

移動床上の振動流境界層とシートフロー状砂移動に関する研究

山下俊彦*・沢本正樹**・武田秀幸***・横森源治****

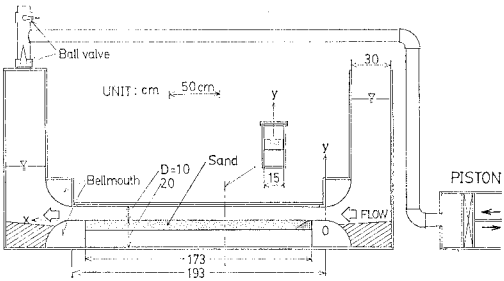
1. ま え が き

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。これは主に碎波帯内および碎波帯付近で起る現象であり、多量の砂移動が生じるので海浜変形を取り扱う際に重要である。このため、シートフロー状砂移動に関する研究は造波水路ではなく大きな流速を発生させることができる振動流装置を用いて行われている^{1),2)}。一般に、漂砂を取り扱う場合、砂移動形態、移動量等は、砂粒子に働く流体力を固定床の底面せん断応力から評価した無次元のせん断応力であるシールズ数で議論されている。しかし、シートフロー状態では多層の砂移動が生じるため、砂粒子に働く流体力を固定床の底面せん断応力から直接評価することはできないと考えられる。移動床上の振動流境界層に関する研究は測定が困難であるため行なわれておらず、シートフロー状砂移動についてはその物理機構まで立ち入った議論ができないのが現状である。

本研究では、まず、光ファイバレーザ流速計³⁾を用いて高濃度の砂移動が生じている移動層内部の流速まで測定することにより、移動床振動流境界層の特性を明らかにする。また、この特性をより明確にするため固定床の場合の測定結果とも比較検討する。次に、この流れの下での底質粒子の移動形態、移動速度を調べ、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、シートフロー状砂移動の物理機構を考察した。

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一に示すU字管振動流装置を用いた。この装置は、前報²⁾の装置に振動流風胴を接続したものである。U字管内の水の固有周期と振動流風胴の周期を一致させ、共振状態にすることにより、時間的に流速振幅の変動の極めて少ない安定した正弦振動流を発生させることができる。移動床の場合には、下側のベルマウスのところに図



図一 実験装置

で斜線で示す様な物品を取り付け、振動流により左右にこぼれる粒子は逆流時に再び戻る様にし、長時間同じ現象が繰り返す様にした。

流速測定にあたっては、レーザ流速計と光ファイバレーザ流速計（以下各々 LDV, FLV と略記）を用いた。FLV を用いると光路長を短くすることができ高濃度中の流速測定に有利である。底質粒子の移動状況を 16 mm 高速度カメラおよびシャッター付ビデオカメラで撮影し、移動形態、移動速度等を把握した。

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 3 mm の色数に着色した人工真珠（比重 $s = 1.58$ ）を用いた。実験は一層以上の底質移動が生じる表一に示す様な実験条件（周期 T は 3.1 秒に固定）で行った。なお、Case 9 は移動床と固定床の振動流境界層を比較するため、Case 2（移動床）とはほぼ同じ流れの条

表一 実験条件

Case	周 期 T (s)	流速振幅 u_m (cm/s)	粒 径 d (mm)	底面の状態
1	3.1	94.0	5.0	移動床
2	3.1	80.6	5.0	移動床
3	3.1	67.6	5.0	移動床
4	3.1	53.9	5.0	移動床
5	3.1	98.5	3.0	移動床
6	3.1	84.9	3.0	移動床
7	3.1	71.7	3.0	移動床
8	3.1	55.7	3.0	移動床
9	3.1	83.8	5.0	固定床

* 正 会 員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科
** 正 会 員 工博 東北大学助教授 工学部土木工学科
*** 正 会 員 鹿島建設
**** 学生会員 東京工業大学大学院 総合理工学研究科

件で底質粒子を粗度にした固定床で実験を行なったものである。底質粒子の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。以下に主に粒子5mmのもの(図-2のみ粒子3mm)について述べる。

3. 移動床振動流境界層

3.1 移動層内の瞬間流速

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1例を示したものである。図-3に、比較のためLDVにより測定した結果の1例を示す。測定位置はFLVの場合側面から2.5mmの場所、LDVの場合3.5cmの場所である。位相はすべて主流反転時を0とした。鉛直座標 z は、移動床の場合、流れを静止させた時の表面の底質粒子の上端をゼロ、固定床の場合粗度要素の上端をゼロとし上向きを正とした。図-2, 3に示した結果は各々粒径3mm, 5mmの場合のものであるが、両者ともほぼ $-5\text{cm} < z < 2\text{cm}$ の範囲で移動層が生じている場合のものである。図-3に示したものは $z=0.8\text{cm}$ の位置の移動層上部の比較的高濃度の小さい場所の測定結果であるが、減速時に粒子がレーザービームを

遮るためホールドが多く正しい流速が測定されていない。なお、この条件で $z < 0.6\text{cm}$ 以下は全位相にわたってホールドが多くLDVでは測定が困難であった。一方、FLVを用いた場合には、図-2に示す様に移動層下部の非常に高濃度の部分まで測定が可能であり、FLVは移動層内の流速を測定するのに有効である。

図-2より移動層内の流速変化の特徴として次のことがあげられる。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は主流よりもかなり位相が進んでいる($z < -1\text{cm}$ では $1/3 \cdot \pi$ 程度)。③ $z \geq 0$ の比較的高濃度の小さい部分では高周波の強い乱れが存在するが、 $z \leq -1\text{cm}$ の濃度の高い部分では乱れは弱く低周波となっている。④ $z \leq -1\text{cm}$ では、主流の減速時にはほぼ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継続している。これは、図-4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になっており、減速時に粒子は流れより受ける逆圧力勾配と粒子どうしのかみ合せにより速度の小さな深いところほど早く停止する(位相 $3/4 \cdot \pi$ 参照)ためである。

3.2 平均流速の鉛直分布

図-4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)の鉛直分布を示したものである。なお、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。この図より、①移動層が生じるため、その内部の流速はまったく異なること、②層流の場合よりも早く逆流が発生し、位相 $3/4 \cdot \pi$ で静止時底面付近に顕著な流速の先走りが起こること、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、上方($z > -1\text{cm}$)では加速時に水粒子速度の方が大きく、減速時には粒子の慣性が大きいため粒子の速度の方が大きくなっていること等がわかる。

3.3 移動床と固定床の比較

図-5と図-6は、各々平均流速 u 、乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ について移動床と固定床の結果を比較したものである。なお、平均流速、乱れ強度は流速振幅 u_m で無次元化している。高濃度の粒子が存在している場合の乱れを定義することは難しく、またLDVとFLVでは測定する側壁からの位置が異なり測定条件が少し違うため、比較の対象する移動床のデータはLDVにより測定した $z \geq 0.8\text{cm}$ のものとした(固定床の流速もLDVにより測定)。 $z \approx 0.8\text{cm}$ 付近でも減速時に比較的高濃度の粒子が通過し正しい流速が測定できない(図-3参照)ので、これらのデータは図中ではカットしている。移動床と固定床を比較する場合、移動床の場合の座標原点をどこに取るかが問題となる。移動層が生じた場合には座標原点

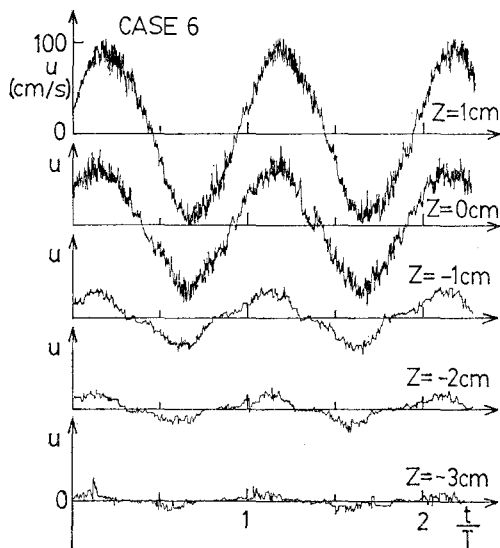


図-2 移動層内の瞬間流速の時間変化 (FLV)



図-3 LDV による移動層内の流速測定例

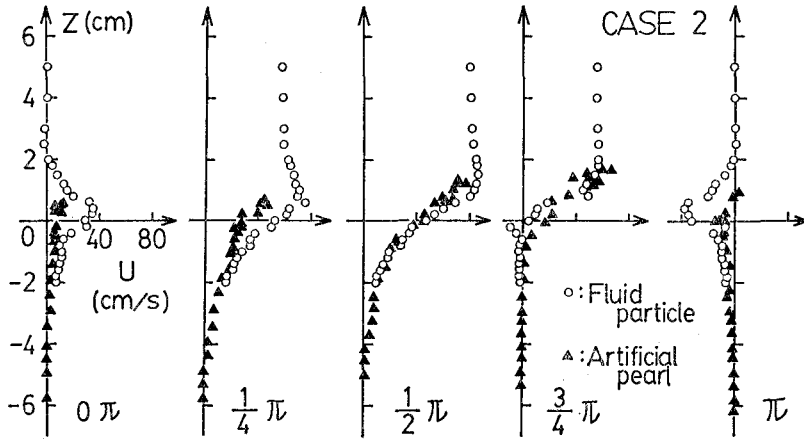


図-4 流れおよび粒子の速度の鉛直分布

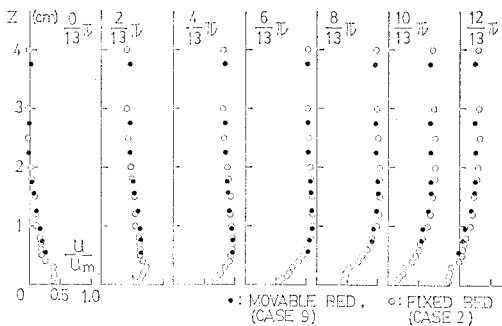


図-5 平均流速の鉛直分布 (移動床と固定床の比較)

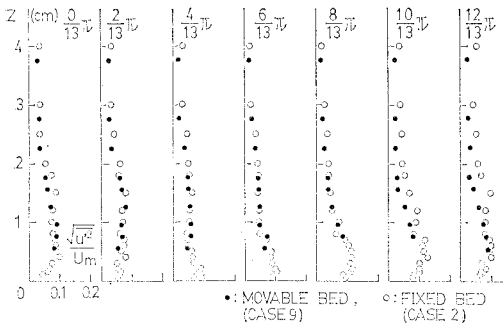


図-6 乱れ強度の鉛直分布 (移動床と固定床の比較)

を下げる方がよいことは明らかである。しかし、正確に決定することは難しくある範囲を持たせて決定せざるを得ない。両図に示したものは移動床の場合の原点を $d/2$ だけ下げたものである。図-5 を見ると、平均流速は両者でよく一致している。図-6 によると、乱れ強度は加速域ではほぼ一致しているが、減速域の $z=1.5$ cm 付近で移動床の方が小さくなっている。また、図には示していないが瞬間流速の時間変化を見ても、固定床の場合には最大流速時から減速時に高周波の激しい乱れが発生しているのに対し、移動床の場合にはこれがあまり顕著でない。これは、移動床の場合底面が動くために

上下方向の速度勾配が小さくなる等の理由により減速時の激しい乱れの発生が少し抑えられたものと考えられる。粗面振動流境界層についての研究は、固定床の場合でさえあまり行なわれておらず、今後研究を進めその特性を明らかにして行く必要がある。

4. 底質粒子の移動機構

図-7 に、16 mm カメラ (64 コマ/秒) で撮影した画面を解析することにより求めた底質粒子の半周期間の移動軌跡の一例を示す。X は移動開始位置からの水平方向の距離である。解析には、壁面から離れた粒子の軌跡を用いるのが理想的であるが、これは実際には困難である。そこで本研究では側面に接する粒子の軌跡を用いた。おな、Case 2 について、側面に接する粒子とそれより一層奥の粒子の半周期間の移動距離を調べた結果によると、奥の方の粒子の方が2割程度大きかった。図-7 および底質粒子の移動過程の観察から、どの位置の粒子も半周期間に 1 step の運動 (すなわち、半周期間に一度動き出した粒子が一旦停止し再び動き出すことがない) をすること²⁾が確認された。表面付近の粒子 ($z \approx 1$ cm) の運動は、1 step が連続した数回の saltation か

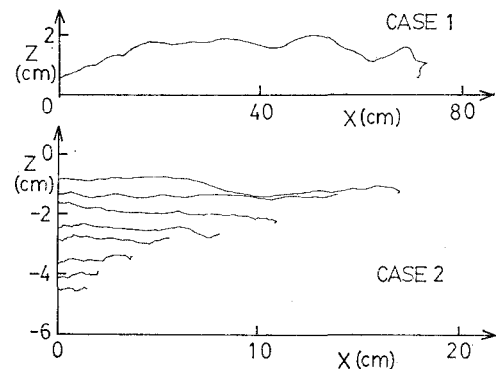


図-7 底質粒子の半周期間の移動軌跡

らなっていることがわかる。1 step が全体として上に凸の曲線となっていることは移動層全体が粒子相互の衝突により膨張したことに対応している。移動層の下方の粒子 ($z_0 \approx -4$ cm) は、その粒子のすぐ下の粒子の上をすべる様に1つの層をなして移動する。中間の層の粒子 ($z_0 \approx -1$ cm) は、回りの粒子と頻繁に衝突しながら移動する。この時、最大2粒径程度上下方向に移動する。

図-7 の様な底質粒子の移動過程の解析および 図-4 から移動層は機構の異なる次の3つの層に大別して取り扱う方が良いと考えられる。移動層の上部に位置する第1層では、粒子と流れの速度差が大きく、粒子にはこの相対速度による抗力が支配的に働いている。図-8 に、図-7 に示した一番上の軌跡の粒子の移動速度を示す。この図より、着目した粒子は他の粒子との衝突により数回の連続した saltation 運動をするが、この衝突による粒子速度への影響は小さく、第1層では粒子どうしの衝突の効果は重要でないと考えられる。移動層の下部に位置する第3層では、流れと粒子はほぼ同じ速度を持つため粒子に働く流体力としては流れの圧力勾配が支配的に働くと考えられる。この領域では、粒子は圧力勾配によ

り早い位相から動き出し、減速時には圧力勾配が逆転するため慣性の小さな下層から順次静止する。濃度はほぼ静止状態の場合と同程度に高く、粒子は上下方向の速度勾配が小さいために下の粒子の上を乗り越える様に移動しており、粒子間の抵抗も重要と考えられる。第2層は、大きな速度を持つ第1層と速度の小さな第2層との遷移層であり、濃度が比較的大きく粒子相互の衝突が頻繁に起る。このため、抗力等の流れから受ける外力ばかりでなく粒子どうしの衝突による外力も重要となる。以上の様に、底質粒子に卓越して働く流体力は層によって異なり、簡単に固定床のせん断応力から直接見積ることはできない。

図-9 は、粒径が 5 mm の各ケースについて底質粒子速度 U_p の鉛直分布を比較したものである。横軸は U_p を流速振幅 u_m で、縦軸は鉛直座標 z を移動層厚さ δ_s で各々無次元化している。移動層厚さ δ_s は、移動層の静止時の厚さ、すなわち静止時の底面 ($z=0$) から移動層の下の方までの距離である。本研究では移動層の下面を、移動しない下の粒子を1個乗り越える位置とした。各ケースにおける δ_s の値は、 $\delta_{s1}=6.6$ cm, $\delta_{s2}=5.2$ cm, $\delta_{s3}=3.7$ cm, $\delta_{s4}=1.5$ cm である。添字はケース No. を表わす。4 ケースとも全位相にわたって粒子速度の勾配の折れ曲り点があることがわかる。この位置は、前述の第2層と第3層の境界と考えられる。また折れ曲り点の位置は各ケースであり変らないことがわかる。折れ曲り点より下側は各ケースでよく一致しており相似形となっている。一方上側は、各ケースで異なっている。ケースごとに見てみると、ほぼ直線分布でその勾配は位相によらずほぼ一定であることがわかる。無次元の速度勾配は流速振幅 u_m が小さいものほどゆるくなっている。こ

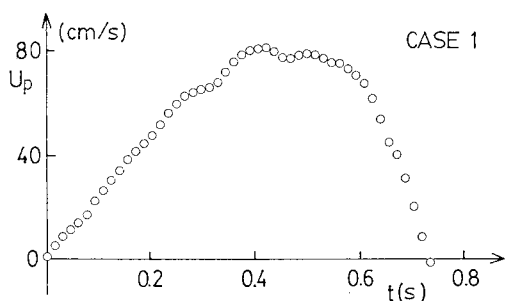


図-8 底質粒子の移動速度の時間変化

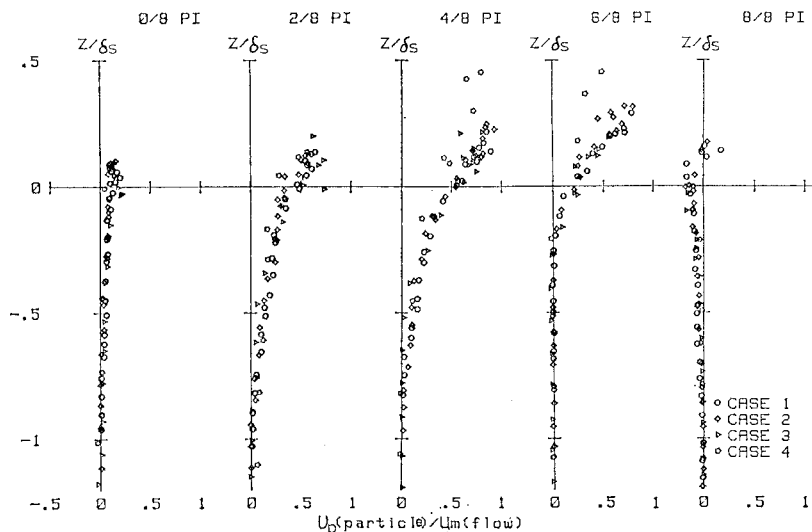


図-9 底質粒子速度の鉛直分布の比較

れは、流れの条件がかわっても saltation 高さが移動層厚の変化ほど変わらないためと考えられる。

位相ごとに各層の変化をみてみると、位相 $0\pi, \pi$ では、大部分が流れの圧力勾配により移動した第3層であり、上方に粒子の慣性が水より大きいため saltation をしている第1層の粒子が残っている。位相 $1/4\cdot\pi$ になると新たに saltation の層（第1層）と粒子相互の衝突が激しく起こる第2層が移動層の上部に形成される。第3層は圧力勾配により加速されて位相 0π よりも大きい速度で移動する。 $1/2\cdot\pi$ 位相では、第1層と第2層の厚さが粒子相互の衝突を通して発達している。第3層の速度は、圧力勾配による加速力と粒子相互の抵抗による減速力とが相殺しあうためあまり変化していない。位相 $3/4\cdot\pi$ では、圧力勾配が逆転するため、慣性力の小さな第3層の粒子は静止する。以上の様に、非定常流のため、前述の3つの層は時間とともにその厚さが変化する。

図—10 に、Case 1～Case 4 の場合の半周期移動距離 l を示す。縦軸は、着目した粒子の移動前の鉛直座標 z_0 を移動層厚さ δ_s で、横軸は、その粒子の移動距離 l を水粒子振幅 d_0 で無次元化したものである。各ケースとも、移動層の上部の l/d_0 が7割に達する様な移動距

離の大きな領域と下方に行くに従って移動距離が小さくなる領域に分けられる。2つの領域の境界では移動距離が不連続的に変化し、その位置は流速振幅の大きい方が z_0/δ_s の値は小さくなっている。移動距離の大きな上部は、粒子が saltation 運動をしている領域に対応し、流速振幅が大きくなるにつれて、漂砂量に占める saltation 運動による移動量が減少することがわかる。

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 光ファイバレーザ流速計を用いて高濃度の砂移動が生じている状態での流速を測定することにより、移動床上的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、移動距離、移動形態を明らかにした。

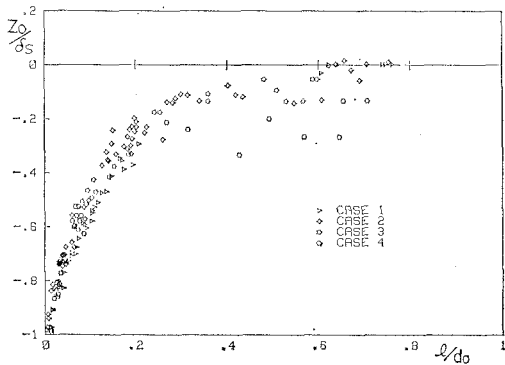
③ 粒子移動と流体運動との相対速度および粒子の移動形態を基に、粒子に働く外力に着目して移動機構を考察し、移動層を機構の異なる3層に分けて取り扱うことが適当であることを指摘した。

今後は、シートフロー状砂移動の物理機構のモデル化を行ない、力学的に漂砂量の算定を試みる予定である。

本研究に対し、東京工業大学土木学科研究奨励金の補助を受けた。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 香取完和・渡辺 晃・堀川清司：シートフロー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・山下俊彦：波による半周期漂砂量，土木学会論文報告集，II，No. 363，1985.
- 3) 沢本正樹・日野幹雄・山下俊彦・広永勝治・村本龍夫：光ファイバを用いたレーザドブラ流速計の開発，東工大土木工学科研究報告，No. 33，pp. 25～35，1984.
- 4) 横森源治・沢本正樹・山下俊彦・武田秀幸：粗面平板上の振動流境界層の研究，第40回年次学術講演会講演概要集，pp. 383～384，1985.



図—10 半周期移動距離の鉛直分布