

II-23 シートフロー状漂砂の移動機構に関する研究

北海道大学工学部 正 員 山下 俊彦
 学生員 日比 康生

1. はじめに

波による底面流速が大きくなるとシートフロー状砂移動が生じる。これは多量の砂移動が生じるため海浜変形を取り扱う際に重要である。しかし、実験室の造波水路では再現することが困難であるため、振動流装置を用いた非常に限られた実験しか行なわれていない^{1), 2)}。そのため、漂砂量データの蓄積も少なく、移動機構についてはほとんどわかっていないのが現状である。一方、理論的研究は、最近になつて Ahilan⁵(1984), 榎本⁴(1984), 香取⁶(1986)により行なわれている。

本研究では、まず移動状況の実態を把握するため、底質粒子および移動層内を含む水粒子速度を測定し、移動床振動流境界層の特性を明らかにするとともに、粒子がどのような外力を受けて運動しているかに着目して、砂移動機構を考察する。次に、移動層を混相流とみなし、境界層方程式を用いた解析を試み、香取⁶の結果と比較検討する。

2. 実験装置および方法

実験には多層の底質移動を発生させることができる図1に示すU字管振動流装置を用いた。U字管内の水の固有周期と振動流風洞の周期を一致させ、一種の共振状態にすることにより、安定した正弦振動流を発生させた。

流速測定は、レーザー流速計と光ファイバーレーザー流速計（以下各、LDV, FLVと略記）を用いて行なった。FLVを用いると光路長を短くすることがで

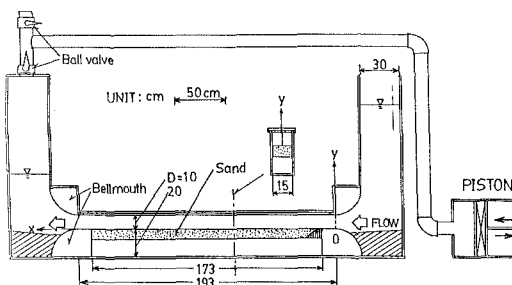


図1 実験装置

Case	周 期 T (s)	流速振幅 u_m (cm/s)	粒 径 d (mm)
1	3.1	94.0	5.0
2	3.1	80.6	5.0
3	3.1	67.6	5.0
4	3.1	53.9	5.0
5	3.1	98.5	3.0
6	3.1	84.9	3.0
7	3.1	71.7	3.0
8	3.1	55.7	3.0

表1 実験条件

き高濃度中の流速測定も可能である。底質粒子の移動状況を16mm高速度カメラで撮影し解析することにより、移動形態、移動速度を把握した。底質粒子速度は平均をとらない生データであり、水粒子速度の平均流速は80波をアンサンブル平均して求めた。底質粒子としては、移動状況が把握しやすい粒径 $d=5\text{mm}$ と 3mm の着色に着色した人工真珠（比重 $\delta=1.60$ ）を用いた。実験は一層以上の底質移動が生じる表1に示す実験条件で行なった。

3. 実験結果

図2は、FLVにより測定した移動層内の瞬間流速の時間変化の一例を示したものである。鉛直座標では流れを静止させた時の表面の底質粒子の上端をゼロとし、鉛直上向きを正とした。位相は主流反転時を0とした。この図より移動層内の流速変化の特徴として以下のことがわかる。①流速振幅は移動層の下方に行くに従って小さくなる。②移動層内部の流速変化の位相は主流よりかなり進んでいる。 $z < -1\text{cm}$ では $1/3\pi$ 程度であり、層流の場合（ $1/4\pi$ ）よりも進んでいる。③ $z \geq 0$ の比較的低濃度の小さい領域では高周波の強い乱れが存在するが、 $z \leq -1\text{cm}$ の高濃度の領域では乱れは弱く低周波となっている。④ $z \leq -1\text{cm}$ では、主流の減

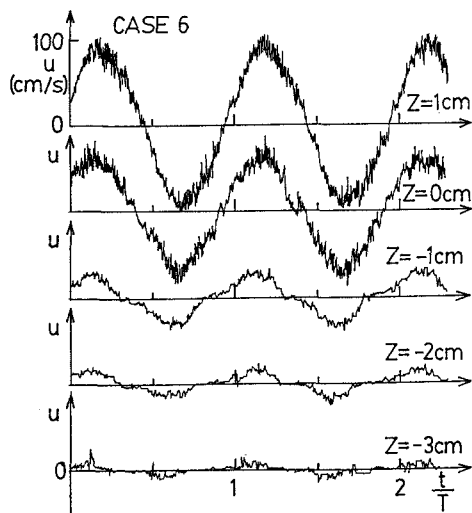


図2 移動層内の瞬間流速の時間変化(LDV)

速時には流速がゼロになる部分が存在し、深い位置ほどこれが起こる位相が早くまた長い時間続いている。これは、図3からわかる様に、深い位置の高濃度の部分では、粒子速度と水粒子速度がほぼ同じであり、減速時に粒子は流れより受ける逆圧力勾配と粒子相互の摩擦により速度の小さな深い所ほど早い位相で停止する(位相 $3/4\pi$ 参照)ためである。

図3は、各位相における水平方向のアンサンブル平均流速(図中の○印)の鉛直分布の一例を示したものである。流速測定は $Z \geq 1\text{ cm}$ ではLDV、 $Z \leq 0.8\text{ cm}$ ではFLVを用いて行なった。図中には▲印で底質粒子の移動速度も示してある。この図および移動状況の観察から、次のことがわかる。①移動層が生じるため、その内部の流速は、固定床の場合とはまったく異なる。②層流の場合よりも早く逆流が発生し、位相 $3/4\pi$ で静止時底面($Z=0$)付近に顕著な流速の先走りが起こる。③底質粒子との相対速度に着目すると、移動層内の下方($Z < -1\text{ cm}$)では、濃度が高いため水粒子は底質粒子とほぼ同じ速度で移動しているが、それより上方($Z > -1\text{ cm}$)では底質粒子の慣性が水粒子のそれより大きい。加速時には水粒子速度のほうが、減速時には粒子速度の方が大きくなっている。④図には示していないが、底質粒子の鉛直方向の速度は、特に

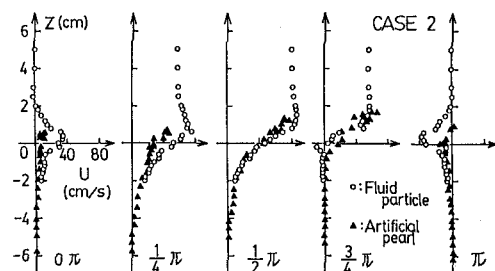


図3 流れおよび粒子の速度の鉛直分布

移動層の中間領域で正負にちらびっており、この領域では粒子相互の突による運動量の輸送が重要な役割を果たしている。⑤移動状況の観察によると、移動層の下層では粒子は直下の粒子を乗り越える様に移動している。

図4は、粒径が 5 mm の各ケースについて底質粒子速度 U_p の鉛直分布を示したものである。横軸は U_p を流速振幅 U_m で、縦軸は鉛直座標 Z を移動層厚 δ_s で各々無次元化している。移動層は時間的に変化しているが δ_s はその最大値と定義した。移動層厚 δ_s は移動量の静止時の厚さ、すなわち静止時底面($Z=0$)から移動層の下側の面までの距離である。本研究では移動層の下側を、移動しない下の粒子を一個分だけ乗り越える位置とした。各ケースにおける δ_{s1} 、 $\delta_{s1}=6.6\text{ cm}$ 、 $\delta_{s2}=5.2\text{ cm}$ 、 $\delta_{s3}=3.7\text{ cm}$ 、 $\delta_{s4}=1.5\text{ cm}$ である添字はケースNo.を示す。位相 $1/2\pi$ 、 $3/4\pi$ の $Z>0$ の領域を除き、各ケースでよく一致しており相似形になっていることがわかる。位相 $1/2\pi$ 、 $3/4\pi$ の $Z>0$ の領域で分布が異なるのは、流水の条件が変わってもSalutation高さが移動層厚の変化ほど変わらないためと考えられ

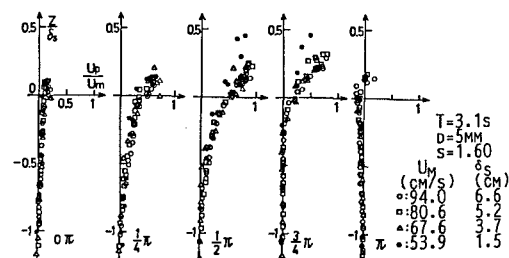


図4 底質粒子速度の鉛直分布の比較

る。

移動層内の粒子に働く外力としては次の3つが考えられる。底質粒子と水粒子の相対速度に起因する抗力、粒子相互の衝突による鉛直方向の運動量輸送と主流の時間変化に起因する圧力勾配による力である。最初の2つの外力は、移動層の上層と中層で支配的な役割を果たしている。一方、最後の外力は、下層および流速の小さい位相で支配的である。

4. 理論的考察

3. でシートフロー状態の砂移動機構の特徴が明らかとなった。本研究では、第一歩として次の5つの仮定の下で解析を進める。①上層と中層では底質粒子と流体粒子の相対速度が存在するがここでは移動層全層にわたって相対速度のない濃度 C を持つ混相流と考える。②移動層内のせん断応力には粒子相互の衝突に起因するものと流体の鉛直方向の運動量輸送に起因するものがあるが、両者を含めて移動層を仮想的な粘性係数 μ をもつニュートン流体と考える。③移動層下面位置は時間的に変動するが、最大深の位置を下面とした。④移動層は薄く境界層方程式が適用できる。⑤濃度 C は時間的には一定で鉛直方向のみ変化する。実験結果をそのまま用いる。以上より基礎式は次式となる。

$$\left\{1 + (S-1)C\right\} \frac{\partial u}{\partial t} = U_0 \cos \omega t + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1)$$

ここに、 u : 混相流の速度、 S : 底質粒子の比重、 ρ : 流体の密度、 y は移動層下面をゼロとし鉛直向上向きを正とした。境界条件は、 $y=0$ で $u=0$ と境界層外縁で流速 u は $u=U_0 \sin \omega t$ である。問題となるのは μ の評価であるが、ここでは、高濃度の範囲まで有効な Elies⁶⁾の式(2)を用いる。

$$\mu/\mu_0 = \left\{1 + 1.25C / (1 - 1.35C)\right\}^2 \quad (2)$$

流速分布は、式(1)を無次元化し前進差分による数値計算から求めた。

次に実験値と理論の比較を行なう。またここでは同時に、Ahilan⁹⁾による理論曲線との比較も同時に行なう。著者等の実験結果において、粒径5mmに対しては粒径が大きいことから濃度に対するデータが荒く、粒径3mmに対しては濃度測定を行なっていないので、実験値としては濃度分布と流速分布両者を測定している

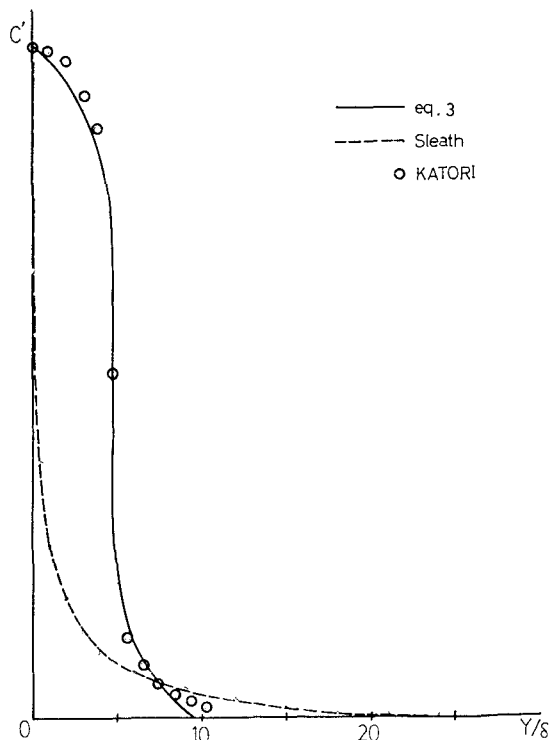


図5 一周期平均濃度分布

香取¹⁾の結果を用いる。

図5は、香取により得られた濃度分布の実験結果(○印)である。この濃度 C' は静止状態を1とした相対的な体積濃度であり、静止状態の濃度 C と0.65とすると $C = 0.65C'$ の関係がある。また、 y はストークス層厚 $\delta = (2\nu/\omega)^{1/2}$ で無次元化している。香取らの結果は各位相ごとに得られているがそれを平均して求めた。実線は実験値を式(3)で近似したものである。

$$C' = -\left\{(y/\delta - 4.67)/150\right\}^{1/2} + 0.5 \quad (3)$$

図6は各位相ごとの速度分布について示したものである。○印が実験値、実線は式(3)を用いた計算結果、破線はAhilan⁹⁾らの流れを乱流とした時の結果である。Ahilan⁹⁾らの解析では時間的平均濃度も計算されそれを図5に破線で示す。なお香取の実験結果は位相が1/30πずれていると判断されたので、香取の0πを1/30πと修正した。実験値は境界層の厚さがある、で述べたのと同様に時間的に変化しているので理論との比較が難しいが、全体的に本理論もAhilan⁹⁾らの理論も同程度に

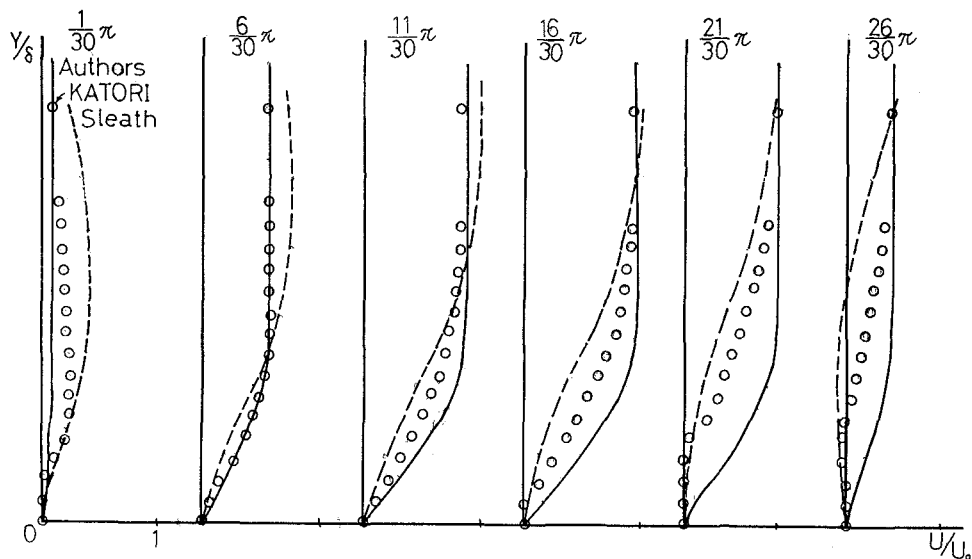


図6 流速分布の位相変化

実験値を説明している。実験値を流速がゼロから増加する点を $y=0$ として書きかえれば、本理論とかなり良く一致することがわかる。また、境界層厚は本理論、実験値、Ahilan らの順で厚くなっている。Sleath の濃度分布の計算結果を見ると、 $y=0$ 付近から実験値よりも急激に減少している。Sleath の用いた u^*/u を計算してみると高濃度のところで非常に大きな値をとっており、これが原因と考えられる。

5. おわりに

本研究で得られた結果を要約すると以下の様である。

- ① 光ファイバーレーザー流速計を用いた高濃度の移動層内の流速の測定から移動層が存在する場合の振動流境界層の特性を定量的に把握した。
- ② 底質粒子の移動速度、移動形態を明らかにした。
- ③ 底質粒子と水粒子速度の同時測定により移動層内の底質粒子がどのような外力を受けて移動しているかを明らかにした。
- ④ 移動層を混相流とみなし、境界層方程式を用いた解析を試み、かなり実験値を説明できることがわかった。

参考文献

- 1) 香取完和・渡辺 晃・堀川清司：シートフロ－状態の底質移動に関する研究，第27回海岸工学講演会論文集，pp. 202～206，1980
- 2) 沢本正樹・山下俊孝：波による半周期源砂量，土木学会論文報告集，Ⅱ，No. 363，1985
- 3) Ahilan R.V. and J. F. A. Sleath：Wave induced Bed Load Transport，Seabed Mechanics，pp.183～189，1984
- 4) 榎本 亨・出口一郎・松山 章：掃流砂の移動層厚と移動速度に関する一考察，第31回海岸工学工学講演会論文集，pp.277～280，1984
- 5) 香取完和：シートフロ－現象の定式化に関する研究，土木学会第41回年次講演会論文集，pp.567～568，1986
- 6) Eilers, H. (1941)：Kolloid，Z. = 97，P.313.