

礫床河川の流速分布と限界掃流力

金沢大学工学部 正員 辻本 哲郎
 金沢大学大学院 学生員 細川 達男
 金沢大学工学部 ○勝見 直人

1. まえがき 一般に礫床河川は小さい相対水深と急勾配によって特徴づけられ、そこでの流れや流砂特性は、良く知られた沖積河川のそれらとは異なっている可能性がある。たとえば急勾配の流れにおける無次元限界掃流力 τ_{*0} の値はもはや一定でなく路床勾配とともに増加している(図-1参照)。図の破線はGrafらによる実験式(1987)を示す。路床勾配が増加すると重力の作用で砂礫は動きやすくなるにもかかわらず、こうした傾向を示すのは相対水深の小さい場合流れの構造が変化しているものと思われ、本論文では相対水深による流れの構造の変化に着目して無次元限界掃流力と路床勾配との関係を検討した。

2. 相対水深の小さい流れに関する実験的考察 実験は、幅40cm、長さ12mの可変勾配矩形断面水路に、中央粒径 $d_{50}=0.729, 0.95, 1.20, 1.95$ cmの礫を3層に敷き詰めて行った。 $d_{50}=1.95$ cmの場合は層厚を、1層と3層の2ケースを比較した。勾配は $I=0.001$ から 0.010 まで変え、相対水深(h/d)を1~6の範囲の等流に対し、直径3mmの小型プロベラ流速計と電磁流速計を用いて流速分布、乱れ強度分布、乱れのスペクトルを測定した。実験条件を表-1に示す(本報では $d_{50}=1.95$ cmの実験データを用いて明らかにされた特性について論じる)。図-2は流速分布を片対数表示したものであるが、底面付近で流速の一様化がみられ、粗度に影響された領域の存在が認められる。また、水面付近で wake が顕著な例も認められた。図-3は乱れ強度を y/d に対して示したもので、乱れ強度は底面付近で欠損しているが、その厚さは粒径のオーダーであり、この結果も roughness sublayer の存在を支持するものである。

変動流速の主流方向成分 u' と鉛直方向成分 v' は完全逆相関ではなく、 $\sqrt{u'^2}$, $\sqrt{v'^2}$ と $\overline{u'v'}$ はこれらに正弦波変動を仮定すると次式のように位相差 ϕ_{uv} を用いて関係づけられる。 $\overline{u'v'} = \sqrt{u'^2} \cdot \sqrt{v'^2} \cdot \cos \phi_{uv} \dots (1)$ 相対水深の大きい通常の乱流では turbulent core 内で乱れ強度は y/h の普遍関数として表示されているのでそれらを用い、また Reynolds 応力を三角形分布とすると、乱れ変動を特徴づける ϕ_{uv} の水深方向分布として次式が得られる。 $\cos \phi_{uv} = -(1-y/h) / \{2.3 \cdot \exp(-y/h) \cdot 1.27 \cdot \exp(-y/h)\} \dots (2)$

表-1 実験条件表

RUN	Number of layer	I	h (cm)	U (cm/s)	u^* (cm/s)	Re	d (cm)	h/d
A-1	1	0.001	11.01	35.5	3.79	35170	1.95	5.65
A-2	1	0.004	6.21	47.2	5.57	36700	1.95	4.71
A-3	1	0.007	6.98	55.0	6.57	38330	1.95	3.59
A-4	1	0.010	5.11	51.9	7.08	28510	1.95	2.62
A-5	3	0.004	2.15	13.0	2.59	7730	1.95	1.10
B-1	3	0.003	4.95	32.8	3.59	16300	1.25	3.96

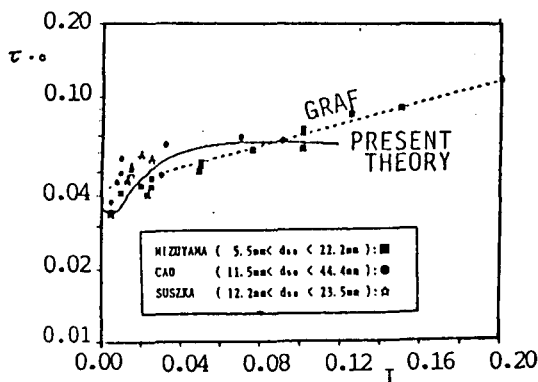
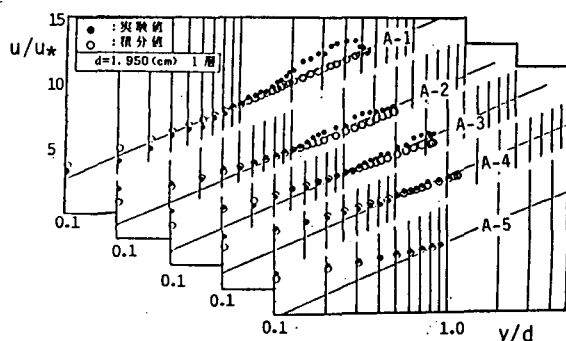


図-1 無次元限界掃流力と路床勾配の関係

図-2 $u/u_* \sim y/d$ 関係

ガラスビーズを用いた理想的な大粗度流れに対する中川・辻本・清水(1988)の研究では、図-4-a, bに示されるように乱れ強度、Reynolds応力ともに底面付近で欠損していることがその特徴として認められ、底面近傍領域(roughness sublayer)では、流れは粗度から吐き出される後流渦に影響されて乱流場が変形されるが、こうした条件でも図-4-cにみられるよう、“乱れ”に関しては式(2)が満足され、乱れ構造自体は普遍であることがわかる。

今回の実験では $\sqrt{v'v'}$ のみ実測されたが、 $\sqrt{v'v'}$ がこれと相似であると考え(但し、強度は(1.27/2.3))、式(2)によって与えられる ϕ_{uv} を用いて Reynolds 応力分布を式(1)によって推算した。この結果を図-5に示した。これに対して混合距離理論(混合距離 $l = \kappa y \sqrt{I - (y/h)}$ と修正して用いる)を適用すると変形したReynolds応力分布に応じた流速分布が求められる。数値積分によって得られた流速分布は図-2に併示してある。但し、混合距離理論では流速分布の“かたち”は決定されるが境界条件は別途定めねばならない。そのため、ここでは実験データをもとに $y/d = 1$ での (u/u_*) 値、Brを検討した。図-6はBrを h/d に対して無次元限界掃流力別に示したもの(但し、 $d_{50} = 1.95\text{cm}$)であるが、この図より Br が h/d の増加関数になっているのがわかる。図中の実線はこの実験値を正弦関数の一部で近似したものである。

3. 急勾配水路の限界掃流力に関する考察 急勾配河床上の砂礫に作用する力のつりあいを考え、 $\theta \rightarrow 0$ のケースの τ_{*c} の値を τ_{*c0} とすると、 $\tau_{*c}/\tau_{*c0} = (Br_0/Br)^2 \cdot \psi_1(\theta) \cdots (3)$ となり $\psi_1(\theta)$ は次式で与えられる。 $\psi_1(\theta) = [\{ (\sigma/\rho) \cdot \cos \theta - 1 \} \cdot \mu_r - (\sigma/\rho) \sin \theta] / [(\sigma/\rho - 1) \cdot \mu_r] \cdots (4)$ ここにおいて、 μ_r = 静止摩擦係数 ; $\tan \theta = I$; $Br_0 = 8.5$ である。また、上式においては底面近傍流速は近似的に $Br \cdot u_*$ で表されるものとした。式(3)、(4)を τ_{*c} と h/d で関係づけられる関係式、 $\tau_{*c} = I \cdot (h/d) / (\sigma/\rho - 1) \cdots (5)$ と連立させ、繰り返し計算によって τ_{*c} と勾配 $I = \tan \theta$ との関係を求めた。計算結果は $I < 0.04$ の範囲で良く実験データを説明するが非常に急勾配のものについては不明なところが多い。

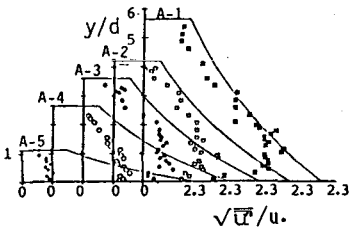


図-3 $\sqrt{v'v'}/u_* \sim y/d$ 関係

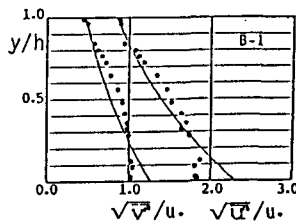


図-4-a $\sqrt{v'v'}/u_* \sim y/h$ 関係

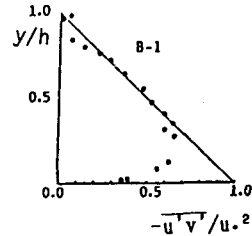


図-4-b $-u'v'/u_*^2 \sim y/h$ 関係

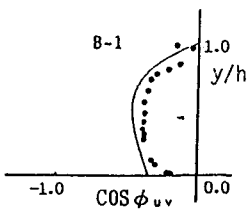


図-4-c $\text{COS } \phi_{uv} \sim y/h$ 関係

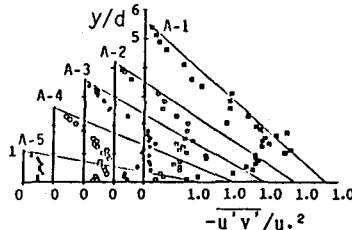


図-5 $-u'v'/u_*^2 \sim y/d$ 関係

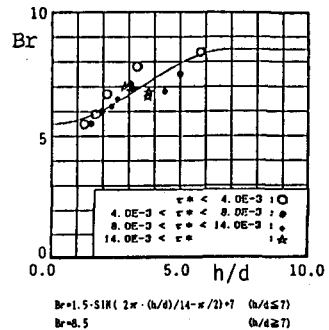


図-6 $Br \sim h/d$ 関係