

振動流下における高濃度層の形成過程とその特性

楠田 哲也*・山西 博幸**・末次 敏弘***

1. ま え が き

懸濁物質は、波や潮汐などの水面変動や周期的な水流変化に応じて、様々な挙動を示す。沿岸域や半閉鎖性水域では、これらの微細粒子群の挙動によって、港湾航路の埋没や懸濁物質に吸着された種々の有害物質の輸送および拡散による水圏環境の破壊等が引き起こされている。

海域や河川での実測データや一連の巻き上げ実験（例えば、楠田ら、1988、1989 など）などにより得られた結果から、波動下における懸濁物質の形態は、堆積した圧密底泥直上に形成される高濃度層（いわゆる浮泥層）と高濃度層よりも上層に存在し、ほとんど濃度分布のない低濃度層の二層構造となっていることが知られている。懸濁物質の輸送の議論には、この二層構造内の下層に位置する高濃度層の挙動が重要であり、これが懸濁物質の輸送総量を決定づける支配要因の一つとなっている。したがって、この底泥直上部に形成される高濃度層の挙動を研究することは、シルテーションの定量的な評価を行うという観点から、極めて実用的かつ重要な課題である。また、剪断応力の作用形態の差異による懸濁物質の挙動を考慮する場合、一方向流下における懸濁物質の沈降現象については、Krone (1962) をはじめとして、Mehtaら (1975) や Kusuda ら (1982) によって、実験結果の考察および理論的説明がなされている。一方、波動下における沈降現象は、楠田ら (1988) が、試料としてカオリンを用いた実験において、その沈降形態が一方向流下とは異なることを示している。しかしながら、粘土やシルトのような微細粒子は砂粒子とは異なり、水流中においてフロックを形成したり、その濃度や粘土成分の違いあるいは塩分濃度に影響を受けるなどの複雑さがあるため、未だ十分な検討はなされておらず、そのメカニズムについては不明である。

本研究では、U字型振動流水槽を用いることで、波動下での水面変動による影響を無視できるようにし、その

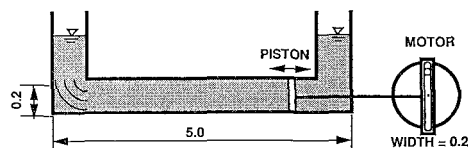
水理現象を単純化させ、試料として現地泥を用いて、海水中で実験を行い、実験結果から、①振動流下における懸濁物質の沈降形態の把握、②高濃度層の形成過程とその特性、③種々のパラメータ（沈降フラックス F_d 、最大底面剪断応力 τ_b 、粒子凝集特性、槽内平均濃度 C など）相互間の関係、についてまとめ、振動流下における懸濁物質の沈降特性について検討を行い、それらの結果を理論的に説明することを目的とする。

2. 実験装置及び方法

図—1 は本研究で使用した、全長 5 m、幅および高さが 20 cm の正方形断面を有する U 字型振動流水槽である。管路片端面からのピストン（ストローク、周期可変）の往復運動により定常的な振動流を発生させることができる。この水槽内に、海水との混合により所定の濃度に設定した佐賀県牛津川底泥（比重 2.51、中央粒径 $d_{50} = 1.7 \mu\text{m}$ 、以後、牛津泥と呼ぶ）を管路片端より素早く注入し、実験を開始した。管路水平方向数カ所において、鉛直方向数十点から採水できるよう、採水装置を取り付け、所定時間毎に採水を行った。ただし、水槽内の鉛直方向濃度分布を乱さないために、採水時以外は採水管（ステンレスパイプ 2.4 mm ϕ ）を槽内に挿入せずに実験を行った。さらに、光透過式濁度計（濃度によって測定域可変）によって、採水した懸濁物質の濃度を測定した。高濃度のものに対しては、メンブレンフィルター（孔径 0.1 μm ）を用い、直接懸濁物質濃度を求めた。なお、今回行った実験の条件を表—1 に示す。

3. 実験結果及び考察

懸濁物質の濃度分布形に着目し、底面付近の高濃度層と上層水との挙動とに分けて実験結果を論じる。



図—1 実験装置

* 正会員 工博 九州大学教授 工学部水工土木学科
 ** 正会員 工修 九州大学助手 工学部水工土木学科
 *** 学生会員 九州大学大学院 工学研究科

表-1 実験条件

KUN No.	初期濃度 C_0 (g/l)	周期 T (sec)	振幅 a (cm)	最大底面剪断応力 (Pa)
1-1	1.0	4.0	16	0.261
1-2			12	0.196
1-3			8	0.131
2-1	5.0	4.0	16	0.261
2-2			12	0.196
2-3			8	0.131
3-1	10.0	4.0	16	0.261
3-2			12	0.196
3-3			8	0.131
4-1	1.0	3.0	18	0.453
4-2			16	0.402
4-3			14	0.352
4-4			10	0.251
5-1	5.0	3.0	18	0.453
5-2			16	0.402
5-3			14	0.352
5-4			10	0.251
6-1	7.0	3.0	18	0.453
6-2			16	0.402
6-3			14	0.352
6-4			11	0.277
6-5			8	0.201
6-6			5	0.126
7-1	10.0	3.0	18	0.453
7-2			16	0.402
7-3			14	0.352

3.1 高濃度層の形成過程とその特性

a) 沈降形態と高濃度層

図-2 は浮遊懸濁物質濃度の鉛直分布の形成過程の一例を示したものである。いずれの場合においても実験開

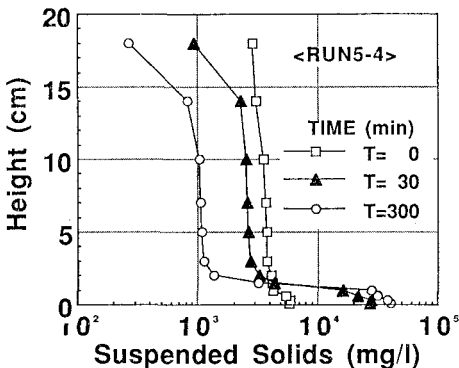


図-2 鉛直方向濃度分布

始後数分で波動下における巻き上げ実験と同様に、底面付近に高濃度層が形成された。これは管路側面からの目視によっても確認され、この時の高濃度層と上層水の界面は常にはば明瞭であった。また、その濃度分布は円形回転水路を用いた一方向流下での様な分布とは異なり、高さ方向に分布を形成していた。ここで、濃度勾配の最も大きく、明瞭な界面以下の部分を高濃度層と定義し、この層厚を高濃度層厚 δ とする。この高濃度層厚が定常になったところで、各実験での鉛直方向の濃度分布と壁面からの目視とによって δ を求め、最大底面剪断応力との関係を示したものが図-3 である。なお、底面剪断応力 τ_b は、平板上の粘性振動流の考え方を用いて求めている。今回の高濃度層の定義では、濃度勾配を考慮しているため、高濃度層厚 δ は底面剪断応力 τ_b が増加するとともに厚くなり、ある極大値をとって小さくなっていくものと考えられる。これは、 τ_b が限りなく増加すれば、浮遊懸濁物質濃度は限りなく初期濃度 C_0 に近づき、高濃度層と上層水層との濃度差はなくなり、高濃度層が見かけ上消失するからである。今回の実験範囲内では、高濃度層の消失までは観測できなかったが、 δ がほとんど増加しなくなる様子は得られた。

図-4 は高濃度層内平均濃度 C_δ (C_δ は実験結果から

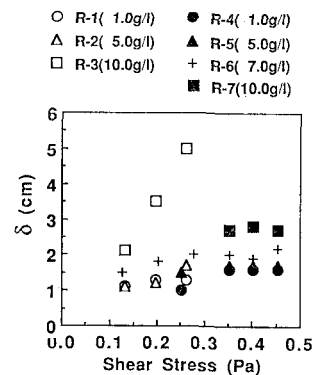


図-3 底面剪断応力 τ_b と高濃度層厚 δ との関係

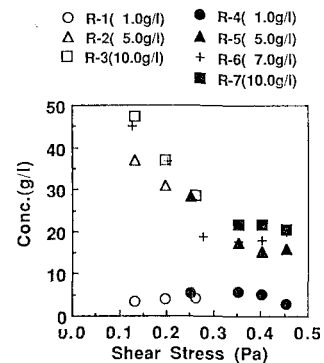


図-4 底面剪断応力 τ_b と高濃度層内平均濃度 C_δ との関係

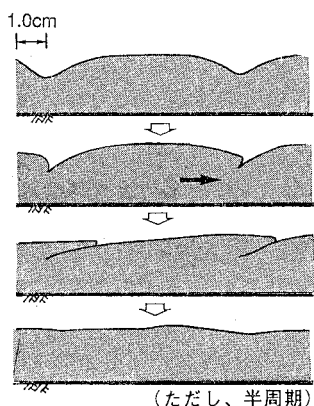


図-5 乱れ(混合層)の概念

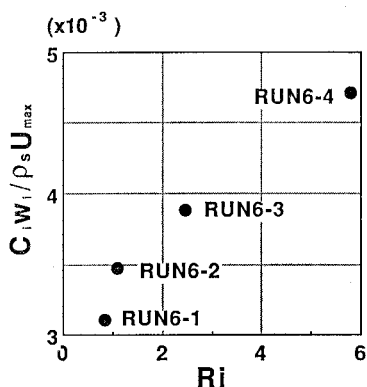


図-6 連行係数とリチャードソン数

求まる濃度分布の底面から、 δ までの平均値である)と最大底面剪断応力 τ_b との関係を示したものである。本実験における条件下では、高濃度層内平均濃度の最大値 $C_{\delta, \max}$ は 30 g/l 程度であった。また、高濃度層厚 δ は初期濃度 C_0 の増加にともなって増加している。さらに、 τ_b の増加に伴って C_0 が C_0 に漸近する様子がわかる。本実験で行った濃度範囲全てにわたって、その傾向が現れ、特に $C_0 = 1.0$ g/l の場合に著しくなっている。しかしながら、 $C_0 = 1.0$ g/l 以外では今回の設定剪断応力の範囲において、初期濃度よりもやや高め濃度のところでとどまっている。これは、高濃度層と上層水との界面に作用する剪断応力が両者間の相対速度の減少により小さくなっていることに原因があるものと考えられ、さらに剪断応力を増加させることで、 C_0 を C_0 に漸近させることができると推測される。ここで、 $C_0 = 1.0$ g/l で、 $\tau_b = 0.3$ Pa 以下のものが他のものの傾向と異なっているが、これは初期濃度が他の場合ほど高濃度ではなく、かつ、高濃度層厚 δ が 1 cm 以下であったために、改良前の採水方式で層内濃度を測定できなかったためである。

b) 高濃度層界面付近の挙動

高濃度層の挙動を観測するために、振動流装置中央上部に取り付けた注入口よりトレーサーを素早く注入し、水路側面近傍よりビデオカメラによる撮影を行った。図-5 は、高濃度層上部の乱れの状況を半周期にわたって観察したものである。これによると、高濃度層と上層水との界面には平坦ではなく、界面の不安定による組織的な渦が存在し、高濃度層内に切れ込み状の乱れが見られた。この切れ込みは、連行現象を生じさせ絶えず周期的な変形を繰り返し混合層を形成していた。また、剪断応力の増加にともなって、この切れ込み深さが増大している。図-2 の鉛直濃度分布との比較からも、濃度勾配が大きく変化する高さとの層の位置が一致している。

懸濁物質を含まない密度流の密度界面では、一度乱れによる混合や拡散により、密度勾配が小さくなると、元に復することはないが、沈降性懸濁粒子により形成されている密度流の密度界面では、復元力が常に作用している。本実験の場合、界面の不安定により混合が生じると、高濃度層内の濃度(密度)が低下し、見かけ粘性係数が低下して、相対速度は小さくなる。その結果、不安定性による混合が減少するとともに、濃度の低下による沈降速度の増加により、高濃度層に回復が見られる。これら両者の平衡により、高濃度層上部の濃度分布が決定されている。定常になったときの密度界面を通してのフラックスは 0 となるので、連行係数とリチャードソン数の関係を表示できない。その代わりに一周期の方への正味のフラックスを、一周期を通しての密度界面の鉛直下方への移動距離 w_i (ビデオのスロー再生により測定)と密度界面の濃度 C_i との積として求め、これを最大相対速度 $U_{\max}$ で除したものを連行相当量とし、層平均リチャードソン数 Ri との関係を示したものの一例が、図-6 である。この場合、 Ri が 1.0 から 5.8 まで増加するにつれて、連行相当量も、僅かではあるが増加している。この関係は、通常の連行係数 E と層平均リチャードソン数 Ri との関係 $E = 2 \times 10^{-3} Ri^{-3/2}$ とは大きく異なっている。このようになる理由は、現在のところ不明である。さらに、この不安定性による乱れが到達していない高濃度層下部では、界面から伝わった剪断応力による水平移動のみが存在する。粒子混相流の剪断流では、粒子がそれぞれ回転するため、圧密沈降状態になり難い。したがって、この混合層が高濃度層厚の決定に大きな役割を果たしている。

3.2 振動流中における沈降特性

a) 沈降限界剪断応力 τ_{cd} について

図-7 は、同一剪断応力下において、上層水平平均濃度 C (高濃度層分を含まず)を初期濃度 C_0 で除した C/C_0 の経時変化である。これより、本実験装置のもとでは、振動流中における懸濁物質の沈降が、実験開始 30 分程

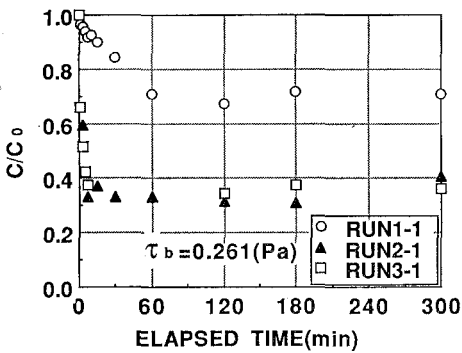
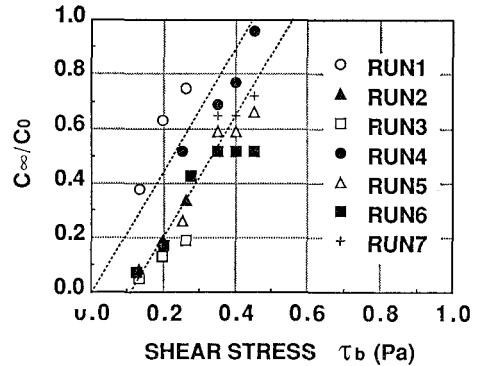
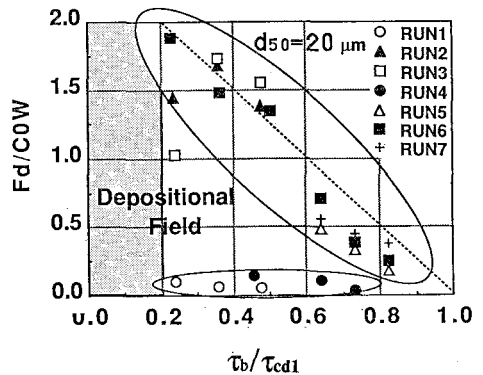


図-7 無次元上層水平平均濃度の経時変化

度ではほぼ終了していることがわかる。また、濃度減少パターンが初期濃度 $C_0=1.0 \text{ g/l}$ と $C_0=5.0 \text{ g/l}$, 10.0 g/l とでは異なっている。粒子は、それが単一粒子なら静水中で最も速く沈降するが、凝集性のものは、若干の剪断があった方が衝突合体が生じ、大フロックとなり、結局、沈降が速くなる。したがって、初期濃度 $C_0 \geq 1.0 \text{ g/l}$ の場合、 C_0 の増加に伴い、上層水中に存在する浮遊懸濁物質のフロック化が促進され、水槽内の沈降が単粒子沈降ではなく凝集沈降になったものと判断される。剪断流中での懸濁物質の濃度減少を初めて捉えた Krone (1962) は、懸濁物質の濃度に応じた濃度減少の式を示した。振動流場においても初期濃度に応じた凝集及びそれに続く沈降速度の変化を考慮しなければならない。

図-8 は底面剪断応力 τ_b と C_∞/C_0 (C_∞ は上層水の平均濃度に変化しなくなった時点での濃度と定義する) との関係を示したものである。この関係と $C_\infty/C_0=1$ との交点を、最大粒径が沈降する限界の剪断応力 τ_{cd1} 、同様に、 $C_\infty/C_0=0$ との交点を最小径が沈降する限界の剪断応力 τ_{cd2} と定義する。本来、沈降限界剪断応力 τ_{cd} は取り扱う粒子が均一なものであれば、ただ1つ決まるだけであるが、今回のように懸濁粒子が粒度分布を有する場合、このようなことが生じる。なお、 $C_0=1.0 \text{ g/l}$ の場合は、他のシリーズと傾向が異なっているため、 $C_0=1.0 \text{ g/l}$ とそれ以外のものとで分けて考えることにする。図より、 $C_0=1.0 \text{ g/l}$ の場合、 $\tau_{cd1} \doteq 0.45 \text{ (Pa)}$, $\tau_{cd2} \doteq 0 \text{ (Pa)}$, $C_0=5.0, 7.0, 10.0 \text{ g/l}$ の場合、 $\tau_{cd1} \doteq 0.55 \text{ (Pa)}$, $\tau_{cd2} \doteq 0.11 \text{ (Pa)}$ と読み取れる。一方流下における沈降限界剪断応力 τ_{cd} は、Kusudaら (1982) の方法に従って、今回用いた試料 ($d_{50}=1.7 \mu\text{m}$) であれば、およそ 0.01 (Pa) のオーダーとなる。このように、 τ_{cd} が小さくなるのは、試料の凝集性の違いに由来している。

また、 τ_b と C_∞/C_0 との関係から得られる勾配 α は牛津泥の場合、 $\alpha \doteq 2.2$ であった。ただし、勾配 α は試料底泥の物性、塩分濃度、温度などの影響 (特にフロック

図-8 底面剪断応力 τ_b と C_∞/C_0 との関係図-9 無次元剪断応力 (τ_b/τ_{cd1}) と沈降フラックス F_d との関係

径分布) を受けて変化する。

b) 沈降フラックス F_d

管路内平均濃度の経時変化より求めることができる、単位面積単位時間当たりの沈降量の実験開始初期の変化量 (単位時間当たりの沈降速度) がその沈降フラックスを示していることから、これを F_d と定義する。

図-9 は、沈降フラックス F_d を初期濃度 C_0 と単粒子沈降速度 w (ストークスの式で計算) で無次元化したものと (τ_b/τ_{cd1}) の関係を示したものである。ただし、上層水中における沈降速度 w を算出する際、今回の実験結果より振動流下における沈降が、単粒子沈降ではないことが明らかであり、牛津泥の中央粒径 d_{50} をそのまま用いることは沈降速度 w の過小評価となるため、ここでは d_{50} の10倍のものが水槽内を沈降しているものと仮定して w を計算している。本来縦軸の値は1以下でなければならないが、これは仮定した水槽内のフロック径が $20 \mu\text{m}$ 以上であったために、沈降速度 w を過小評価したことに原因がある。したがって、水槽内の沈降フロック径を求めるためには、 F_d と C_0 から w を逆算し、フロック径を求めればよい。しかし、フロックは成長するほど見かけ密度と剪断強度が小さくなる ($\rho \sim d^{-0.5}$ -

-1.0) のでフロック径はある大きさに決まるものと予想される。ここで $C_0 > 1.0 \text{ g/l}$ のものについて考えれば、図—8より、 $\tau_{cd1} = 0.55 \text{ Pa}$, $\tau_{cd2} = 0.11 \text{ Pa}$ を得、 $(\tau_{cd2}/\tau_{cd1}) = 0.2$ となる。これは、この値以下で試料の全粒子が沈降してしまうことを意味しており、このとき $F_d/C_0 w$ は一定となる。したがって、これらの関係をまとめると次式のように表せる。

$$\frac{F_d}{C_0 w} = \beta \left(\frac{\tau_b}{\tau_{cd1}} - 1 \right) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $\beta = -1/(\tau_{cd2}/\tau_{cd1})$

したがって、上層水からの沈降は無次元剪断応力に関して線形となることがわかる。

4. ま と め

振動流下において形成された高濃度層やその上層水内の沈降現象に着目しながら、その形成過程や特性を定性的に説明することができた。高濃度層については、高濃度層厚や高濃度層内平均濃度と底面剪断応力との関係を示した。また、高濃度層界面に生じる混合層が、高濃度層厚を決定する重要な役割を果たしていることがわかった。上層水中の懸濁物質の沈降形態は、初期濃度によっ

て変化するが、濃度が高くなるにつれて懸濁物質のフロック化が促進され、分散粒子の粒径として解析を行うと矛盾を生じることを示した。このことは、初期濃度によって振動流中の沈降現象を区分して考える必要があることを示唆している。また、波動下における巻き上げフラックスと同様に、振動流下における沈降フラックスを無次元剪断応力の関数として示した。

参 考 文 献

- 楠田哲也・山西博幸・川添正寿・二渡 了 (1988): 波による底泥の浮遊及び挙動に関する研究, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 353-356.
- 楠田哲也・山西博幸・吉見博之・二渡 了 (1989): 攪乱・不攪乱底泥の巻き上げ特性に関する実験的研究, 第36回海岸工学講演会論文集, pp. 314-318.
- Krone, R. B. (1962): Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling process, Final Report, Hydr. Engr. Lab. and Sanitary Engr. Res. Lab., University of Californiar, Berkeley, June.
- Kusuda, T. et al (1982): Depositinal process of fine sediments, Wat. Sci. Tech., Vol. 14, pp. 175-184.
- Mehta, A.J. and E. Partheniades (1975): An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediments, J. of Hydraulic Research, Vol. 13, No. 4, pp. 361-381.