

シートフローへの遷移領域における砂粒子運動と 流れ場の相互作用に関する基礎的実験

Experiment on Flow-Velocity Profile and Sediment Motion in Transition Process
from Saltation to Sheetflow

酒井哲郎*・後藤仁志**・アバス・イエガネ-バクチアリ***

By Tetsuo SAKAI, Hitoshi GOTOH and Abbas YEGANEH-BAKHTIARY

Experiment on the flow-velocity profile and the motion of sediment particle has been conducted in open channel under the various hydraulic conditions. The transition region from saltation to sheetflow was focused from the viewpoint of the difference of the characteristics of flow-velocity profile. The flow-velocity profiles of saltation dominant flow show clear difference from that of sheetflow dominant flow. These difference was discussed based on the difference in the characteristics of the sediment-particle motion between two flow modes.

Key Words: *movable bed, saltation, sheetflow, flow-velocity profile, sediment-particle motion*

1. 緒 言

流砂・漂砂現象の研究、特に微視的な土砂移動機構に関する研究は、流砂量の予測精度の向上を目指して行われているが、移動床における砂層表面付近は水流と砂粒子が入り交じって流動する領域であり、この点を取り扱いを困難にしている。問題解決の鍵は、流体・粒子間の相互作用と粒子間相互作用すなわち粒子間衝突の2点であるが、前者は中程度の濃度から高濃度にかけて、後者は高濃度状態で支配的となり、適切なモデリングが不可欠である。高濃度の土砂流の研究は、従来から山地河川の土石流を対象として多く行われており（例えば、高橋¹⁾、椿・橋本・末次²⁾、江頭・芦田・矢島・高濱³⁾）、その混相流的特性ゆえに清水流と大きく異なる抵抗則が得られることはよく知られている。さらに、沿岸域においても、暴浪時に生じるシートフロー状態の高濃度土砂輸送が海浜変形に大きく寄与するとの観点から、特に近年シートフロー漂砂に関する多くの研究が行われている。土石流・シートフロー漂砂とも高濃度に砂粒子が集積した掃流状集合流動の範疇に入るが、これらの流動モデルは最近まで、各個運搬の流砂・漂砂モデルとは別個に発展してきたものである。

著者の一人⁴⁾は、各個運搬と集合流動を統一的に理解する流砂モデルの必要性から、離散的な砂粒子運動

* 正会員 工博 京都大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻
(〒606 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 工博 京都大学講師 大学院工学研究科土木工学専攻

*** 学生会員 京都大学大学院工学研究科博士後期課程 土木工学専攻

の特性を生かしつつ砂粒子系・流体系の2相をカップリングした2相流モデルによる数値モデルを提案し、saltation 領域での砂粒子運動を解析した。さらに、著者ら⁵⁾は、シートフロー漂砂を対象に砂粒子間相互の干渉を陽に扱える個別要素法を用いて表層せん断される砂層の流動過程の数値解析を行った。このように個々の機構を表現する数値的な手法は整備されつつあるが、実験データは、とりわけ、各個運搬と集合流動の遷移領域では必ずしも十分に収集されているとは言い難い。

そこで、本研究では、各個運搬と集合流動の統一的な理解の基礎的資料を収集するため、その遷移領域を対象とした実験を実施した。具体的には、開水路中の一方向流場で水路床勾配を徐々に増加させ、種々の水理条件下で砂粒子混入流を発生させて流速測定を行い、それらの流れにおける砂粒子運動の特性をビデオ画像解析から検討した。

2. 実験の概要

本実験に用いた水路は、図-1 に示す長さ 9m、高さ 32cm、幅 33cm、最急勾配 1/20 の長方形断面水路であり、木製の仕切り板を設置して幅を12cmに狭め、粒径 $d=0.5\text{cm}$ のガラスビーズを敷き詰めた粗面固定床を上流端から7.2mにわたり設置した。実験に用いた粒子は、固定床に用いた粒子と同じ粒径 $d=0.5\text{cm}$ 、比重 $\sigma/\rho=2.6$ のガラスビーズである。流量はパーソナルコンピュータ制御されており、安定した定常状態を容易に確保できる。給砂は水路上流端で行い、給砂量は、同一の水理条件で予備的に行った清水流の流速分布測定の結果から推定した摩擦速度 u_* を用いて、Meyer-Peter & Müller⁶⁾式

$$q_B = 8\tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right)^{3/2} ; \quad \tau_* \equiv \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1)gd} \quad (1)$$

により算定した(τ_{*c} :無次元限界掃流力)。流速の計測にはピトー管を用い、動圧側、静圧側に接続した差圧変換器(PD-100GA、定格圧力 0.1kgf/cm^2 、共和電業製)の出力をデジタルデータレコーダで記録し、アンサンブル平均して流速を計算した。砂粒子混入時には長時間安定した給砂を行うのは困難であるから、サンプリング時間を5秒に設定し、同一の水理条件で数回実験を繰り返してアンサンブル平均し

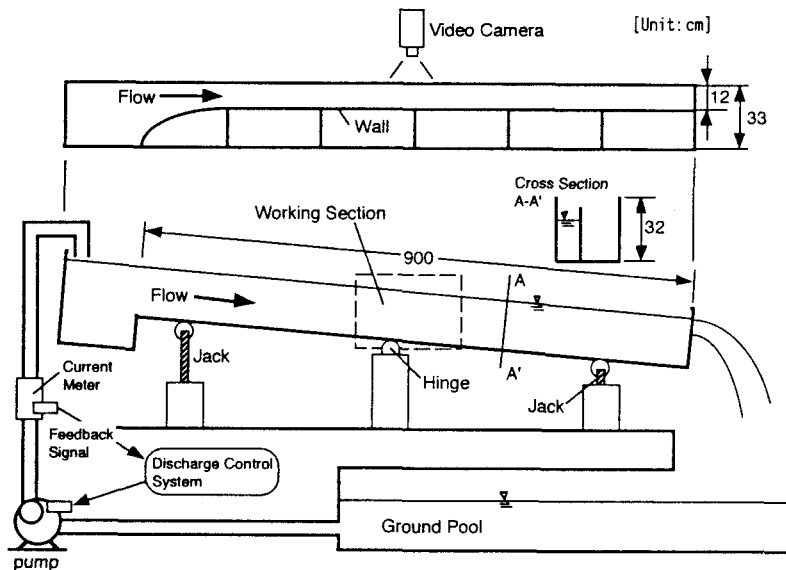


図-1 実験水路

表-1 実験条件

I_b	h (cm)	U_m (cm/s)	u_{*1} (cm/s)	u_{*2} (cm/s)	τ_*	q_b (cm ² /s)
0.03	3.85	108.23	10.60	12.27	0.186	5.21
0.03	4.76	131.30	12.00	12.89	0.206	6.41
0.03	5.70	146.20	13.41	14.07	0.245	8.33
0.05	3.20	130.21	12.52	14.27	0.252	8.33
0.05	4.23	147.75	14.17	15.55	0.299	10.42
0.05	5.04	165.34	16.07	15.82	0.310	11.90

た。また、サンプリング周波数は50Hzとした。

実験は、計15ケース実施したが、表-1には後に議論する6ケースについて示すこととする。なお、表中の記号は、 I_b :水路床勾配、 h :水深、 U_m :断面平均流速、 u_{*1} :水路床勾配と水深から算定した摩擦速度 ($u_{*1} = \sqrt{ghI_b}$; ここでは等流状態で、 $I_b = I_c$ 、 I_c :エネルギー勾配)、 u_{*2} :清水流の流速分布の底面近傍の値が対数則に適合するように求めた摩擦速度、 q_b :投入された単位幅流砂量である。

砂粒子の運動過程の記録には、8mmビデオカメラ Fujix-Hi8 (FUJIX社製)を用い、シャッタースピード1/500秒、サンプリング数30コマ/秒で撮影を行った。記録された画像はビデオインターフェイスを通じてPowerMac 7500/100に転送され、静止画をディスプレイ上でコマ送りする要領で切り替えて砂粒子の移動状況を追跡した。

3. 砂粒子を含む流れ場の特性

3.1 砂粒子を含む流れ場の流速分布

実験時の砂粒子運動の観察から、水路床勾配 $I_b=0.03$ では saltation が支配的であるが、勾配が増加して $I_b=0.05$ になるとシートフロー層が底面付近に生じることが確認されている。それぞれの水路床勾配において、断面平均流速（底面せん断力）を徐々に増加させて平均流速分布を計測した結果を図-2 および図-3 に示す。なお、摩擦速度 u_* については、粒子混入時には底面近傍流速の対数則との一致による算定法(u_{*2})が使えないため、 $u_{*1} = \sqrt{ghI_b}$ より求めた値を清水時の u_{*1} 、 u_{*2} の比を用いて補正した。すなわち

$$u_{*sl} = (u_{*2}/u_{*1})_{cl} \cdot \sqrt{gh_{sl}I_b} \quad (2)$$

により摩擦速度を算定した。ここに添字 cl は清水流を sl は粒子混入流を示している。

水路床勾配の緩やかな $I_b=0.03$ の場合には、全てに共通した傾向が見られる。すなわち、実験値は、全領域で直線的な分布を示すが、上層部と下層部では実験値の従う直線の勾配が変化している。また、勾配の変化点は底面せん断力の増加とともに上方へ移動してい

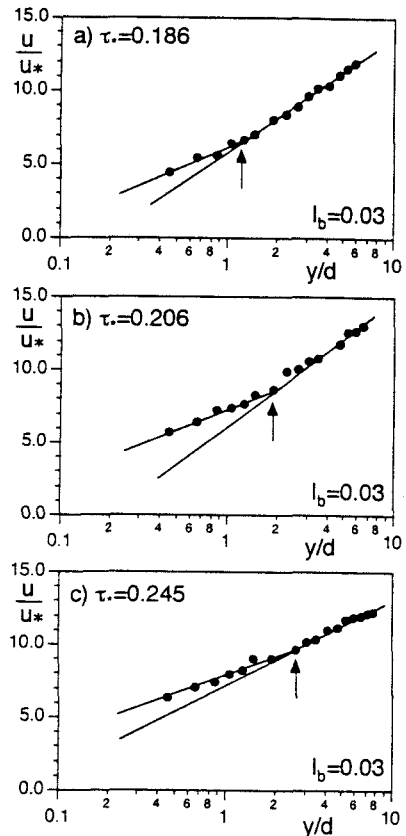


図-2 平均流速分布（路床勾配:0.03）

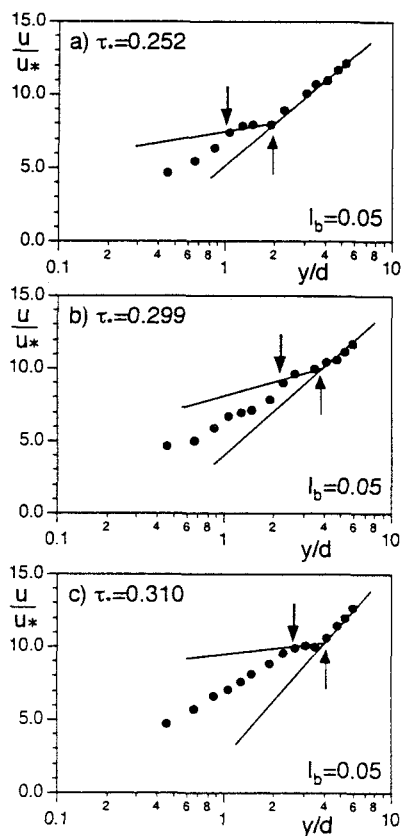


図-3 平均流速分布 (路床勾配:0.05)

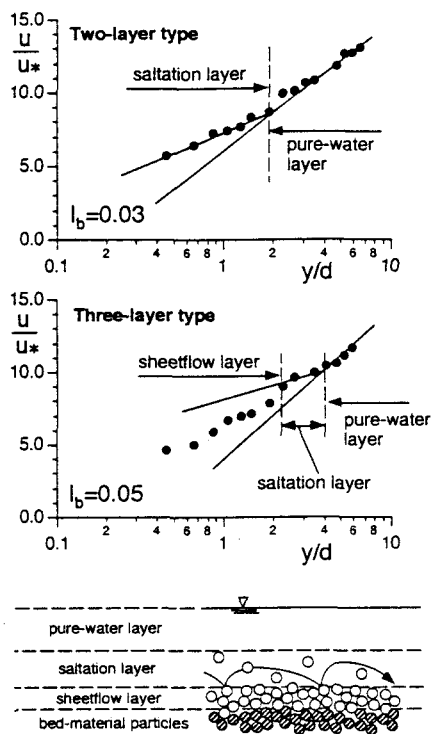


図-4 流速分布の特性

る。これらのケースでは saltation が支配的であることから、勾配変化点の変化は saltation 粒子の運動領域 (saltation 層厚) とも関連するものと考えられるが、これに関しては、水路床勾配 $I_b=0.05$ のケースとの比較の観点から後述する。

水路床勾配の急な $I_b=0.05$ の場合には、上層部から下方へ向かって直線的に減少し、途中で勾配が緩くなり一様分布の方向にシフトするが、さらに底面付近に近づくると勾配が急になり、中間部の緩勾配の直線から下方 (一様分布と逆方向) にシフトする。このように、水路床勾配 $I_b=0.05$ の場合には水路床勾配 $I_b=0.03$ の場合と異なり、勾配の変化点が2点あるが、2つの変化点とも底面せん断力の増加とともに上方へ移動している。

先にも述べたように、実験時の砂粒子運動の観察からは、水路床勾配 $I_b=0.03$ ではシートフローは発生せず、saltation が支配的であるが、勾配 $I_b=0.05$ ではシートフロー層が底面付近に生じ、その上に saltation 層が存在することが確認されている。このような観察結果を考慮すれば、図-4 に示す流速分布の領域区分が考えられる。勾配 $I_b=0.03$ は saltation 層と清水層とから成る Two-layer type の構造であり、流速勾配の変化点が両層の境界に対応しているものと考えられる。固液混相流では乱流拡散による運動量輸送以外に、砂粒子を介しての運動量輸送が存在する。すなわち、砂粒子が saltation を繰り返すことにより、saltation 頂部付近で砂粒子が獲得した運動量が砂粒子を介して底面付近の低速部に伝達され、結果として流速は一様化される方向に変化する。言い換えると、saltation 層では速度分布は緩勾配にシフトする

こととなる。図-5は、著者の一人⁴⁾が実施した PSI(Particle-Source-In)-cell model による流体・粒子間干渉を考慮した saltation 層の数値解析結果の一例であるが、saltation 層と清水層における流速勾配の相違が再現されている。この数値解析では、流体・粒子間の干渉のみを対象として粒子間の相互干渉は考慮していないので、saltation 運動による鉛直方向の運動量混合の促進効果のみが存在する場合の結果となっているが、この結果が勾配 $I_b=0.03$ の場合と少なくとも定性的に一致することは、saltation 粒子の存在と速度勾配の一樣化傾向の関連に関する先の考察を間接的に裏付けるものと言える。

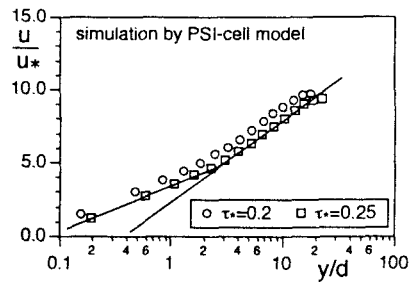


図-5 流体・粒子干渉モデルによる流速分布

一方、勾配 $I_b=0.05$ はシートフロー層、saltation 層、清水層とから成る Three-layer type の構造であり、流速勾配の変化点が3層の境界に対応しているものと考えられる。まず、清水層とsaltation 層の直線の勾配変化に関しては勾配 $I_b=0.03$ の場合と同様の機構が考えられる。ところで、シートフロー層内とsaltation 層内では砂粒子の運動形態は大きく異なりこれが流速分布にも大きな影響を与えるものと考えられる。すなわち、saltation 層では砂粒子の濃度は比較的 low、砂粒子は互いに干渉せずに独立した saltation 運動を行うが、シートフロー層では砂粒子の濃度が高いため粒子間相互干渉が活発で粒子間衝突によるエネルギー損失が増大する。さらに、砂粒子が近接した状態で流動すると砂粒子が相互に運動を拘束することとなり、結果として砂粒子の鉛直方向の移動は抑制されて、砂粒子による鉛直方向の運動量混合も saltation 層と比較して不活発化する。saltation 層内の流速の一樣化傾向がシートフロー層内で見られなくなり、再び流速勾配が大きくなるのは、このような理由によるものと推測される。

3.2 砂粒子の運動特性

図-2 および図-3 に示した流速分布の特性に対する上記の解釈の妥当性を確かめるため、 $I_b=0.05$ 、 $\tau_*=0.31$ の場合（図-3 c）について砂粒子運動のビデオ画像解析から得られた砂粒子の典型的な移動軌跡を示したのが図-6である。図中の破線は、図-3 c)における流速勾配の変化点（図-3 c)中に矢印で表示）と対応しており、シートフロー層、saltation 層、清水層の3層間の領域の区分線に相当する。ビデオ画像の解析からも、中間部では saltation 運動が支配的であり、下層部では他の砂粒子との頻繁な接触を示すジグザグの軌跡が確認できる。さらに、saltation の見られる領域とシートフロー的ジグザグ運動の見られる領域の中間に第1の流速の勾配変化点に対応しており、特に●の粒子に関しては、 $x/d=6.0$ 付近まではジグザグ運動した後にシートフロー層、saltation 層の区分線を越えて saltation 的な運動に移行する様子が見られる。saltation の中には第2の流速勾配変化点より高く跳躍するものも見られるが、その発生頻度は小さく、流速分布に与える影響が小さいものと判断できる。正確な判断には更なるデータの蓄積が必要ではあるが、第2の流速勾配変化点の高

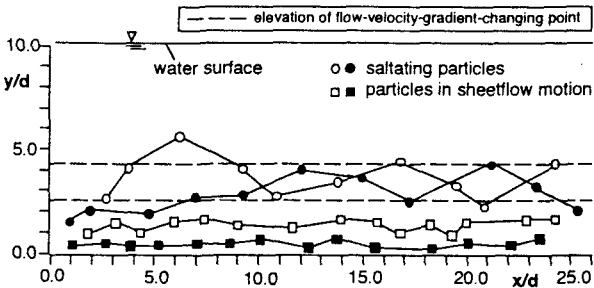


図-6 砂粒子移動軌跡

さは saltation の最大跳躍高さよりは低くなり、大略的には saltation の平均飛高程度の高さにほぼ対応している。

このように、流速分布の勾配変化点高さはビデオ画像解析から求められた saltation 層厚およびシートフロー層厚は、ほぼ良好な一致を示す。そこで、流速分布の勾配変化点高さを運動領域の境界線として個々の層厚と無次元せん断力の関係を示したのが図-7 である。大略的には、saltation 層厚、シートフロー層厚とも底面せん断力の増加とともに増加する傾向を示している。さらに、Two-layer type の構造で底面せん断力の増加とともに増加した saltation 層厚は、Three-layer type への遷移に伴い減少 (saltation 層とシートフロー層を合わせた全層厚すら減少) して、その後増加に転じている。Three-layer type への移行以後はシートフロー層厚の増加は顕著であるが、saltation 層厚の増加傾向はそれと比較すると穏やかで、砂粒子移動層厚の増加に対するシートフロー層厚の寄与が大きいことが理解できる。

4. 結 語

本研究では、各個運搬と集合流動を統一的に理解の基礎的資料を収集するため、その遷移領域を対象とした基礎的実験を実施した。すなわち、開水路中の一方向流場で水路床勾配を徐々に変化させて、種々の水理条件下で砂粒子混入流を発生させて流速測定を実施した。水路床勾配が小さい領域では、勾配変化点を1点有する流速分布となり、saltation 運動が卓越する Two-layer type の構造が見られる。水路床勾配を増加させると勾配変化点が2点になるが、このことは saltation 層の下部にシートフロー層が出現することに対応しており、Three-layer type の構造への遷移を示すものである。

さらに、個々の領域における砂粒子運動の特性をビデオ画像解析から検討し、このような領域区分の妥当性を検証した。なお、今後は、さらに多くのケースについての流速分布の計測を実施するとともに、本実験で確認された流速分布の特性を記述可能な数値モデルの構築を行う予定である。

最後に本研究の遂行にあたり、京都大学・欄津家久教授（水域環境工学講座）に実験水路の使用を快諾頂くとともに、水域環境工学講座・北村忠紀助手、仙波秀治技官には実験の準備および遂行にあたり御助力頂いた。また、実験の遂行にあたっては、京都大学大学院・田中博章君、畠田哲也君、同工学部・杉原慶誉君の熱心な協力を得たことを付記して、謝意を表する。

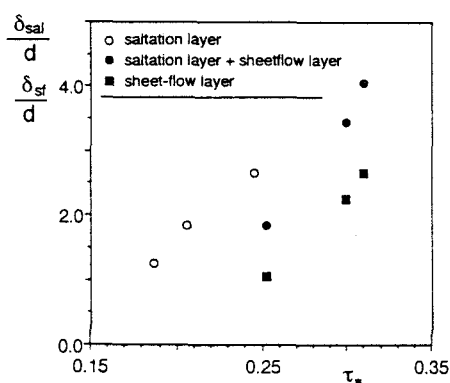


図-7 砂粒子移動層厚

参 考 文 献

- 1) 高橋 保：土石流の発生と流動機構，京都大学防災研究所年報，20号，B-2, pp.405-435, 1977.
- 2) 椿東一郎・橋本晴行・末次忠司：土石流における粒子間応力と流動特性，土木学会論文集，No.317, pp.79-91, 1982.
- 3) 江頭進治・芦田和男・矢島 啓・高濱淳一郎：土石流の構成則に関する研究，京都大学防災研究所年報，32号，B-2, pp.487-501, 1989.
- 4) 後藤仁志，辻本哲郎，中川博次：流体・粒子相互作用系としての掃流層の数値解析，土木学会論文集，第485号/II-26, pp. 11-19, 1994.
- 5) 後藤仁志・酒井哲郎：表層せん断を受ける砂層の動的挙動の数値解析，土木学会論文集，第521号/II-32, pp.101-112, 1995.
- 6) Meyer-Peter, E. and Müller, R.: Formulas for bed-load transport, Proc. 2nd IAHR Congr., Stockholm, pp. 39-64, 1948.