

立命館大学大学院 学生員 ○竹林 洋史 立命館大学理工学部 正員 江頭 進治
立命館大学理工学部 正員 金 海生 北海道大学大学院 学生員 小山 慎一郎

1. はじめに 混合砂による交互砂州の波高は、一様砂のそれに比べて低くなることが水路実験より確認されている。その主たる原因は砂礫の分級現象にあると推察される。そこで、波高に及ぼす砂礫の分級現象の影響を明らかにするため、一様砂を用いて得られた交互砂州河床を固定床とし、河床と平均粒径の等しい一様砂と混合砂を供給し、その輸送過程を実験と数値解析により検討した。その結果、分級現象は波高を小さくする要因となる可能性を示した。

2. 支配方程式 流れの連続式、運動方程式、河床位方程式、流砂量式はそれぞれ次のようである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\tau_{bi}}{\rho}, \quad (i, j = 1, 2) \quad (2)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \frac{\partial q_{bj}}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

$$q_b = \sum_{k=1}^{10} q_{bk} = \sum_{k=1}^{10} F(\tau_*, \tau_{*e}, \tau_{*c}, d_k, d_m) r \quad (4)$$

$$\tau_{bi} = \rho C_f u_i \sqrt{u_1^2 + u_2^2}, \quad C_f = 1 \left/ \left(6 + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{h}{k_s} \right)^2 \right., \quad q_{bi} = q_b u_{bi} / \sqrt{u_{b1}^2 + u_{b2}^2}, \quad (\zeta: \text{水位}, \kappa=0.4, k_s=3d_m, i=1, 2, \lambda=0.4)$$

$$u_{b1} = A u_*, \quad u_{b2} = u_2 + u_{b2}', \quad u_{b2}' = -N \cdot \frac{h}{R} u_{b1}, \quad (A_r=8.5, N=7.0, R: \text{流線の曲率半径})$$

$F(\tau_*, \tau_{*e}, \tau_{*c}, d_k, d_m)$ は流砂量式で、芦田・道上式を適用する。 u_{bi} は河床面上の流速の*i*成分。 r は河床上の砂礫の被覆率であり、 $r = \Delta z_b / d_{\max}$ で定義している。ここに、 Δz_b は給砂した砂礫の堆積厚である。なお、式(3)は給砂した砂礫による堆積量を計算するためのもので、ここでは河床変動は考慮していない。

3. 実験方法および計算方法 実験条件、計算条件を Table 1 に示す。Fig. 1 に示す一様砂を用いて実験水路において交互砂州を発生させ、スプレー状の糊で河床を固定した。まず、固定床上に定常流量を供給し、流れが定常状態に達してから平衡流砂量の 10% ($r=0.1$) を定常的に給砂し、流砂量と堆積量の分布を測定した。給砂した砂礫は Fig. 1 に示す一様砂と混合砂である。砂礫の堆積が流れに大きく影響を与えない範囲で実験を行った。流砂量は、Fig. 2 に示すように横断方向に 5 つに分割された箱形のものを砂州の中に埋め込み、測定した。砂礫の被覆率 r (堆積厚) は砂州前縁部の堆積量の多いところのみ測定し、堆積量の少ないところは誤差が大きいと判断して測定していない。計算内容は実験と同様である。河床は固定床であるので、初期条件として $r=0.0$ を全ての点に与えた。また、 $r \geq 1.0$ のときは $r=1.0$ とする。河床上の二次流速は、各計算点における流れ関数の値を求め、流線の曲率から予測する。

4. 実験結果および計算結果 Fig. 3 に無次元掃流力の分布を示す。砂州のクレストで掃流力が大きく、トラフで小さい。また、クレストでは流れが射流であり、トラフでは常流である。そのため、砂州前縁部 ($x=4.3\text{m}$, $y=0.0-0.05\text{m}$) において波状跳水が生じている。数値解析による τ_* の分布の幅が実験のものよりも狭くなっているが、分布の特徴は表現できている。Fig. 4 は砂州前縁部における被覆率の分布を示している。実験において、混合砂の砂州前縁部の堆積は一様砂のそれよりも少ない。これは、堆積砂の平均粒径が 3.13mm という点から、限界掃流力の違いにより、粒径の大きい砂礫は堆積し、粒径の小さい砂礫はトラフに輸送されているが、一様砂ではほとんど全て堆積していることが一つの原因と考えられる。数値解析においてもこの傾向は表現できているが、 $x=4.3-4.5\text{m}$, $y=0.03-0.07\text{m}$ に著しい堆積がある。これは、 $x=4.25-4.4\text{m}$,

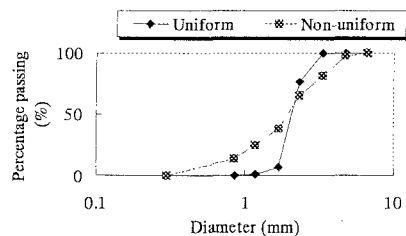


Fig. 1 Grain size accumulation curve of supplied sediment

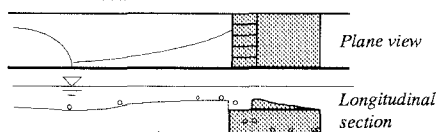


Fig. 2 Apparatus of sediment discharge

Table 1 Experimental and simulation conditions and hydraulic parameters

	i_b	d_m (mm)	Q (l/s)	h (cm)	u (cm/s)	τ_*	F_r
Experiment	0.03	2.16	1.28	1.31	48.9	0.114	1.36
Simulation	0.03	2.16	1.28	1.47	43.5	0.128	1.15

i_b : Bed inclination, d_m : Mean diameter of sediment, Q : Water discharge, h : Mean water depth, u : Mean water velocity, F_r : Froude number, τ_* : Mean non-dimensional shear stress

Hiroshi TAKEBAYASHI, Shinji EGASHIRA, Hai-sheng JIN and Shinichiro KOYAMA

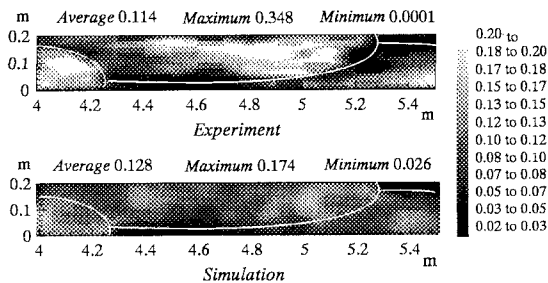


Fig. 3 Distribution of non-dimensional shear stress defined by mean size of supplied sediment

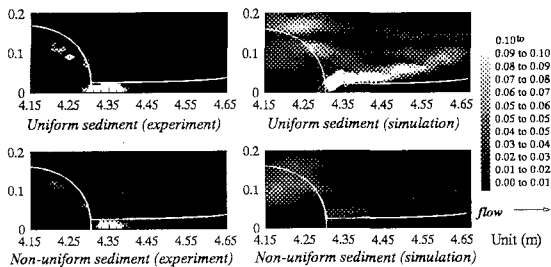


Fig. 4 Distribution of cover rate at time=30s

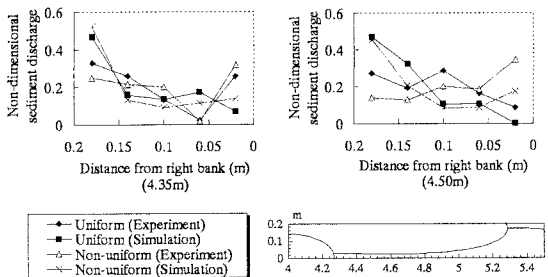


Fig. 5 Transverse distribution of sediment discharge (Comparison of uniform sediment and non-uniform sediment)

$y=0.03-0.08\text{m}$ の掃流力が実験のものより大きく、砂礫が輸送されてきたためである。実験では、この部分ではほとんど流砂は計測されなかった(Fig. 5)。Fig. 5 は一様砂と混合砂の横断方向の流砂量分布である。各流砂量は、その断面の全流砂量で無次元化されている。砂州前縁部の $x=4.35\text{m}$, $y=0.02\text{m}$ においては、一様砂、混合砂ともに流砂量は多い。その下流のトラフ、 $x=4.50\text{m}$, $y=0.02\text{m}$ では、混合砂の流砂量は多いが、一様砂は減少している。この傾向は、数値解析でも表現されている。Fig. 6 は流砂の平均粒径である。数値解析では、砂州前縁部からトラフにかけて平均粒径は小さいが、実験では平均粒径以上である。これは、流砂の非平衡性の一つの原因と考えられる。つまり、数値解析では粒径の大きい砂礫は $x=4.35\text{m}$ よりも上流に全て堆積してしまうが、実験では、流砂の掃流力の減少に対する反応が遅く、トラフに輸送されてきたためである。しかし、同一粒径であっても混合砂中ではトラフに流れ込み、一様砂では流れ込まないという結果も実験では得られているため、他の要因も考えられる。この点は今後検討していきたい。また計算結果で、水路中央部で平均粒径が大きくなるのは、 $x=4.25-4.4\text{m}$, $y=0.03-0.08\text{m}$ の掃流力が大きいことが主要な原因だと考えられる。掃流力に対する流砂量の位相差($\delta=100d$)を導入して、算定される流砂量分布について見る(Fig. 7)。流砂量分布は、位相差を導入した方が実験データをよく表現できている。また、平均粒径に関しても、結果は若干改善されていた。しかし、ここでは示していないが、被覆率の分布では砂州前縁部の堆積が下流側に大きく移動する結果になる。これは、位相差が粒径のみの関数で与えていることや、砂州前縁部における急激な流れの変化の影響を考慮していないことによるものと思われる。この点も今後検討していきたい。

5. おわりに 交互砂州固定床上における砂礫の輸送過程について調べた。一様砂は砂州の前縁部に堆積し、トラフには流れ込まなかったが、混合砂中の粒径の小さい砂礫はトラフにも流れ込み、波高を低くする働きをしている。一方、混合砂中の粒径の大きい砂礫は砂州前縁部に堆積し、砂州の前進に寄与しているとともに、トラフにも流れ込み、砂州の波高を低くする役割も果たしているようである。これは、分級現象が砂州の波高を低くする可能性を示している。

参考文献 1) 高橋、江頭、吉栖：砂州の形状特性値に及ぼす混合砂の影響、平成7年関西支部年次学術講演会、II-68

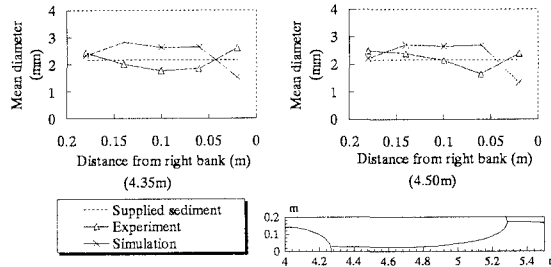


Fig. 6 Distribution of mean diameter of transported sediment

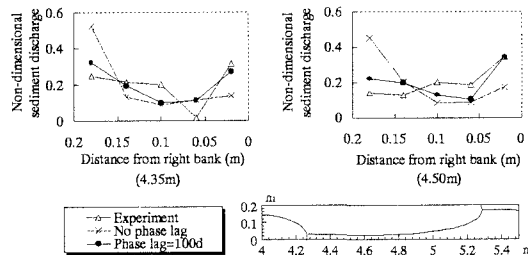


Fig. 7 Transverse distribution of sediment discharge (The effect of phase lag, non-uniform sediment)