

シートフロー状砂移動の力学特性に関する実験的研究

八木 宏*・灘岡和夫**・大前晋一***

1. はじめに

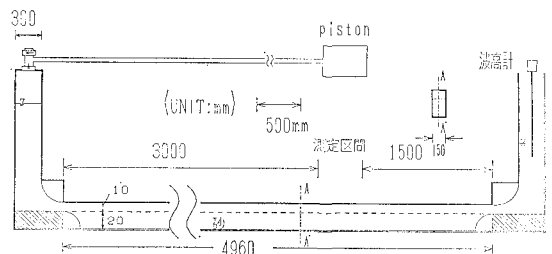
シートフロー状砂移動に関しては、その海浜過程に占める役割の重要性から、最近活発に研究が行われるようになってきている。室内実験に基づいたものとしては香取ら(1980)や山下ら(1984)などの研究があり、山下ら(1984)はそれらのデータに基づいていわゆる「半周期漂砂量」の算定式を提案している。それに対して灘岡ら(1988)は、波動場のもとでは振動流場と異なり主流波形が対称な正弦波でも net の漂砂量が生じることを理論解析の結果から明らかにしている。このことは、上記の「半周期漂砂量」の概念でシートフロー現象を表現することに限界があることを意味している。そこで灘岡ら(1989)は、任意波形の波動場でのシートフロー現象を解析するための有力な研究アプローチの一つとして『数値移動床』の開発の重要性を主張し、その第一段階として簡単な構成則を用いた数値モデルを提示している。

同様な数値モデル構築の試みは浅野 (1989) によっても行われているが、この方向でのアプローチが成功するか否かは、シートフローの実際の物理過程を反映したモデル化がどこまで可能かという点にかかっている。より具体的に述べると、シートフローのように高せん断力下でのかなり広い濃度レンジを有する砂-水二相系をモデル化するためには、特に層内での物質ならびに運動量輸送過程をモデル化する必要があるが、シートフロー層の力学過程の実態が室内実験においてもこのような観点からはほとんど調べられていないため、現時点では Bagnold (1956) 的な簡単な構成則に依存するしかないというのが現状となっている。

したがって、『数値移動床』の開発にあたってはそれと併行してシートフロー層の物理過程の実態を明らかにしていくことが必要となるが、シートフローの場合には室内実験そのものがかなり困難を伴うという側面もっている。実際、過去に行われた実験例を見ると以下のよう

な問題点がある。①多くの場合、粒子移動速度を可視化計測し易くするために大粒径の人工軽量粒子を用いているが（例えば山下ら（1984）、山下ら（1985））、粒子間の噛み合いや流体の乱れへの追従性の違いから、その移動形態が砂の場合とかなり異なっている可能性が高い、②砂を用いた実験は香取ら（1980）によって行われているが、単純な画像計測によっているため高濃度領域での平均粒子速度の計測が不可能になっている、③シートフロー層内の粒子間運動量伝達を支配している粒子自身の乱れ強度が計測されていない、④またそれに関連してシートフロー層内の大規模渦構造の特徴が把握されていない、といった点である。

そこで本研究では、高濃度領域の測定も可能な計測法を新たに考案して砂を対象としたシートフロー実験を行い、砂粒子の乱れ強度も含めた速度測定を実施し、同時に、可視化によってシートフロー層内の大規模渦構造の特徴を抽出することにより、シートフロー状砂移動の本質的な特徴を明らかにすることを試みた。



圖—1 實驗裝置

表-1 實驗條件

case	流速振幅 (cm/s)	周期 (s)	シーلز数 (Ψ_m)
1	208	6.3	1.26
2	277	6.4	2.07

* 正 員 工 修 東京工業大学助手 工学部土木工学科

正員 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科

*** 学生員 東京工業大学大学院

2. 実験方法

(1) 実験装置・実験条件

今回用いた実験装置は、図-1に示すようなアクリル製のU字管振動流装置である。実験は、その水平部約5mの区間に中央粒径0.8mm、比重2.65の珪質砂を一定の厚さに敷きつめ、そこに振動流を作用させることでシートフローを実現し、砂粒子速度・濃度の測定および砂粒子運動の可視化を行った。なお、実験条件は表-1に示すように、現象の主要な支配パラメーターであるシェールズ数を変化させた2ケースとしたが、速度および濃度計測については流速振幅が大きいCase 2についてのみ行った。

(2) 砂粒子速度・濃度の計測法

大粒径の人工粒子の場合と異なり、砂を底質として用いると微小領域に多数の粒子が存在することから、特に高濃度領域や粒子が激しく乱れて移動する場合には単純な画像計測では粒子の追跡が不可能になる。ここでは画像上に現れる見かけ上の粒子の数を減らすことによってこのような難点を回避することを試みた。具体的には、砂粒子を黒く着色し、その中にトレーサーとして白く着色した砂を混入してそのトレーサーのみが画像上に記録されるようにした。

具体的な計測システムの詳細は図-2に示すとおりである。今回はこのシステムを用いて、カメラのシャッターが1回開閉する間に4回ストロボを発光させるようにストロボとカメラをコンピュータで制御し、微小な時間間隔(0.015s)の連続した4時刻の画像を一枚の写真上に重ねて撮影した。このとき、4時刻のトレーサー粒子画像はその移動方向がわかるようにするために一番はじ

めの時刻のものがより明るく写るようにストロボの光量をセットすることによって粒子画像の始点を判別できるようにした。粒子速度は、このようにして得られた写真から各粒子の変位量を測定することによって求めた。

(写真-1は、主流速が右向きの際のトレーサーの画像の一例である。)なお今回、速度計測のために連続した4時刻の粒子軌跡を用いたのは、粒子変位の最初と最後の2時刻データだけだと、対象とするトレーサーの近傍に他のトレーサーが多く存在する場合、位置の同定が困難になるからであり、また粒子軌跡を一本の線状の軌跡として撮影しなかったのは、このような撮影方法ではカメラのシャッター膜の移動性能から、高速物体の移動量を精度よく求めることができないからである。

つぎに、このようにして得られた粒子速度データから粒子の平均速度と乱れ強度の鉛直分布を求める方法について説明する。まず対象とする現象が水平方向に統計的に一様であると仮定して写真上の領域を0.5cmの鉛直幅の短冊状の小領域に分割する。そして、各領域に含まれる粒子の速度の空間平均をとり、さらにその位相平均(サンプル数16)をとることで粒子の平均速度を算出し、それからの偏差として乱れ速度を定義して上記と同様の平均操作によって乱れ強度を求めている。ただし今回の様な粒子追跡による速度計測法では粒子はその追跡時間 Δt (ここでは0.045s)内に何回かの粒子衝突を経験することから、ここでいう乱れ強度は各瞬間でのいわゆる乱れ強度とは異なる。(もっとも、そのような乱れ強度は実際には計測しえない。)すなわちここでいう乱れとは Δt 間のいわば“ならした”乱れ強度である。また、空間平均をおこなう領域については空間分解能を上げるためにはなるべく小さくした方が良いわけだが、逆に小さくしすぎるとデータの統計的な安定性が低下することになる。そこでここでは、両者のかねあいを考慮しつつ試行錯誤的にこの幅を0.5cmと決定した。さらにアンサンブル平均の数については、今回は実験上の制約から16しかとれなかったため今後さらに検討の余地があるが、結果として得られた図-4の速度分布形を見ると分布にさほど大きながたつき等が見られないことから、比較的妥当な結果を与えているものと考えられる。

つぎに、粒子濃度の測定方法について述べる。これについてもやはりトレーサーを用いた方法で計測を行なった。具体的には、側壁画像上に写るトレーサーの個数を速度測定と同じ短冊状の各小領域ごとに求め、それを粒子が完全に静止していると考えられる小領域のトレーサー粒子数で割ることによって濃度をもとめた。なお、濃度計測においては速度の時のように粒子の対応づけをする必要がないため、測定データの統計的な安定性を考慮して、速度計測時よりもさらに多量のトレーサー粒子を

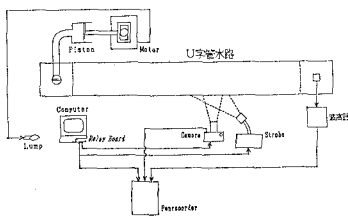


図-2 計測システム(平面図)

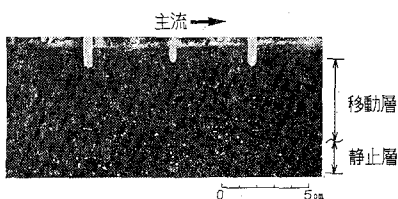


写真-1 トレーサー画像の例

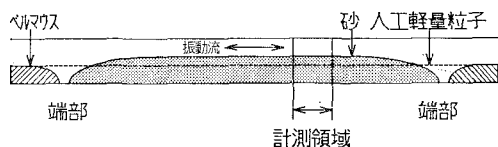


図-3 測定区間端部の影響

混入させている。ただしこの方法だと低濃度領域において水路奥行き方向に存在するトレーサーも写ってしまう。そこで今回は水を黒いポスターカラーで着色することにより水路奥行き方向の像をカットすることでこの問題を回避するようにした。

(3) 計測対象領域および計測開始時刻について

底質として砂を用いると、砂を敷き詰めた区間端部に洗掘が生じ(図-3 参照)、その部分から砂が舞い上がってそれが流下方向に影響を及ぼすという現象が生じた。このような端部の洗掘は、人工軽量粒子のような粒子どうしの噛み合わせがゆるい底質を用いた従来の実験では起こりにくい現象であり、今回、より現実に近い底質として砂を用いたために生じた問題である。これについては、洗掘そのものを防ぐことが不可能であるため、図-3 で主流が右向きとなる半周期のみを測定対象として、砂面の水平性が保たれる程度下流側に測定区間を設けることによって上流側端部の影響がなるべく小さくなるようにした。

また、やはり端部洗掘の影響と考えられるが、端部で洗掘された砂が水路中央部に集まるため初期砂面に近い状態で平衡状態を実現することができなかった(図-3 参照)。そこで、今回は一様な厚さに敷き詰めた初期状態砂面から砂面が平衡となるまで振動流を作用させた後に測定を開始した。

3. 砂粒子の速度及び濃度の測定結果

以上の計測法に基づいて、シールズ数が大きい Case 2 について砂粒子の平均速度・乱れ強度・平均濃度の鉛直分布を半周期中の 7 位相において測定した。図-4 はその結果を主流速波形とともに示したものであり、上からそれぞれ (a) 平均速度分布、(b) 乱れ強度分布、(c) 粒子濃度分布を示している。

固定床上の振動流境界層の場合では、主流の加速位相で乱れの発生が抑えられ逆に減速位相で乱れが爆発的に生成されることから、乱れ強度のピークが主流の減速位相で現れることが知られている(Hino et al, 1976, 1983)。しかしながら、図-4 からわかるように、シートフローの場合には、加速位相の比較的是やい段階から乱れが発生しており、 $\theta=0.35\pi$ ですでに最大流速以降と同程度の乱れ強度が出現している。また、今回得られたデータでは乱れ強度の平均レベルは平均速度の 10～

15% 程度であり、その分布形は加速位相では平均速度分布の変曲点付近をピークとするような分布形となっているが、最大流速以降は比較的一様な分布形になっていることがわかる。また、平均速度の鉛直分布が、加速位相で比較的に直線的な分布となっていることも今回の場合の大きな特徴である。

次に、濃度分布についてであるが、これについては加速位相の $\theta=0.35\pi$ あたりからすでに大きな底質の舞い上がりがあることがわかる。これは、前述の加速位相からの大きな乱れ強度の出現に対応していると考えられる。ただし、今回のデータについては、シートフロー層下縁の粒子混合がほとんどない領域で初期状態でのトレーサー濃度の非一様性によるバラツキが濃度値の測定結果に影響を与えていること、また、トレーサーの総量が各位相で保存されていないこと、などの問題点があることから、今後さらにその精度向上を図る必要がある。

4. シートフロー層内の大規模渦構造の可視化

以上のように今回の実験で固定床上での振動流の特徴と大きく異なった結果が得られた原因を探るため、シートフロー層内の可視化実験を行った。なお、可視化実験についてはシールズ数の小さい Case 1 についても併せて行っている。

まず、写真-2, 3 はシートフロー層の時間発展過程を主流の加速位相を中心にそれぞれのケースについて示

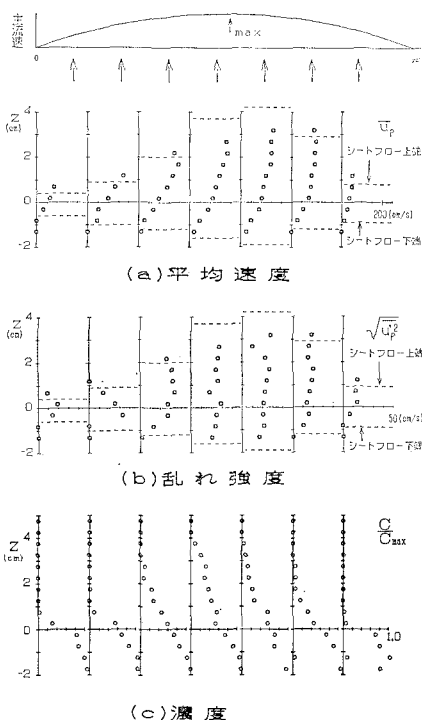
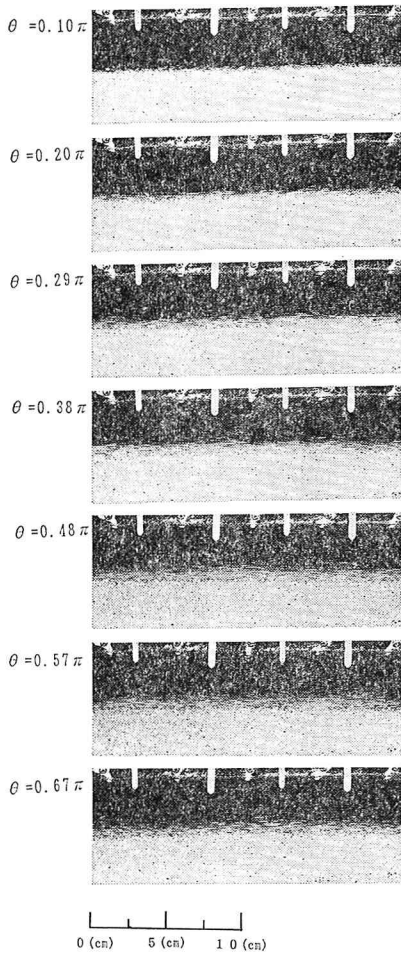
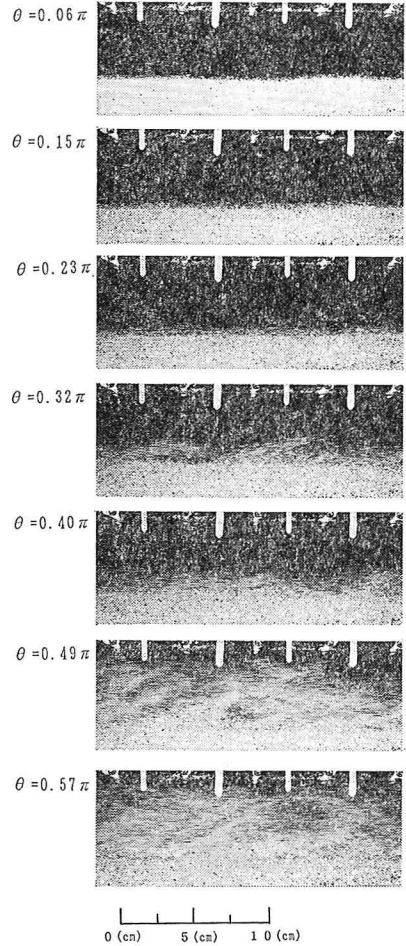


図-4 粒子の (a) 平均速度 (b) 乱れ強度 (c) 体積濃度の鉛直分布



写真—2 シートフロー層の経時変化(Case1: シールズ数小)

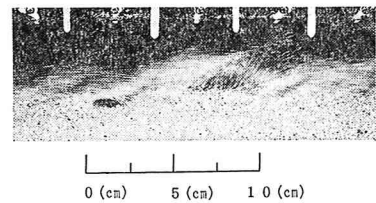


写真—3 シートフロー層の経時変化(Case2: シールズ数大)

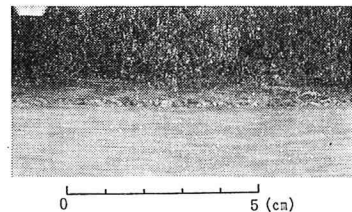
したものである。まずシールズ数が小さい Case 1 について見てみると主流の加速とともにシートフロー層厚は徐々に増加しているが、それは主流の減速とともにそのまま減衰してしまい、シートフロー層に特に大きな変化は現れていないことがわかる。

それに対してシールズ数が大きい Case 2 では、加速域初期にはその層厚を徐々に増大させていくものの加速域後半にはシートフローの上縁に揺動が現われ、それが最大流速位相付近で破裂するように大量の砂を巻き上げていることがわかる。(ただし、シートフロー層の破裂についてはこの Run では見にくかったため別の Run のものを 写真—4 に示している。) このような現象は、前述の速度測定における加速位相の大きな乱れ強度の出現に対応しているものと考えられる。

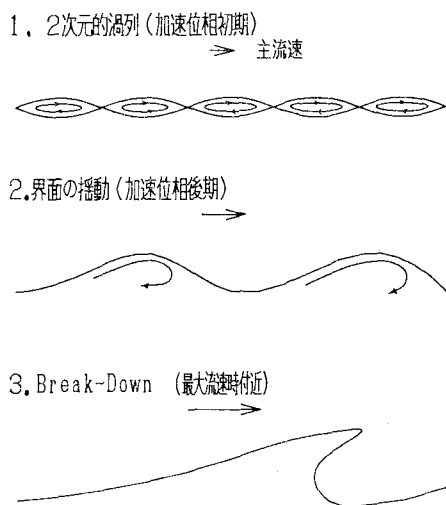
つぎに、このような加速位相におけるシートフロー層の発達機構の鍵が主流速加速位相の初期段階にあると考え、この時のシートフロー層内の様子を詳しく調べてみ



写真—4 シートフロー層の Break-Down ($\theta=0.49\pi$)



写真—5 シートフロー層内の渦列 (位相 $\theta=0.29\pi$)



図—5 シールズ数が多い場合のシートフロー層の発達過程(模式図)

た結果について述べる。写真—5 は、適当な速度で移動するフレームからその様子を撮影したものである。これを見ると、シートフロー層内に水路奥行き方向に軸を持つ長径 2 cm 程度の「楕円」状の明確な渦列が存在していることがわかる。加速位相でのこのような流軸に直角方向に軸をもつ渦列の発生は固定床振動流においては現れないきわめて特徴的な現象である。というのは固定床の場合には流れ方向に軸を持つ streak 構造が加速位相で支配的となることが知られているからである (Hino et al, 1983)。今回見いだされた渦列の発生は、人工軽量粒子を用いた八木ら (1989) の実験でも観察されており、シートフロー層の渦構造として一般的なものである可能性が高いが、その発生メカニズムは次のようなものであると考えられる。すなわち、高せん断力下で生じるシートフロー層内では大量の粒子が活発に運動し流動化していることから、砂-水二相系があたかも密度の異なる流体であるかのように振舞い、それによって密度せん断流における K-H 不安定渦列に似たものが生じると考えられる。

以上の結果から、シートフロー層の時間発展過程をまとめて模式的に示すと図—5 のようになる。すなわち、①まず加速位相の初期段階で水路奥行き方向に軸を持つ二次元的な渦列が発生する。②次にシールズ数の大きいケースではこの渦列が発達してシートフロー外縁に揺動が現れる。③この揺動は最大流速位相付近でさらに発達してついには break down し砂を大量に巻き上げる。

なお、シールズ数が小さいケースでは②以降の過程は見られず主流速の減少とともに層厚は減衰する。このように、同じシートフロー状砂移動でもその発展の特徴が

シールズ数の違いによってこのようになり異なってくるということも興味深いことであり、今後、この点についても検討する必要がある。

5. 結 論

今回新たに考案した計測法を用いて、従来測定例が少なかった砂を対象としたシートフローの実験を行った。その結果、速度の乱れ強度分布等において固定床の場合とかなり異なった特徴が存在すること、すなわち主流の加速域に比較的大きな乱れが存在することが明らかになった。また、可視化実験の結果から、そのような違いが特に加速位相に現れる二次元的な渦構造の発生・発達に起因するものであることが示された。

今回の計測はシールズ数が比較的大きい場合の 1 ケースのみについて行われたものであり、測定区間端部の影響に起因する主流速減速域の速度・濃度データの精度低下等については今後さらに改善の余地がある。今後は計測法の精度を上げることを試みるとともに、さらに幅広い範囲のシートフロー層の性質を明らかにしていくつもりである。

なお、本研究においては文部省科学研究費 (奨励研究 A : 『数値移動床』の提案とその開発に関わる砂-水混相系の運動量輸送過程のモデル化) の補助を受けた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 浅野敏之 (1989): 平坦移動上の振動流れの解析, 海岸工学論文集第 36 巻, pp. 249~253.
- 香取完和・渡辺 晃・堀川清司 (1980): 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.
- 灘岡和夫・上野成三・八木 宏 (1988): 波動場と振動流場に着目したシート・フローの理論解析, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 292~296.
- 灘岡和夫・八木 宏・山下さゆり (1989): 単層モデルによるシート・フロー現象の解析, 海岸工学論文集第 36 巻, pp. 259~263.
- 八木 宏・灘岡和夫・山下さゆり (1989): シート・フロー状砂移動現象の運動特性に関する研究, 土木学会年次学術講演会概要集 II, pp. 764~765.
- 山下俊彦・沢本正樹・横山博美 (1984): 非定常流による平坦床漂砂量と砂の移動機構に関する実験的研究, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 281~285.
- 山下俊彦・沢本正樹・武田秀幸・横森源治 (1985): 移動床土の振動流境界層とシート・フロー状砂移動に関する研究, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 297~301.
- Bagnold, R.A. (1954): Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. Proc. R. Soc. Lond. A225, pp. 49~63.
- Hino, M., Sawamoto, M. and Takasu, S. (1976): Experiments on transition to turbulence in an oscillatory flow, J. Fluid Mech., Vol. 72, pp. 193~207.
- Hino, M., M. Kashiwayanagi and A. Nakayama (1983): Experiments on the turbulence statistics and the structure of a reciprocating oscillatory flow, J. Fluid Mech., Vol. 131, pp. 363~399.