

掃流砂礫の分散過程に関する研究 (2)

澤 井 健 二・小久保 鉄 也

DISPERSION OF BED LOAD PARTICLES (2)

By Kenji SAWAI and Tetsuya KOKUBO

Synopsis

Dispersion and grain size sorting of bed load particles are discussed through some flume tests and stochastic numerical simulation, noticing the distribution of the degree of exposure and pick up rate of individual particle near the bed surface.

Under flat bed condition, the thickness of exchange layer is almost same as the maximum grain size of bed material regardless of the grain size of tracer particles. In the case of small tractive force, only smaller particles move, but in the case of large tractive force, larger particles are easier to move and travel downstream faster than smaller particles.

1. 緒 言

流送砂礫の分散機構を明らかにすることは、砂礫の流下過程の予測や、河床変動の予測、流域における土砂生産のメカニズムの解明などの応用的な面だけでなく、流砂や河床変動の内部機構をより合理的に把握するための手段としても意義のあるものである。前報¹⁾において、著者らは比較的平坦な河床条件のもとでの掃流砂に対象を限定し、河床の上昇ならびに低下によって砂礫の分散過程がどのように変化するかを実験的に検討するとともに、その機構をモデル化したシミュレーション法について検討した。その結果、洗掘過程では時間の経過に伴って着目粒子の露出度が増加して粒子の移動が生じ易くなり、堆積過程では時間の経過に伴って露出度が減少して粒子が移動し難くなる作用があるとともに、河床変動による掃流力の変化に伴って粒子の pick up rate が変化し、そのどちらの効果が卓越するかによって、トレーサの流下速度は様々に変化することが見出された。また、材料の粒度構成が比較的狭く、全粒度範囲が活発に移動するような条件下では、細粒分よりも粗粒分の方が速く流下するという興味ある現象が見出されている。しかしながら、そのような現象の生じる条件を明確に把握するには至らず、また、数値シミュレーションでは、上に述べた混合砂礫の分級・分散過程の特徴を的確に表現することができなかった。これは、河床表層における砂礫の存在高さの分布や存在高さごとの pick up rate が十分に把握できていないためであると考えられる。

そこで、著者らは、それらの点に留意して、混合砂礫の分級・分散過程に関する新たな実験を行い、若干のデータを得るとともに、数値シミュレーション法についてもいくつかの改良を加えたので、ここに報告する。

2. 河床表層砂礫の存在高さと離脱率

平坦河床といえども、砂礫床面には粒径オーダーの凹凸が必然的に存在し、また、流下の過程で埋没と露出を繰り返す粒子も存在することから、河床における粒子の存在高さは一定でなく、ある層内に分布するものと考えられる。著者らは前報において均一砂礫を対象として、トレーサならびに周辺粒子の礫頂高を計測し、露出度（比高を粒径で基準化したもの）がほぼ $-0.3 \sim +0.7$ の範囲に分布することを見出すとともに、

離脱率が露出度の一次関数で近似されるものとして分散過程のシミュレーションを行い、ある程度の適合性を確認した。しかしながら、露出度と離脱率の関係を直接に検証したわけではなく、また、混合砂礫の場合には粒径階によってそれらが異なる可能性がある。

そこでまず、前報の Fig. 9 に示した露出度別の原点残留確率から、均一砂礫における露出度と離脱率の関係を求めたところ、Fig. 1 のようになった。対象としたトレーサー数が100個と少なく、定量的に議論することは難しいが、露出度の増大に伴って離脱率が増大する傾向にあることが認められる。図中の実線は、これらの実験値に比較的良好に適合する直線をあてはめたもので、

$$p_s = \bar{p}_s \{1 + 1.25(e - 0.5)\} \dots\dots\dots (1)$$

と表される。ここに、 e は露出度、 p_s は離脱率で、 $\bar{p}_s$ は中川・辻本²⁾の式

$$\bar{p}_s \sqrt{d/(\sigma/\rho - 1)g} = \begin{cases} F_{0.7} \tau_* \{1 - (\tau_{*c}/\tau_*)\}^3 & [\tau_* > \tau_{*c}] \\ 0 & [\tau_* \leq \tau_{*c}] \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

によって算定される河床表層粒子の代表離脱率である。前報では、 $\bar{p}_s$ が河床表層における平均的な露出度をもつ粒子の離脱率に対応するものと考えて、

$$p_s = \bar{p}_s \{1 + k(e - \bar{e})\} \dots\dots\dots (3)$$

と表したが、Fig. 1 によると、 $\bar{p}_s$ はむしろ、 $e=0.5$ 程度のかかなり露出した粒子の離脱率に対応しているようである。しかし、式(1)の一般性についてはさらに検討する必要がある。

次に、混合砂礫床における粒径階ごとの露出度の分布を求めるために、以下のような実験を行った。

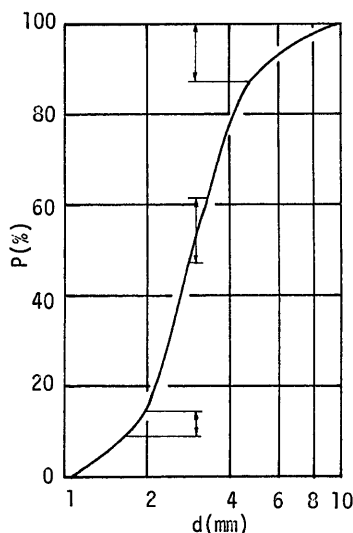


Fig. 2 Grain size distribution of bed material

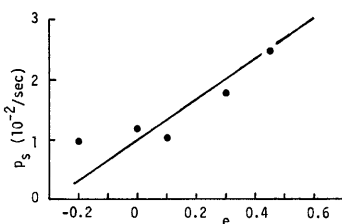


Fig. 1 Relation between the degree of exposure and pick up rate for uniform material ($\tau_* = 0.08$)

実験に用いた水路は幅 50 cm、長さ 21 m の鋼製水路で、その中央部分 16 m を移動床とし、Fig. 2 に示すような粒度構成をもつ砂礫を平坦に敷均らし、勾配 1/125、流量 18.7 l/s の条件で通水しながら、移動床上流端から 3~7 m の区間の数ヶ所で、Fig. 2 に示す各粒径階ごとに100個のトレーサーを水面から投入し、5分後に停水して各トレーサーの存在高さを測定した。ここでいう存在高さとは、トレーサーの礫頂とその周辺粒子の平均礫頂高との比高のことである。測定法としては、まず停水後の河床表面から見えるトレーサーについては、その礫頂高と周囲の半径 2 cm 程度の範囲内の目視による平均礫頂高をポイントゲージで測定した。また、埋没のために河床表面から確認できないトレーサーについては、表面粒子を注意深く取除いて、新たなトレーサーが発見された時点で、その礫頂高と周囲の平均礫頂高とを計測した。この場合、トレーサーの直近の河床は乱されているので、やや下流の未攪乱域の平均礫頂高を用いている。なお、この実験においては給砂をしていないが、通水時間が5分間と短いため、計測を行った中流付近では流砂の平衡状態が保たれていたものと考えられる。

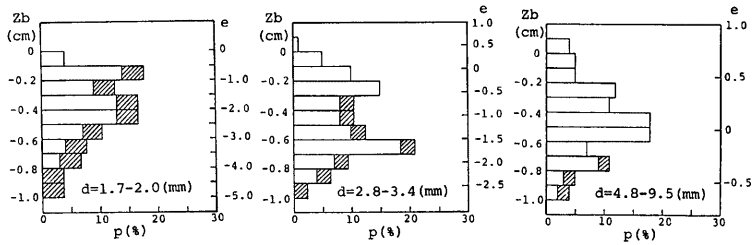


Fig. 3 Distribution of the bottom height and degree of exposure of tracer particles

Fig. 3 は、粒径階ごとのトレーサーの存在高さを示したものである。ただし、ここでは、トレーサーの存在高さとして礫底の位置に着目し、トレーサーの礫底高と周辺粒子の平均礫頂高との比高をとっている。また、図の右側には、これまでに定義してきた露出度（トレーサーの礫頂高と周辺粒子の平均礫頂高との比高をトレーサーの粒径で除したもの）もあわせて示している。なお、埋没粒子を探す際に、はじいてしまったりして存在高さを求められなかったものについては、礫頂が平均河床面（平均礫頂面）より下になる範囲に一樣に配分してある（図の斜線部）。この図より、粒径階ごとにその分布形は若干異なるものの、礫底高の分布範囲はほぼ一致しており、最大粒径程度となっている。これは、交換層の厚さを示すものと考えられる。一方、露出度を見れば、大粒径階の粒子の露出度が $-0.4 \sim +1.0$ であるのに対して、小粒径階の粒子では $-4.0 \sim +1.0$ となっており、礫底高の存在範囲は同じでも、露出の程度は粒径階によってかなり異なっている。すなわち、大粒径階の粒子は河床からかなり露出した状態にあることが多いのに対し、小粒径階の粒子はかなり埋没した状態にあり易いことがわかる。これは、混合砂礫の流送過程では、小粒径の粒子が大粒径の粒子の間隙に入りこむからであろう。

次に、粒子の存在高さあるいは露出度ごとの離脱率を求めるために、次のような実験を行った。

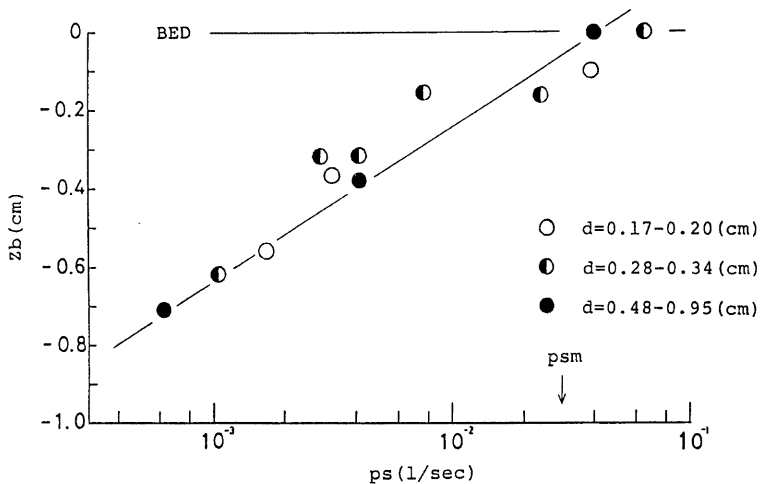


Fig. 4 Relation between pick up rate and bottom height of tracer particles

用いた河床材料ならびに水理条件は、先の露出度分布を求めた実験と同じで、通水前に移動床上流端から5~10 m の区間に定めた100個の格子点に、同一の粒径階のトレーサーをほぼ同一の露出度になるように配置し、一定時間の通水の後、格子点に残留しているトレーサーの個数から原点残留確率を求めた。トレーサーに所定の露出度を与えるのには、まず格子点周辺の平均礫頂高を求めた後、トレーサーの礫頂がそれと所定の比高を有するようなくぼみにトレーサーを設置した。そのようなくぼみがない場合には、トレーサーを置いてからその礫頂をピンセットで軽くおさえて高さを調節した。通水中、水面上よりトレーサーの動きを観察し、約半数のトレーサーが離脱した時点で停水した。したがって、通水時間は対象としている粒径階および露出度ごとに異なっている。また、比較的長時間の通水になると予想された条件に対しては、流出土砂

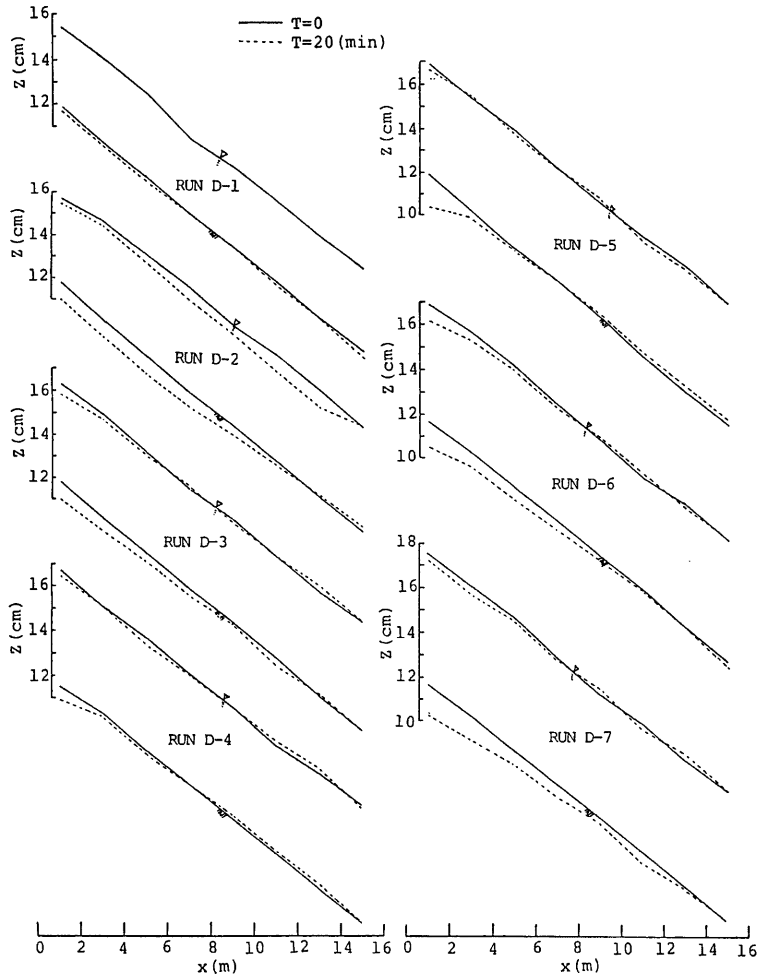


Fig. 5 Initial and final forms of water surface and bed surface

量と同程度の給砂量を与え、河床の平衡を保った。設定した露出度は、小粒径階 ($d=1.7\sim 2.0$ mm) に対しては 0, -1.5 , -2.5 の 3 段階, 中粒径階 ($d=2.8\sim 3.4$ mm) に対しては 0.5, 0, -0.5 , -1.5 の 4 段階, 大粒径階 ($d=4.8\sim 9.5$ mm) に対しては 0.5, 0, -0.5 の 3 段階である。ただし、中粒径階の $e=0$ および $e=-0.5$ に対しては、それぞれ 2 回実験を行った。

Fig. 4 は、実験結果を礫底高 z_b と離脱率 p_s の関係として整理したものである。この図によると、礫底高が同じ場合、離脱率は粒径に関係なくほぼ同一の値をとり、 p_s と z_b の関係は、片対数紙上ではほぼ直線関係にある。また、礫底高 z_b が 0 における p_s の値は、中川・辻本の式から求めた平均粒径に対する推定値 p_{sm} とはほぼ一致しているようである。そして、いずれの粒径階においても、礫底高の低下に伴って離脱率は激減し、交換層の底部では約 1/100 にまで減少している。

3. 混合砂礫の分級・分散過程に関する実験

3.1 実験方法

用いた水路ならびに河床材料は、前章の実験に用いたものと同じである。ただし、トレーサーとしては、

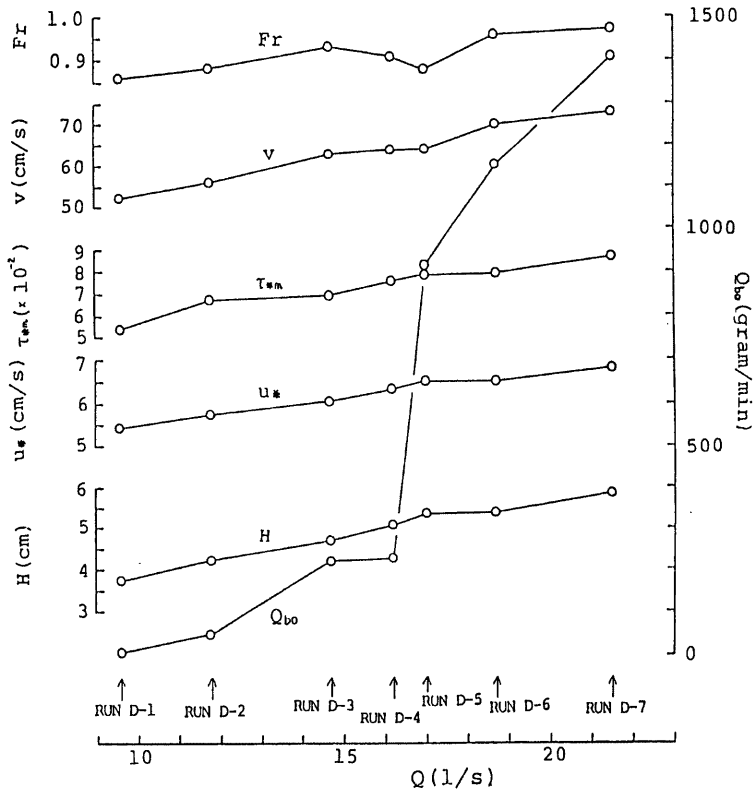


Fig. 6 Variation of several hydraulic parameters with discharge

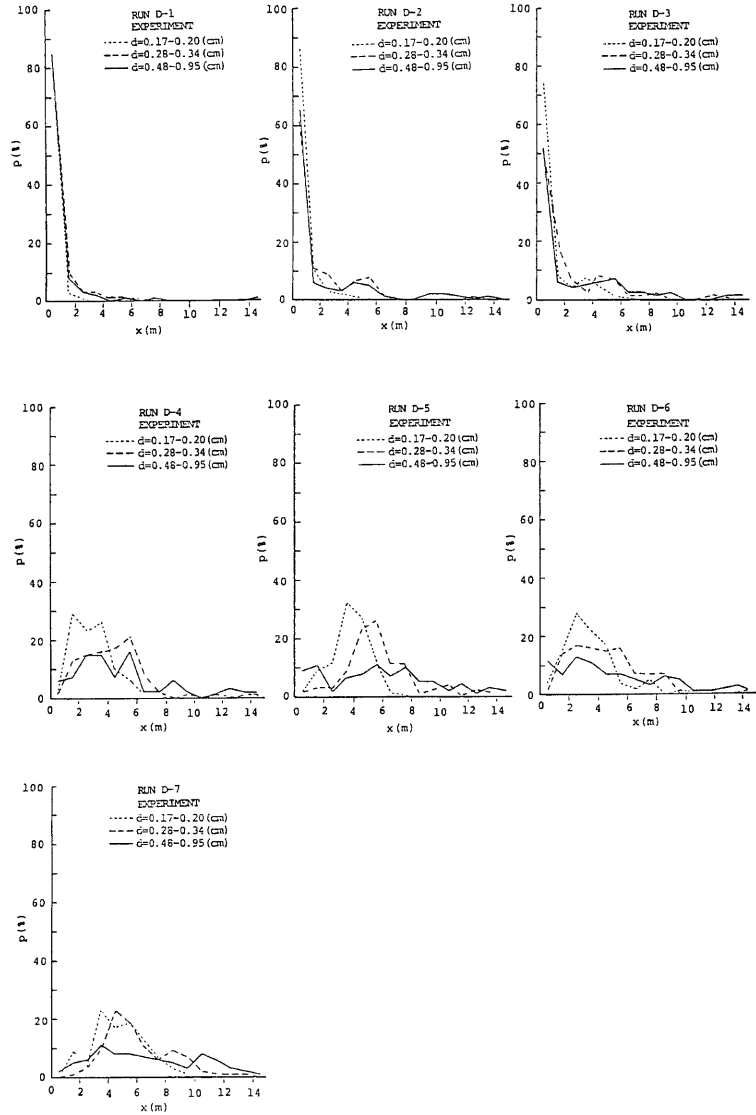


Fig. 7 Distribution of travel distance of tracer particles

$d=1.7\sim2.0, 2.0\sim2.8, 2.8\sim3.4, 3.4\sim4.8, 4.8\sim9.5$ mm の5段階のものを100個ずつ用いることにした。水路勾配は1/125で、流量を9.6 l/s から21.5 l/s まで7段階に変化させ、掃流力が分級・分散特性に与える影響を解明することをねらいとしている。通水時間は各 Run とともに20分で、給砂は行わなかった。計測法等は、前報に述べた多粒子追跡の実験と同じである。すなわち、移動床区間上端付近の20 cm の区間の河床表面に各粒径階のトレーサーを100個ずつ配置し、移動限界付近まで徐々に流量を増加させた後、所定の流量を20分間継続させ、停水後にトレーサーの流下距離の分布を20 cm ごとの区間に区切って計測した。その際、河床表面に露出している粒子と埋没している粒子とは区別した。

3.2 実験結果

Fig. 5 は、各実験における通水前後の河床形状と、通水直後および停水直前の水面形状を示したものである。いずれの実験においても、通水直後には等流条件が満たされているが、20分後には、Run D-1～3 ではかなりの区間にわたって平行もしくはやや下に凸の河床低下が生じているのに対し、Run D-4～7 では河床形状に上に凸の傾向が見られる。これは、Run D-3, 4 あたりを境にして、parallel degradation から rotational degradation への移行が生じたためではないかと考えられる。河床形態については、本実験では河床波の存在しない平坦河床を想定しているが、場合によっては砂洲が発生し、部分的には波高が1～2 cm に成長することもあった。しかしながらそれらは安定なものではなく、河床は概して平坦であった。砂漣や砂堆あるいは反砂堆は全く発生しなかったが、これはフルード数が約0.9で、transition に近い upper flow regime に属していることに対応する。

Fig. 6 は、各実験ケースごとの、代表水理量をプロットしたものである。全体的に、流量の増加とともに摩擦速度 u_* 、平均粒径に対する無次元掃流力 τ_{*m} 、平均水深 H 、平均流速 v 、流出土砂量 Q_{B0} が増加しているが、Run D-4 と Run D-5 の間で Q_{B0} が急激に増大しているのが特徴的である。Run D-4, 5 の摩擦速度はそれぞれ6.30, 6.48 cm/s であり、これらの値はそれぞれ98%粒径、全粒径が移動可能な条件に対応しているが、これらの掃流力付近で流砂機構に変化の生じていることが推察される。このような現象は、別の実験³⁾においてもアーマールコートの形成と破壊として認められており、分級・分散特性にも影響を及ぼすものと思われる。

Fig. 7 は、各実験ケースにおけるトレーサー粒子の流下距離の分布を示したものである。掃流力の増加に伴ってトレーサーの流下距離が増大し、その分散範囲が広がるとともに、細粒子よりも粗粒子の方が速く流下するようになっているのが特徴的である。

Fig. 8 は、流下距離の中央値 x_{50} が掃流力によってどのように変化するかを示したものであり、どの粒径階においても $\tau_{*m} \approx 0.07$ 付近で移動距離が急激に増大している。この掃流力は97%粒径程度の粒子の限界掃

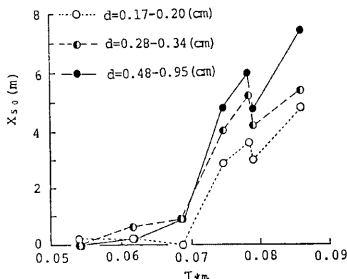


Fig. 8 Relation between the median of travel distance and the tractive force

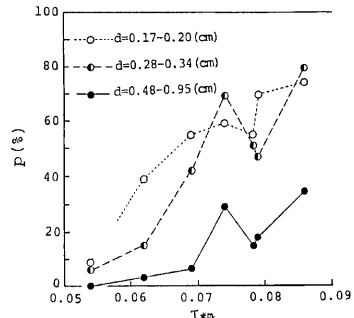


Fig. 9 Percentage of buried tracer particles

流力に対応しており、この付近で流砂機構の変化することが、トレーサーの移動速度の点からも確認される。

Fig. 9 は、停水時に河床表面下に埋もれていたトレーサー粒子の割合を示したもので、掃流力が増大するほど埋没率が高くなるとともに、粗粒子よりも細粒子の方が埋没し易い傾向にあることがわかる。

4. 混合砂礫の分級・分散過程に関するシミュレーション

著者らは、前報において、step length と rest period の時系列を確率的に模擬発生させる方法により、砂礫の分散過程をシミュレートした。その結果、均一砂に対してはある程度の適合性が見られたが、混合砂に対しては、あまり適合しなかった。これは主に pick up rate の推定が充分でなかったためであると考えられる。そこで2の実験結果に基づいて、pick up rate の算定式を修正する。**Fig. 4** では p_s を礫底高 z_b の関数として整理し、全粒径階の粒子が移動する場合には、粒径にかかわらずほぼ同一の関係にあることを見出したが、小粒径階の p_s は大粒径階のそれよりもやや大きくなっているように読み取れる。さらに、一部の粒径階しか移動しないような水理条件も含めて取扱うことから、本シミュレーションでは、 p_s を礫中心の存在高さ z_m の関数として、

$$p_{si}(z_m) = \bar{p}_{si} \times 100^{(z_m/0.8a)} \quad (\text{ただし, } -a + d_i/2 < z_m < d_i/2) \quad \dots\dots\dots(4)$$

のように表すことにした。ここに、 a は交換層厚、 $\bar{p}_{si}$ は式(2)による粒径別の代表離脱率である。**Fig. 10** は式(4)と実験値を比較したものである。ただし、 $a=1\text{ cm}$ とした。これによると、上式で表される直線の傾きは実験値の傾向と比較的一致しているが、 $z_m=0$ において $p_{si}=\bar{p}_{si}$ になるという仮定は若干実験結果に反している。つまり、大粒径階に対してはこの仮定は妥当であるといえるが、小粒径階に対してはこの仮定は p_{si} を過大に評価することになる。

休止期間における礫の中心高の変化は、前報と同様に次式で計算する。

$$dz_m/dt = -dz_s/dt \quad \dots\dots\dots(5)$$

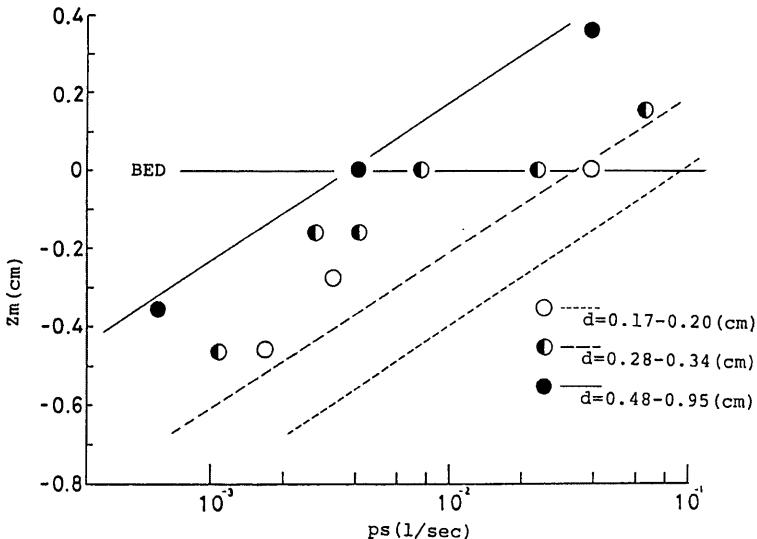


Fig. 10 Relation between pick up rate and the height of the center of tracer particles

ここに、 z は平均河床高である。

また、河床低下のために $z_m > d_i/2$ となれば、直ちに step を開始し、河床上昇によって $z_m < -a + d_i/2$ となれば、離脱する機会を失うものとする。

step を生じた場合には、比較的短い step period の後、ある距離だけ下流で、新たなある露出度で粒子が静止するが、本シミュレーションでは、step period は十分に短いものとして省略し、また、step length は平均値が 100 d の指数分布に従うものとして確率的に選択する。

step 終了時の露出度分布については不明の点が多いが、2. に述べた停水時の露出度分布を参考にして、礫底が交換層下面から平均河床面まで一様に分布するものと仮定した。すなわち、

$$f_0(z_m) = 1/a \quad (\text{ただし } -a + d_i/2 < z_m < d_i/2) \quad \dots\dots\dots (6)$$

なお、河床高や水量の算定には、次の式系⁹⁾を用いることにした。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)B} \frac{\partial(q_B B)}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$q_B = \sum_i q_{Bi} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{q_{Bi}}{i_b u_{*ci} d_i} = 17 \tau_{*ci} \left(1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*ci}} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*ci}}} \right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{\partial(Bhv)}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} = -\frac{u_*^2}{R} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{v}{u_*} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{h_0}{d(1+2\tau_*)} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{\partial i_b}{\partial t} = \begin{cases} \frac{1}{a}(i_b - i_b) \frac{\partial z}{\partial t} - \frac{q_B}{a(1-\lambda)} \frac{\partial i_B}{\partial x} & \left(\text{for } \frac{\partial z}{\partial t} \geq 0 \right) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{\partial i_b}{\partial t} = \begin{cases} \frac{1}{a}(i_b - i_{b0}) \frac{\partial z}{\partial t} - \frac{q_B}{a(1-\lambda)} \frac{\partial i_B}{\partial x} & \left(\text{for } \frac{\partial z}{\partial t} < 0 \right) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 i_b , i_B , i_{b0} はそれぞれ粒径 d_i の粒子が交換層、流砂、元河床において占める割合である。

抵抗則としては、次の対数則を用いた。

$$\frac{v}{u_*} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{h_0}{k_s}, \quad k_s = \alpha d \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 h_0 は等流水深である。

境界条件は、

$$\left. \begin{aligned} q_B &= 0 & \text{at } x=0 \\ h &= h_0 \\ z &= z_0 \end{aligned} \right\} \text{at } x=16\text{m}$$

初期条件は、

$$\left. \begin{aligned} z &= 0 \\ h &= h_0 \end{aligned} \right\} \text{at } t=0$$

とした。ここに、 z_0 は移動床下流端の床止めの敷高である。等流水深の計算で用いる $\alpha (=k_s/d_m)$ の値は、実験値との適合性を考えて 3.0 と定めた。交換層の厚さ a は、最大粒径の 1 cm を使い、空隙率 λ は 0.4 とした。また、差分間隔は、時間については $\Delta t = 1$ sec、距離については、河床変動に対して $\Delta x = 0.5$ m、水面形に対して 0.1 m とした。粒度は全粒径範囲を 10 分割して計算している。

Fig. 11 は、以上の方法によって、前章に述べた実験条件に相当する混合砂礫の分級過程を数値的にシミュレートしたものである。また、**Fig. 12** は、給砂がある場合（前報の Exp. C）について、同様のシミュレ

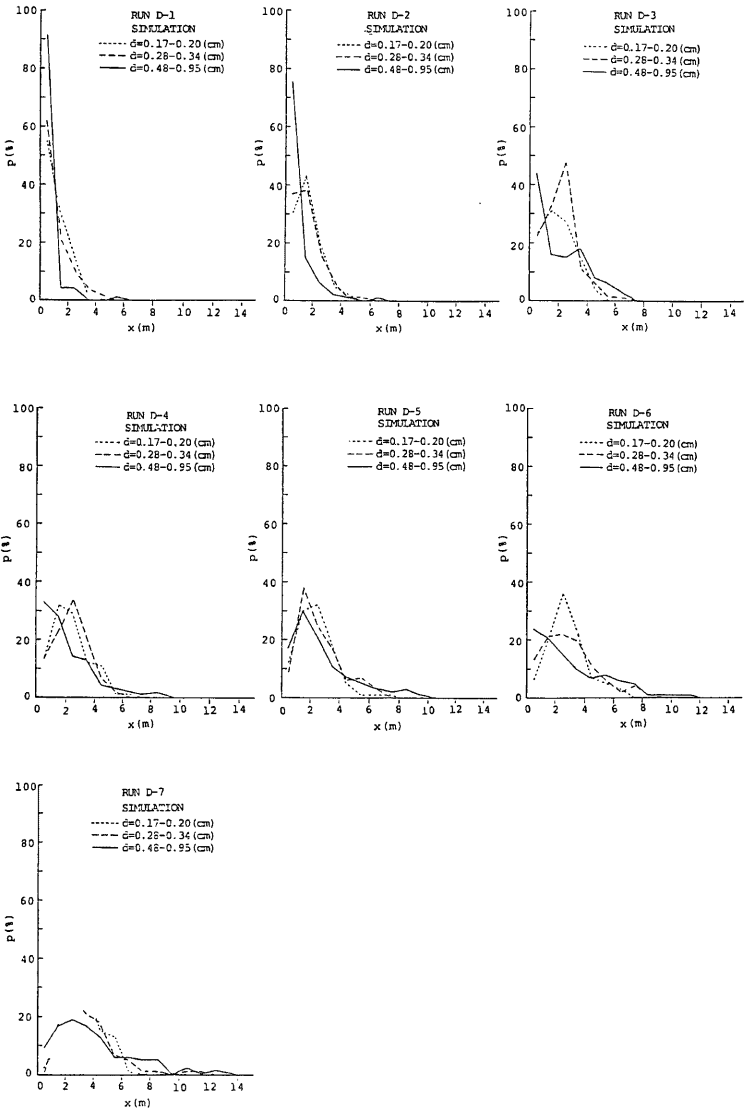


Fig. 11 Simulated distribution of travel distance of tracer particles for Exp. D

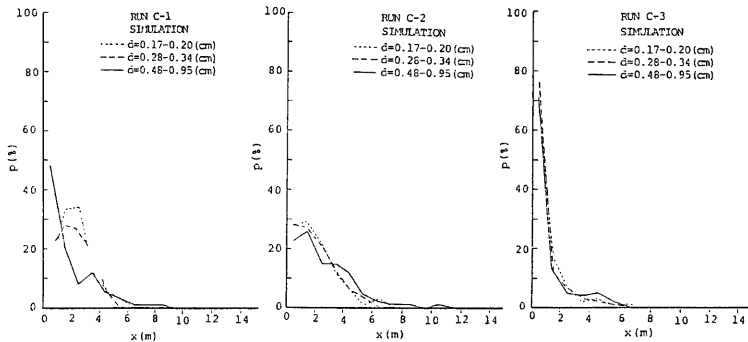


Fig. 12 Simulated distribution of travel distance of tracer particles for Exp. C

ーションを行ったものである。

本シミュレーションは実験結果をかなりよく模擬できているが、以下の点においてまだ不充分である。すなわち、実験結果では大粒径階のトレーサーがきわめて広範囲に分散し、移動床区間から流出しているものがかなり存在するのに対し、シミュレーションではすべてのトレーサーの移動距離が 14 m 以内にとどまっており、分散の程度がやや小さいと言えよう。また、Run D-1～3 の実験ではすべての粒径階においてトレーサーの流下頻度が 0～1 m の範囲で最大を示すのに対して、シミュレーションでは Run D-2, 3 において、既に中粒径階ならびに小粒径階のトレーサーのピークが $x=2\sim3$ m の区間に移行している。

このように、シミュレーションと実験の間に若干のずれが生じた最大の原因は、step 終了時の粒子の存在高さが交換層内に一様に分布すると仮定したことにあるのではないかと考えられる。

5. 結 語

以上、前報における主として均一砂を対象とした分散過程の実験および数値シミュレーションの成果をもとに、混合砂の分級・分散過程について、粒子の存在高さや離脱率に着目した新たな実験を行うとともに、種々の水理条件での分級・分散特性について、実験ならびに数値シミュレーションを行った。

得られた結果を要約すると、次のようである。

河床面における粒子の離脱率は、粒子の存在高さあるいは露出度によって異なるが、その関係を表す実験式が得られた。従来提案されている離脱率の算定式は、露出度が 0.5 程度のかなり露出した粒子のそれに対応している。均一砂においては、露出度と離脱率の関係は 1 次式で近似でき、その変化範囲もさほど大きくないが、混合砂では、露出度の変化に伴って離脱率が指数関数的に変化し、交換層の上部と下部では離脱率が 100 倍程度異なる。

平坦河床における流送砂礫の交換層厚は、粒径階にかかわらずほぼ最大粒径程度であり、混合砂においては、粗粒分はより露出した状態にあり易く、細粒分はより埋没した状態にあり易くなっている。その結果、混合砂礫床では、均一砂礫床に比べて粗粒分が離脱し易く、細粒分が離脱しにくくなっている。

混合砂礫床においては、98% 粒径程度の粒子が移動可能となる掃流力を境にして流砂量が急激に変化するが、これはアーマートクの形成と破壊の境界に相当するものと考えられる。最大粒径階の粒子が移動しないような水理条件下では、粗粒分よりも細粒分の方が流下速度が大きいが、全粒径階が活発に移動するような水理条件下では、細粒分よりも粗粒分の方が流下速度が大きくなる。

上記の露出度分布ならびに露出度と離脱率の関係を考慮し、さらに交換層の概念を用いた混合砂礫床の変

動計算法を用いて、前報に述べた掃流砂礫の分散過程に関する確率シミュレーションモデルを改良したところ、実験結果をかなり模擬できることがわかった。今後、step 終了時の露出度を明らかにすることによって、さらに精度を高めることが可能であろう。

なお、本研究を進めるにあたり、芦田和男教授ならびに今本博健教授から有益な助言をいただいた。また、実験に際しては工学部土木工学科 4 回生田島泰三君の協力を得た。河床変動計算には、松尾勉氏のプログラム⁵⁾を参考にさせていただいた。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 澤井健二：掃流砂礫の分散過程に関する研究，京都大学防災研究所年報，第26号 B-2, 1983, pp. 395-408.
- 2) 中川博次・辻本哲郎：水流による砂れきの移動機構に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第244号，1975, pp. 71-80.
- 3) 小久保鉄也：掃流砂礫の分級分散過程に関する研究，京都大学工学修士学位論文，1984.
- 4) 道上正規：土砂収支と河床変動，土木学会水理委員会水工学シリーズ，82-A-5, 1982.
- 5) 松尾 勉：スリットダムの流砂調節機構に関する研究，京都大学工学修士学位論文，1981.