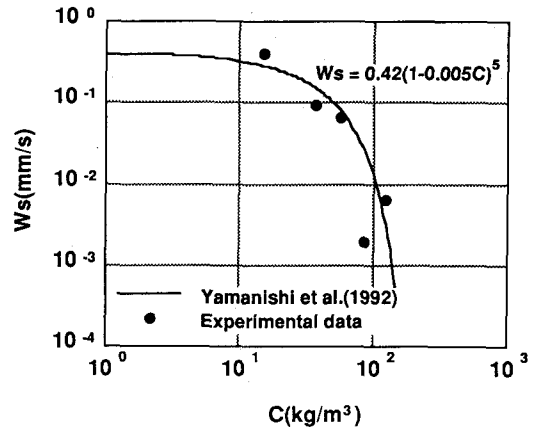


図-4 濃度と沈降速度との関係

と仮定した場合の圧力方程式から得る方法が考えられる。

運動方程式による表示式は X 方向のみの一次元で考えた場合、次式となる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial X} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X} \quad \dots\dots\dots (1)$$

このとき、 u は水平流速、 P は圧力、 ρ は流体密度、 t は時間である。 u は任意の時刻 t においていたる所で同じであるから、時間のみの関数と考えてよい。この場合(1)式の左辺第二項目がなくなり、更に運動方程式は簡略化される。この式に $X=0$ での境界条件を考慮すれば水平方向の任意位置での圧力を示す次式を得る。

$$P = \rho g H_0 + \rho a_0 \{ (X-L)\omega^2 + g \} \sin \omega t - \rho a_0^2 \omega^2 \sin^2 \omega t \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 L は $X=0$ の断面から静水面までの中心軸線距離、 H_0 はピストン面の中心から静水面までの鉛直高さ、 a_0 はピストン振幅、 g は重力加速度、 ω は角振動数である。図-5 は水槽中央部において測定された主流部の変

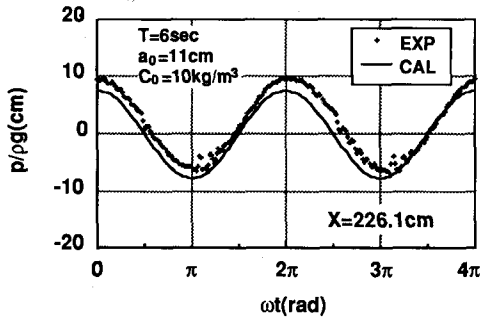


図-5 水槽内主流部の圧力変化

動水圧（静水圧を除いたもの）と（2）式による計算結果を示す。（2）式より得られる計算値と実測値との差は、水槽内に高濃度浮泥層が形成されることによる水槽内断面の変化などの影響を受けているため、これらを考慮することで主流部での水圧変動を計算できる。なお、本論文の図面上での全ての位相表示 $\omega t=0$ は、ピストンが $X=a_0$ から負の向きに動き始める位相としている（座標軸は図-1 参照）。

（3）高濃度層内の流動機構

図-6 は高濃度層内の粒子運動の位相変化を鉛直方向別に示したものの一例である。高濃度層内の水平流動特性については既報（山西ら，1992）でも報告したように、層内上層部の粒子の水平移動に比べ、下層部の粒子の水平移動の方が先に生じる傾向にある。図-6 の場合も下層部粒子の運動が上層部粒子の移動よりも位相が $\pi/2$ 程進んでいるのが見られる。粘性流体多層モデルなどを用いて層内流動をシミュレーションする場合、解の仮定を行うが、この際、振幅減衰などは考慮しても、上層部と下層部に働く外力の位相差は考慮していないために、実際の流動をうまく表現することが出来なかった（山西ら，1992）。高濃度層内の下層部において粒子移動の位相が上層部の粒子移動よりも先行する原因として圧力勾配の影響が挙げられる。砂のシートフロー現象に着目した研究においても同様な傾向がみられる（例えば、山下ら，1992；浅野ら，1992）。しかしながら、本研究で取り扱う粘土-シルト系粒子で構成された混相流動層内の詳細な圧力分布を測定し、圧力勾配が及ぼす流動特性を論じたものはない。

図-7 は図-6 の同一条件において計測された高濃度浮泥層内の鉛直方向水圧変動より得られた水平方向の圧力勾配 $-\Delta P/\rho g \Delta X$ である。なお、 δ は高濃度浮泥層厚である。 $z/\delta=0.5$ ($z=2$ cm) を境に上層部と下層部で $-\Delta P/\rho g \Delta X$ の位相がずれている。通常、層内流動のモデルを構築する際に用いる仮定では、この水平方向の圧力勾配の取扱いは、上層水中の値を層内まで保持させるかあるいは深さ方向に減衰させるかのいずれかである。し

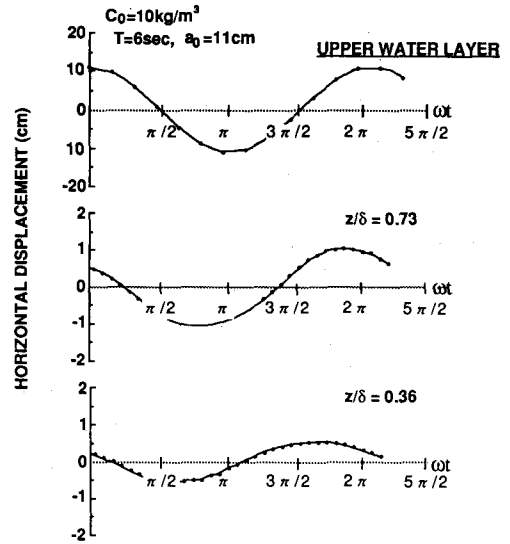


図-6 高濃度層内粒子の水平振幅

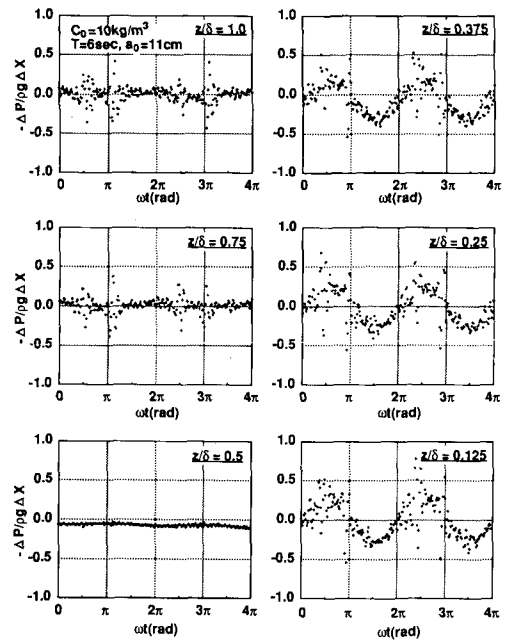


図-7 水平方向圧力勾配の位相変化

かしながら、実際の流動現象では図-7 及び図-8 ($-\Delta P/\rho g \Delta X$ の鉛直分布の経時変化) より上述の仮定に加え、位相差を考慮しなければならないことが分かる。また、この位相差が図-6 の下層粒子の位相の先行を説明している。すなわち、加速度項と圧力項が平衡にあるとすれば、図-7 の圧力勾配の位相変化が π だけずれたものが粒子の移動と同じものとなり、図-6 の $z/\delta=0.36$ の高さでの位相変化は図-7 の $z/\delta=0.375$ の高さでの

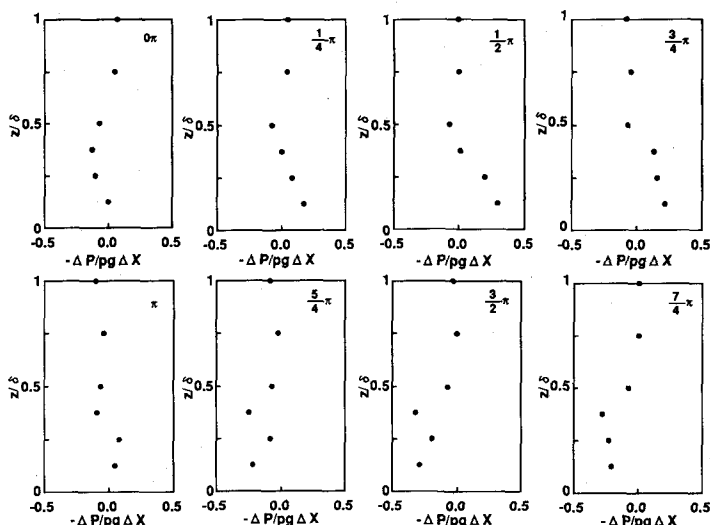


図-8 水平方向圧力勾配の鉛直分布

位相変化と現象的に一致することになる。

(4) 高濃度層の浮上・保持機構について

ここでは、実験結果より①剪断流場内での粒子群の混合効果、②高濃度浮泥層内に及ぼす剪断力や圧力勾配の効果、③粒子間接触にともなう有効応力の影響などについて検討を加える。

a) 剪断流場内での混合による効果

高濃度浮泥層内での粒子運動の観測結果より層内は剪断流場であることから、層内の運動がずり運動と回転運動の和によって支配されている。高濃度浮泥層が沈積してしまわずにある一定の層厚を保持しながら浮遊している状態は、この粒子群の回転運動に起因する混合が一つの原因であり、浮泥層内の圧密を抑制しているものと考えられる。ここではこの混合の度合を把握するために、実験データを基に(3)～(6)式を用いて渦動粘性係数 ε 及び拡散係数 D_z を算出した。なお計算を行う際に用いた粒子沈降速度 W_s は図-4中の経験式を用いた。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\tau = -\rho l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \frac{\partial u}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\varepsilon = l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} - W_s \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

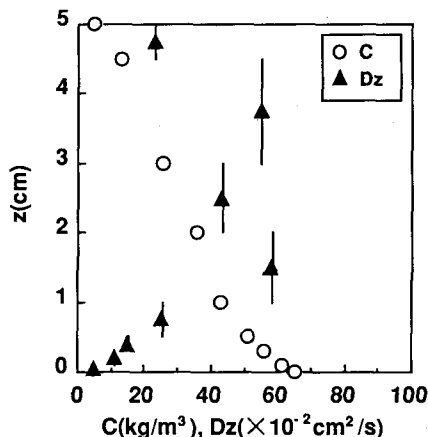
ここで τ は剪断応力、 C は濃度、 l はPrandtlの混合距離を表す。

図-9は(6)式より得られた D_z の鉛直分布である。 D_z については高濃度層内の濃度分布を振動周期内で測定することは今回の実験においては行っていないため、

ここで算出している D_z は(6)式中の時間変化項を取り除いた定常時のものである。なお本論文では図示してはいないが ε の計算値には実験データからくる多少のばらつきは見られるものの、オーダー的には $1(\text{cm}^2/\text{s})$ のオーダーであった。したがって、渦動粘性係数 ε と乱流拡散係数 D_z との比である乱流シュミット数は10のオーダーであった。

b) 高濃度浮泥層内に及ぼす剪断力や圧力勾配の効果

(4)式によって算出される τ の分布や図-8とも合わせると、水平方向の圧力勾配や剪断応力といった外力による影響が高濃度層内の粒子群の流動に影響を及ぼしている。また、高濃度層内上層部での運動は上層水の運動に伴う剪断力に、下層部は水平方向の圧力に支配されていることも明らかである。外力としての底泥運動に及ぼ

図-9 拡散係数 D_z の鉛直分布

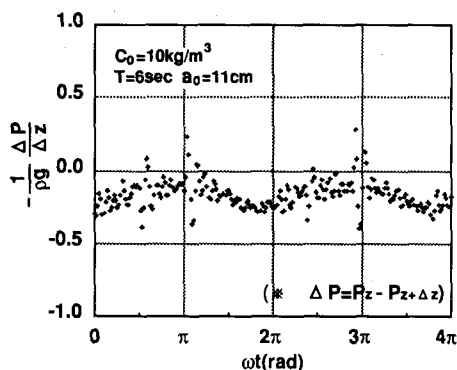


図-10 鉛直方向圧力分布

す圧力勾配の影響については、Trien・磯部ら (1991) も簡単に述べてはいるが、今回、詳細な実験を通して圧力勾配の影響を把握することができた。本実験で用いた振動流水槽は流体の加速による水压変動が重複波と類似するものであることから、実海域においてこのような条件下であれば、高濃度浮泥の流動も同じような現象が生じていることになる。これはシルテーションを引き起こす浮泥の流動予測に対して一つの知見となるものである。

c) 有効応力の影響

高濃度層上側界面付近 ($Z=4$ cm) と高濃度層内下層部 ($Z=0.5$ cm) での水压測定値より求めた鉛直方向圧力勾配 $-\Delta P/\rho g \Delta Z$ の一例を図-10 に示す。高濃度浮泥層内粒子群を浮層内で浮遊状態にさせ、この層厚を保持するには何等かの上向きの力が必要となるはずである。しかしながら、本実験データでは一周期平均の値は負になっており、常時、高濃度浮泥層上側界面から下層部へ圧力勾配が作用していることになる。この点に関しては今のところ不明ではあるが、下層部にかかる過剰間隙水压を土粒子間の有効応力などが支えていることなども考えられる。また、鉛直方向の圧力勾配が周期的に変動し、上

層水流速が最大となる位相で極値を持つ傾向にあるが、その理由については上述したような土粒子間の有効応力との関係などの高濃度層内の流動に関する詳細な検討が今後必要であろう。

4. おわりに

高濃度浮泥層の保持機構の関わる素過程や保持機構そのものについて未だ不明な点が多く残されている。例えば本論文で報告した高濃度浮泥層内における水平圧力勾配の鉛直方向での位相差などがそれである。このように、簡単には机上で理解されない力学的な機構を実験的検討を通して、多くの知見を得ることができた。今後ともシルテーション問題解決への一助となるよう、理論的、実験的検討を行っていく予定である。

なお、本研究を遂行するにあたり文部省研究費奨励研究 A (代表 山西) の補助を受けた。また、本実験に協力していただいた今井 剛・中村隆志両君 (九州大学大学院生) に感謝の意を表する。

参考文献

- 浅野敏之・中村和夫・中野康弘・高沢俊満 (1992): シートフロー状態の底質移動に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 295-299.
- 楠田哲也・山西博幸・末次敏弘 (1991): 振動流下における高濃度層の形成過程とその特性, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 231-235.
- 山下俊彦・金岡 幹・牧野有洋 (1992): 非定常性に着目したシートフロー状砂移動機構, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 291-294.
- 山西博幸・楠田哲也 (1992): 振動流下における高濃度層の形成・保持機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 286-290.
- Huynh Ngoc Trien・磯部雅彦・小林智尚・渡辺 晃 (1991): 波による底泥の質量輸送における底泥のレオロジー特性の影響について, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 466-470.