川幅急変部を有する砂礫床河川における 乱流計測と摩擦速度の評価

TURBULENCE MEASUREMENTS AND EVALUATION OF FRICTION VELOCITY IN GRAVEL-BED RIVER WITH ABRUPT CHANGE OF RIVER WIDTH

冨永 晃宏*·榊 卓也**

Akihiro TOMINAGA and Takuya SASKAKI

*正会員 工博 名古屋工業大学院教授 社会工学専攻(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町) **学生会員 名古屋工業大学大学院博士前期課程 社会工学専攻(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

Filed measurement of turbulent flow structure was performed in a fluvial river with abrupt change of river width by using ADV. A large sand bar was formed in this area and the water rounds the bar creating a non-uniform flow field. The friction velocity was evaluated by data fitting methods for the log-low, Reynolds stress and turbulence intensity. The friction velocity evaluated by these three methods shows almost similar value but some differences were recognized among them due to the effects of boundary condition and flow structure. The turbulence structures in this flow field conform to the universal characteristics. The velocity measurements using ADV are useful and reasonably accurate for evaluating turbulence characteristics, and then friction velocity. The dissipation rate was evaluated from power spectra of primary velocity and a eddy viscosity was examined.

Key Words: field measurement, ADV, friction velocity, turbulence structure, roughness

1. 序論

河川整備により直線化し単調化した都市河川にお いて、河道の多様性を創出し河川生態環境を向上させ ようという試みが各地で行われている. 多様性の創出 手段として,低水路河岸を掘削してわんどを設けたり, 水制を用いて瀬・淵構造の創出を図ったりする方法が とられることが多い. 河岸のわんどは一様な流れの中 に低速の死水域を創出し、 魚類の繁殖や稚仔魚の生息 空間を確保しようとするものであり、この場合はわん どが土砂で埋没することやこれに伴う水質の悪化が問 題となる10,20. 水制を用いた河道多様性の創出について は、前面や先端部の深掘れ部の形成と移動した砂の堆 積による砂州の形成が期待されるが3),この場合は水 制自体の安定性や河床変動の河道全体への影響が問題 となる. 一般にわんどにおいては浮遊砂の堆積が懸念 されるが、掃流砂輸送が活発な河川においては、低水 路河岸の一部を広げてわんど空間を設置することは川 幅の急拡による流速の減速をもたらし、流砂量の急な 低下から掃流砂の堆積が予想される. こうした河川に わんどを設置する場合は、わんど域周辺の河床変動を

予測し、わんどそのものの埋没や周辺の異常な堆積を防ぐような対策を取る必要があると考えられる.

河床変動の予測には数値シミュレーション手法が 有用であるが、これを精度よく適用するには、実河道 の河床材料を把握し、抵抗特性を明らかにしておくこ とが重要である. 抵抗則としてはマニング式が用いら れることが多いが, 河床材料に応じた粗度高さやマニ ングの粗度係数の評価が必要となる. これには局所的 な摩擦速度の評価を行うことが要求される. そこで本 研究では、愛知県の一級河川矢田川に造成された人工 わんど周辺を対象として,河床形状が非一様な場での 開水路流れの乱流特性を超音波ドップラー流速計 (ADV)によって計測したものである. 観測場所は直線 的な区間で、低水路は細砂から数 cm の礫までの砂礫 で構成されており、低水路満杯に満たない小中出水時 にも河床材料が大きく移動していると考えられる. こ こにわんどが造成されたため、激しい河床変動が発生 し中央に砂州が形成され、わんどが閉塞する事態が発 生した. このような河床変動の予測のための基礎的研 究として、特徴の異なる流れ場における粗面乱流の構 造特性を検討し、摩擦速度の評価法について検討した.

2. 現地観測場所と計測方法

現地観測は図-1 に示す矢田川の人工わんどを含む 流れ方向 160m 区間,河道横断方向 65m 区間を対象と した. 施工された人工わんどは傾斜を有しており、低 水時は開口部 100m, 奥行き 25m, 高水時は開口部 140m, 奥行き35mの台形型わんどである.また,x=65m,y=45m に透過性のひし形置石工が設置されている. 河道本流 部の川幅は30m前後,河床勾配は1/800である.現地 の調査は河床変動、河床材料粒径および流速の計測を 行った、図中の番号は河床材料採取地点であり、粒度 分布をふるい分け試験によって調べた. 河床変動の観 測は、河床形状をトータルステーションにより測量し た. 横断測線の流下方向間隔は流れ方向に 10m 間隔, 河道横断方向には 3m 間隔で計測した. 河床形状の観 測は2008年7月16,17日,11月5日に行い、その間に は何回かの出水があった. 出水は矢田川上流の観測所 の水位が 1.5m 以上になったときを出水と定義すると, 3月から10月の間では月に3回から5回程度の出水が あり、8月末には水位4.37mの大規模な出水があった.

図-2 に観測地点の河床高計測結果を示す. 7月期の河床形状はわんど開口部中央に砂州が広がっている状態である. この砂州はひし形置石工の影響により形成されたものと考えられる. わんど開口部の上流側は瀬になっており、下流域は淵を形成している. 11月期では、8月末の大規模な出水により7月に観測されたわんど開口部の瀬に土砂がさらに堆積した. その結果、右岸と砂州がつながり、わんど開口部の上流側が閉塞した. この閉塞に伴い左岸側の上、中流での河床が低下し、淵が創出されている. このように、矢田川では出水により河床形状が変化することが確認された.

流速は7月16日に超音波ドップラー流速計(ADV, NorTek 社製)により平面構造を計測した。鉛直方向には1点または2点法により平均流速を求めた。次に本研究の主題である河床形状が非一様な場での乱流特性の把握のために、11月初旬に鉛直方向流速分布をADVにより計測した。ADVはポールに取り付けられ、ポールを支持台に沿ってスライドさせることにより鉛直方

向に移動させた. ADV は現地河川における乱れ計測ツールとして広く利用されており,乱れ計測に及ぼすノイズの影響も検討されている $^{4),5,6}$. いずれのケースもサンプリング周波数 20 Hz, サンプリング数 40 96 で 20 5 秒間計測を行った. 開水路乱流のバースティング周期が水深/平均流速の 2 ~3 倍であることを考慮すると 3 7,支配的乱れ時間スケールは 2 ~6s 程度であり,この計測時間は乱れ統計量算出に十分であると判断した. 計測箇所は,流下方向 2 ~0,80,160m の地点を河道横断方向 2 3m または 2 5m 間隔で計測し,それぞれの箇所において鉛直方向に 2 70 点前後計測を行った. 計測地点の河床形状と計測断面を図 2 3 に示す. ただし,ADV

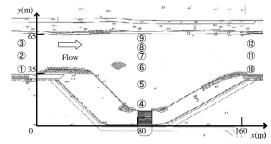
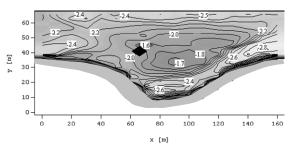


図-1 矢田川人工わんど付近平面図



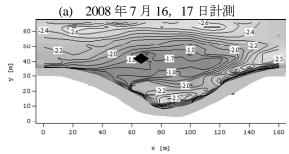




図-2 観測地点の河床形状

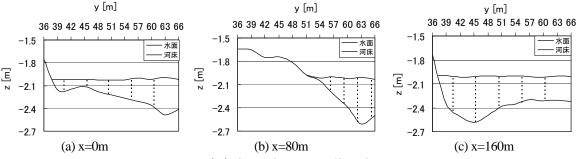


図-3 流速計測地点の断面形状と計測断面

はセンサー部より 5cm 下の点を計測するため、水面下約 6cm は計測することができない.

3. 摩擦速度の評価方法

現地河道の乱流特性の把握においては、摩擦速度の評価が最も重要である。まずこのような非一様な流れ場においても2次元開水路流れの乱流構造の普遍的特性が成立するかを確認し、局所的な抵抗特性の評価について検討した。摩擦速度の評価方法については、各種の方法が考えられるが、ここでは各計測点で得られた鉛直方向の流速分布、レイノルズ応力分布および乱れ強度分布から摩擦速度の算定を試みた⁸. それぞれの評価方法を以下に示す。

1) 対数則による摩擦速度の算定法

完全粗面では対数則は以下のようである.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{k_s} + 8.5 \tag{1}$$

ここに、u*は対数則による摩擦速度、 κ はカルマン定数で、 $\kappa=0.41$ となる普遍定数である。対数則の適用範囲は滑面の場合 zh<0.2 といわれているが、今回の計測では底面粗度の影響によりウェイク領域の存在が認められず、ほぼ水面近くまで適用可能であった。 k_s は相当砂粒粗度である。この式(1)を変形すると次式となる。

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln z + 8.5 u_* - \frac{u_*}{\kappa} \ln k_s \tag{2}$$

ここで、片対数プロットで表示される直線の回帰式

$$u = A \ln z + B \tag{3}$$

より得られた傾きAと式(2)より摩擦速度u*が算定される.

$$u_* = \kappa A \tag{4}$$

また同様に、切片Bと式(2)より相当粗度高さk。が次のように算定される.

$$k_s = \exp\left\{ \left(8.5 u_* - B \right) \cdot \left(\frac{\kappa}{u_*} \right) \right\} \tag{5}$$

2) 鉛直方向レイノルズ応力-ww による摩擦速度の算定法

2 次元開水路等流における鉛直方向レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ は底面近傍を除きせん断応力に一致することから、次のように表される.

$$\frac{-\overline{uv}}{u_{st}^2} = \left(1 - \frac{z}{h}\right) \tag{6}$$

鉛直方向レイノルズ応力-uwは水面でゼロとなり、底面では摩擦速度 u_{**}^{2} となる.式(6)に適合した直線分布の傾きから摩擦速度 u_{**} が求められる.

3) 乱れ強度による摩擦速度の算定法

2 次元開水路乱流の乱れ強度は禰津により求められた以下の普遍分布に従うことが知られている 7 .

$$\frac{u'}{u_{*x}} = 2.3 \exp\left(-\frac{z}{h}\right) \tag{7}$$

$$\frac{v'}{u_{*r}} = 1.63 \exp\left(-\frac{z}{h}\right) \tag{8}$$

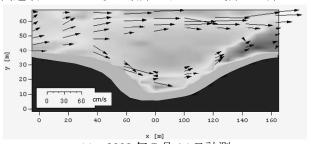
$$\frac{w'}{u_{*r}} = 1.27 \exp\left(-\frac{z}{h}\right) \tag{9}$$

乱れ強度はこれらの普遍分布から、ほぼ摩擦速度に比例する関係があり、これを普遍的特性とすると逆に摩擦速度の推定ができる。ここでは、u'の分布のフィッティングによって簡易的に摩擦速度 u**を算定した。

4. 計測結果とその考察

4.1 流れの平面構造と河床材料

7月16日の平面流速ベクトルおよび11月5日の詳細計測の水深平均流速のベクトル表示を図-4に示す.7月期では流れは砂州を回り込むように流れている.高速域がわんど上流の右岸からわんど対岸の左岸へと



(a) 2008年7月16日計測



(b) 2008年11月5日計測

図-4 平面流速ベクトル

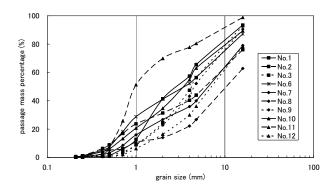


図-5 河床材料粒径分布

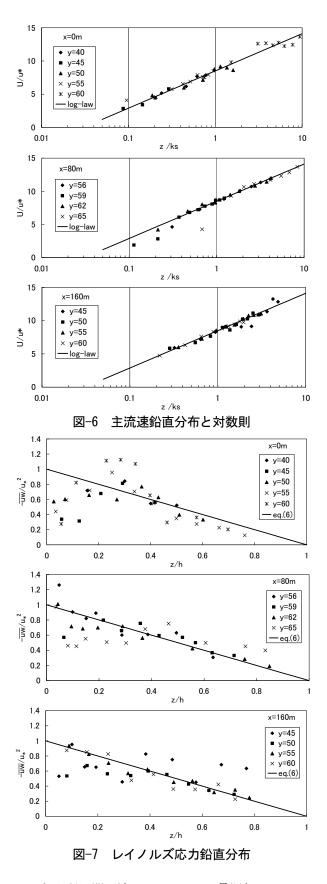
移っていき加速される様子がわかる. 7 月ではわんど 上流端からわんど内へ早瀬となって流れている. わん ど下流端では水深が深く非常に低速となっている. 11 月期では計測点は少ないが,流れ構造の変化が見て取 れる. わんど上流の開口部が閉塞したため,上流側で 左岸へ向かう流れが強くなっている. また下流では右 岸へ回り込むような流れを示す.

図-5 は図-1 に示した番号の地点で11 月に採取した 河床材料の粒径分布を示す. 河床材料は河床表面から10cm 程度までを採取した. x=0m では 2mm 以上の礫分が大半を占めているが、No.2 では 1mm 以下の砂分が比較的多く, 左岸側のNo.3 が最も粗くなっている. x=80m では、砂州中央のNo.6 で砂分が多い. 流路においては x=0m とほぼ同様の分布を示すが、河道中央測線上のNo.2 とNo.7 および左岸に沿ったNo.3 とNo.9 がほぼ変化が無く、流路の中央である No.8 地点では最も粗粒分が多い. x=160m では、河道中央のNo.11 が最も砂分が多く 1mm 以下の割合が大きい. 右岸側のNo.10 はNo.1 と同様の分布を示し、左岸側のNo.12 はNo.2、No.7 と同程度である. ふるい分け試験は最大15mm までしか行っていないが、最大粒径は 3~5cmの礫が含まれていた.

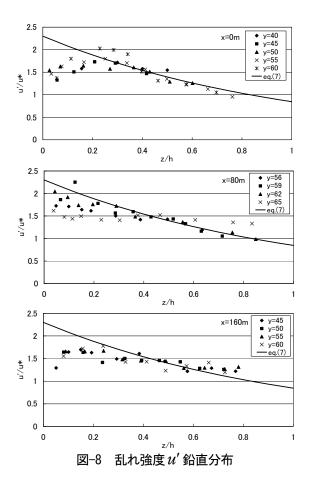
4.2 摩擦速度の評価

11 月計測において対数則による摩擦速度評価の根拠となる各断面の主流速鉛直分布を図-6に示す。図中の直線は粗面の対数則分布式(1)である。計測値がこれに一致するように回帰分析によって摩擦速度 u_* と相当粗度高さ k_s を求め,これを用いて無次元化したものである。得られた u_* と k_s の値はまとめて-8元に示す。ほぼ全地点において対数則が適用できることが確認される。ただし,-80m の -80m では水深が浅く,半水深より下の流速しか計測できなかった。-80m では、底面近傍の値が対数則直線よりやや下にずれている。ここで得られた粗度高さ-8点は -83cm 程度から最大で23cm にまで達し,河床材料の平均粒径に比べて最小で4倍程度,最大で30倍と非常に大きな値となった。この点については後に考察する。

次に、レイノルズ応力 – \overline{uw} の鉛直分布を \mathbf{Z} -7 に示す。わんど区間の上流側の \mathbf{x} = $\mathbf{0}$ m では水深が浅く、レイノルズ応力の底面近傍での減少が顕著であり、この部分を除いてフィッティングを行った。 \mathbf{y} = $\mathbf{5}$ 5m, $\mathbf{6}$ 0mでは \mathbf{z} / \mathbf{h} = $\mathbf{0}$.2 \sim $\mathbf{0}$.3 付近でレイノルズ応力の増大が見られる。 \mathbf{x} = $\mathbf{8}$ 0m の砂州外側の比較的水深の大きな断面では、右岸ごく近傍の \mathbf{y} = $\mathbf{6}$ 5m を除き、レイノルズ応力の直線分布が底面から水面までの広い範囲で確認される。 \mathbf{y} = $\mathbf{6}$ 5m では側岸の影響を受けて一様な分布に近づいて



いる. わんど区間下流の x=160m では最深部の y=45m において一様な分布となっている. y=40m でははく離による逆流が観測され, y=45m では砂州後端のこのはく離域に近く,特異な分布となったものと考えられる.



その他の地点では直線分布が適合し、摩擦速度 u_* の評価が可能である.

図-8に乱れ強度u'の鉛直分布と普遍分布式を示す. 粗面においては底面近傍で乱れ強度が減少することが知られているが,全体にこの特性が見られる.x=80mのy=65mではレイノルズ応力と同様に側岸の影響により一様化しているのが認められる.z/h>0.2ではほぼ普遍分布式に一致するように摩擦速度 u_{*r} を求めることが可能である.

以上のように ADV による流速計測から得られた各種摩擦速度およびその他の観測諸量を表-1 に示す. 表-1 において d_{50} は河床材料のふるい分け試験より得られた中央粒径, u_{*c} は岩垣の式より得られた限界摩擦速度である. また, 対数則, レイノルズ応力および乱れ強度それぞれの摩擦速度に対応するマニングの粗度係数を n_1 , n_2 , n_3 とし, 次式から計算した.

$$n = \frac{h^{1/6}}{\sqrt{g}} \left(\frac{u_*}{\overline{u}}\right) \tag{10}$$

各種方法による摩擦速度の比較を**図-9** に示す. 分布傾向はほぼ一致するが,値の違いや局所的なずれが見られる. 各計測断面における平均値を見ると,x=0m では, $\overline{u_*}=2.37$ cm/s, $\overline{u_*}=2.31$ cm/s, $\overline{u_*}=2.57$ cm/s となり,いずれの評価方法によっても同程度の摩擦速度が得ら

表-1 各計測点における摩擦速度および観測諸元

(a) χ =0m

y [m]	40.4	45.4	50.4	55.4	60.4
h [m]	0.10	0.12	0.23	0.30	0.43
d_{50} [mm]	3.07	3.07	6.85	6.85	4.22
u_{*_c} [cm/s]	4.98	4.98	7.44	7.44	5.84
$\frac{-}{u}$ [cm/s]	13.60	9.36	18.69	19.48	12.72
<i>u</i> *[cm/s]	2.55	2.46	2.57	3.07	1.18
n_{I}	0.041	0.059	0.034	0.041	0.026
k_s [cm]	6.48	17.19	8.60	23.93	3.19
u_{*_t} [cm/s]	2.58	2.32	2.54	3.02	1.56
n_2	0.041	0.056	0.034	0.041	0.034
u_{r} [cm/s]	3.29	3.03	2.54	2.80	1.70
n_3	0.053	0.073	0.034	0.038	0.037
$\overline{v}'/\overline{u}'$	0.89	0.88	0.92	0.86	0.73
$\overline{w}'/\overline{u'}$	0.50	0.56	0.53	0.56	0.54

(b) $\chi = 80 \text{m}$

y [m]	56.2	59.2	62.2	65.2
<i>h</i> [m]	0.20	0.35	0.53	0.66
d_{50} [mm]	7.62	11.94	4.57	4.57
$u_{*_{c}}$ [Pa]	7.85	9.83	6.08	6.08
\overline{u} [cm/s]	18.31	28.21	36.62	32.59
$u_*[\text{cm/s}]$	2.00	4.21	4.05	2.75
n_{I}	0.027	0.040	0.032	0.025
k_s [cm]	3.10	20.38	10.73	3.66
u_{*_t} [cm/s]	1.73	2.94	3.56	3.83
n_2	0.023	0.028	0.028	0.035
u_{*_r} [cm/s]	2.37	3.52	3.95	3.93
n_3	0.032	0.034	0.031	0.036
$\overline{v}'/\overline{u'}$	0.67	0.68	0.67	0.87
$\overline{w}'/\overline{u}'$	0.46	0.53	0.49	0.61

(c) x=160m

y [m]	45.3	50.3	55.3	60.3
h [m]	0.52	0.32	0.31	0.31
d_{50} [mm]	0.98	0.98	8.41	8.41
u_{*_c} [Pa]	2.26	2.26	8.25	8.25
\overline{u} [cm/s]	8.84	17.78	25.19	24.75
<i>u</i> *[cm/s]	0.91	2.03	2.67	3.01
n_I	0.029	0.030	0.028	0.032
k_s [cm]	8.25	9.16	7.79	11.46
u_{*_t} [cm/s]	0.95	1.53	1.81	2.24
n_2	0.031	0.023	0.019	0.025
u_{*_r} [cm/s]	1.38	1.84	2.31	2.80
n_3	0.045	0.027	0.024	0.030
$\overline{v}'/\overline{u}'$	1.10	0.73	0.75	0.675
$\overline{w}'/\overline{u'}$	0.43	0.49	0.46	0.471

れているが、乱れ強度による評価が若干大きくなった. y=40m、45m では水深が 10、12cm と非常に浅かったことから、鉛直方向には5箇所しか計測できなかったため、式のフィッティングには問題があるが、3つの方法による値はほぼ一致し、このような粗い見積もりによっても摩擦速度の評価が可能であることを示している。またここでは河道横断方向の流れが無視できないため、流れ方向流速uと横断方向流速vを合成した流速uについて検討する必要があると考えられる。合成流速uを用いて対数則およびレイノルズ応力により

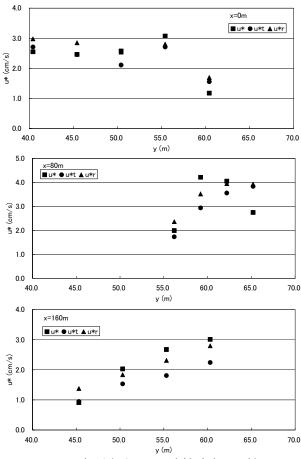


図-9 各種方法による摩擦速度の比較

表-2 主方向成分による摩擦速度の評価(x=0m)

y [m]	40.4	45.4	50.4	55.4	60.4
\overline{U} [cm/s]	19.88	16.11	24.17	21.84	12.88
u*[cm/s]	2.98	3.75	2.59	3.91	1.26
k_s [cm]	6.56	12.94	3.77	31.87	4.09
u_{*_t} [cm/s]	2.69	2.81	2.70	3.26	1.81
$u_{*_r}[\text{cm/s}]$	3.48	3.22	2.88	3.01	1.72

摩擦速度を算定した. その結果を表-2 に示す. 流下方向流速を主方向に変換したことで対数則への適合度も良くなり,この主流速を用いた対数則による摩擦速度は先に比べ大きくなった. 同時に相当粗度高さが小さくなった. レイノルズ応力, 主方向乱れ強度も同様に大きくなったため, この摩擦速度も増加した. このことは数値計算における底面の境界条件として考慮すべき点である.

x=80m では $\overline{u_{**}}=3.25$ cm/s, $\overline{u_{**}}=3.02$ cm/s, $\overline{u_{**}}=3.44$ cm/s となり, x=0m と同様に良好な一致を示すが,横断分布を見ると y=59m では対数則による値が大きく,レイノルズ応力による値が小さいのに対し,y=65m では対数則による値が小さくなっている。y=59m では,河床粒径が他より大きいことや河床形状の影響が現れたものと考えられる。x=0m においても粒径が比較的粗いy=50m,55m では対数則による値がレイノルズ応力に

よる値より大きい傾向にある. 左岸近傍の y=65m では 対数則による算定値が乱れによる算定値に比べて小さ くなった. これは左岸側壁に近い点であり護岸粗度も 存在したことから流速が減少したのに対して乱れは逆 に大きくなったものと考えられる. この傾向は x=0m においても見られた.

x=160m では $\overline{u_*}=2.15$ cm/s, $\overline{u_*}_{i_*}=1.63$ cm/s, $\overline{u_*}_{i_*}=2.08$ cm/s となり,対数則と乱れ強度による値は同程度であるが,レイノルズ応力による値がかなり小さくなる。y=40m の観測点はわんどの開口部付近に位置し,流速が非常に遅く逆流が発生しているため摩擦速度などの評価は行えなかった。y=45m では対数則,レイノルズ応力の算定値はほぼ一致しているが,レイノルズ応力の分布は直線分布から大きくずれており信頼性に欠ける。乱れ強度による値は他の 2 つに比べ大きくなった。y=50m 以上ではレイノルズ応力による値が対数則による値に比べてかなり小さくなった。これはこの地点が砂州の後方に位置し,流積が狭く深い断面から横断方向に拡大しはじめた流れであることが原因として考えられるが,さらに検討すべき点である。

以上の結果より、対数則、レイノルズ応力および乱れ強度という3種類の異なる方法で求められた摩擦速度の値には互いに違いが認められたものの、現地での計測という誤差要因を考慮すれば、今回の ADV を用いた流速および乱れ計測は妥当な精度を有していると考えられる。ただし、3種類の評価方法により算出した値が類似した値を取ったとしても、この評価値が真の値に近いという保証はなく、あくまで摩擦速度を推定する手段としてこのような方法をとらざるを得ないという位置づけである。摩擦速度の横断分布の変化に着目すれば、わんど上流でほぼ一様な分布が、わんど対岸の狭い深掘れ部に集中することで増大し、わんど下流で流路が広がり再び減少し、下流では左岸側が大きく右岸側が小さい分布を示す。

4.3 粗度高さと粗度係数

対数則から得られた相当砂粒粗度k。は河床粒径に比べて非常に大きな値をとることとなった.これについては河床材料が混合砂であり,1mm以下の砂から3~5cm程度の礫までを含んでいることから,これらが粗度要素としてどう働くかを考慮する必要がある.数値計算においてはマニングの粗度係数を用いたり,直接粗度高さを用いたりする場合が考えられるが,河床材料の平均粒径では過小評価となることを示している.得られた摩擦速度からマニングの粗度係数を計算して示しているが,横断方向の平均値はx=0mではn=0.0400,x=80m,160m ではn=0.030である.水深が浅い上流部

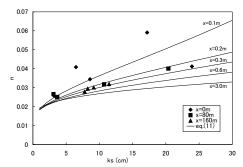


図-10 相当砂粒粗度とマニングの粗係数の関係

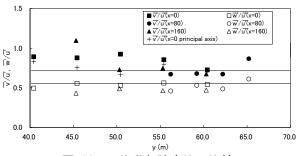


図-11 平均乱れ強度比の比較

では*n*は大きくなる可能性があることを示している. ここで相当砂粒粗度とマニングの粗度係数の関係を**図** -10 に示す. 図中には粗面対数則とマニング式から得られる次の式を示す.

$$\frac{n}{k_s^{1/6}} = \frac{(h/k_s)^{1/6}}{\sqrt{g}} \frac{1}{(1/\kappa)\ln(h/k_s) + 8.5 - 1/\kappa}$$
(11)

図には本計測範囲の水深 h=0.1m ~ 0.6 m までの式(11) の変化を示している. x=0m の水深の浅い地点 2 箇所では大きく上にずれているが、これは浅い水深での計測の困難さに起因するものと考えられる. 水深が増大すれば図中の最下段に示した h=3.0m の曲線に漸近する. 計算で粗度を設定する場合には、河床材料の粒径分布と水深を考慮した算定法が必要となる.

4.4 乱れ構造の相似性

このような砂礫河床の非一様な流れ場における乱れ構造の相似性については、レイノルズ応力から得られた摩擦速度と乱れ強度から得られた摩擦速度がほぼ一致することからも言える. **表-1** には乱れ強度の非等方性に関する指標として $\overline{v'}/\overline{u'}$ 、 $\overline{w'}/\overline{u'}$ を示している.式(7)、(8)、(9)の普遍分布式から次の値が得られる.

$$\overline{v'}/\overline{u'} = 0.71 \tag{12}$$

$$\overline{w'}/\overline{u'} = 0.55 \tag{13}$$

各計測点における水深平均の乱れ強度比の比較を \mathbf{Z} -11 に示す. $\overline{w'}/\overline{u'}$ は経験式とほぼ同程度の値をとり、普遍的な特性が確認される. $\overline{v'}/\overline{u'}$ については上流域および下流域で経験式の値より大きな値をとり、この付近では平面的な流線の曲がりの影響が現れているものと考えられる. この点は主方向を考慮すれば図に示

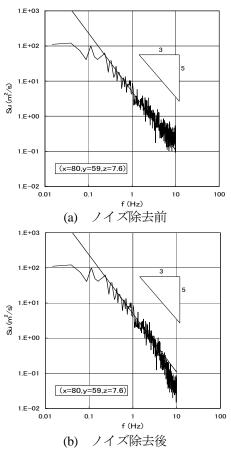


図-12 主流速スペクトル分布の例

したように式(12)に一致してくることが確認できる. x=160m, y=45m では, 大規模な乱れ変動を含んでいることによるものと考えられる.

4.5 スペクトル分布と逸散率 ε の推定

主流速 u のパワースペクトルの一例を生データとノイズ除去後のものとについて図-12 に示す。ADV の流速変動は 20Hz で 205 秒間記録されたが,数 Hz から 10Hz の間にノイズ成分が認められる。そこで今回はハニングフィルターによって高周波成分を除去した。図-12 の(a)においても-5/3 乗則が成立しているのが認められるが,5Hz より高周波側でパワーの減衰が弱まる。(b)のフィルター処理後ではこの部分が減少し,-5/3 乗則の適用範囲が広がる。ただし,フィルターの有無にかかわらず-5/3 乗則のフィッティング直線は変化しない。したがって,Taylor の凍結乱流仮説が成立するとして,この直線から次式によって逸散率 ϵ を推定した。

$$S_{u} = \frac{A}{(2\pi)^{2/3}} U^{2/3} \varepsilon^{2/3} f^{-5/3}$$
 (14)

ここに、 S_u は u のスペクトル、A は定数(=0.50) 9 、f は周波数である.ここでは得られた逸散率の妥当性と k- ϵ モデルの適用性を検討するために、次の渦動粘性係数の形で比較を行った.

$$\mathbf{v}_{t1} = \kappa u_* z (1 - z/h) \tag{15}$$

$$v_{t2} = C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{16}$$

式(15)における u_* は対数則から求めた摩擦速度, C_* は 定数で標準モデルの 0.09 を用いた. この一例を図-13 に示す. また渦動粘性係数の水深平均値を両者で比較 したものが図-14 である。まず水深平均値で見ると x=80mの左岸側で両者が大きく異なっている.これは、 ここでは対数則から求めた摩擦速度が乱れから求めた 値よりかなり小さかったことに起因する. また、 x=160mのy=45mでk-εモデルの値が大きくなっている. ここでは流速変動に砂州後方の不安定な大規模変動が 含まれていたことによるものと考えられる. これらを 除けば両者の値はほぼ同程度の値をとることがわかる. これを鉛直分布の例で見ると、底面で小さく底面から 離れるにつれて増大し、水面に向かって減少する特性 がよく一致しているといえる. したがって, 現地河道 の乱流特性はかなり普遍性が高く、乱流モデルの適用 が妥当であることがわかる.

5. 結論

ADV による観測は、計測時のレスポンスの良さや乱 れの計測も可能であることから、非常に有用であると 考えられる. 今回の観測から, 摩擦速度は河床形状や 河床材料,流れ構造の影響により大きく変動しており, 対数則, レイノルズ応力, 乱れ強度といった解析手法 に対するそれらの影響が異なり、摩擦速度の評価に相 違をもたらす場合があった. しかしながら、評価され た値は平均的にはよく一致しており、いずれの評価方 法も妥当であることが示された. 今回のような非一様 な砂礫床河道においても開水路乱流の普遍特性が十分 に保持されていることが確認された. したがって様々 な方法から摩擦速度を算定し、現地の多様な条件を考 慮して摩擦速度を特定することが、高い精度の摩擦速 度の決定に求められるものと考えられる. また, 河床 材料から粗度高さや粗度係数を決める場合には、実際 の粒径より非常に大きくなることが予想され、何らか の計測によって検証することが求められる. この場合 乱れ強度の水深方向変化は小さく、計測も容易である ことから乱れ強度計測による検証が有効と考えられる.

参考文献

- 1) 冨永晃宏,鄭載勲,阪巻実佳:複断面開水路高水敷に設けられた凹部の流れ構造,応用力学論文集,vol.8,883-891,2005.
- 2) 冨永晃宏・久田陽久:人工わんどの水交換機構に与える

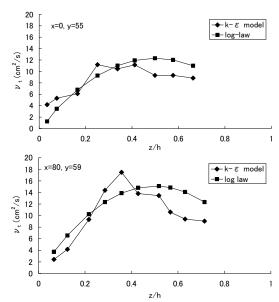


図-13 渦動粘性係数鉛直分布の比較例

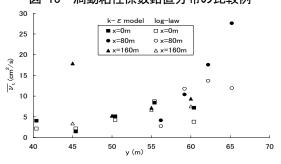


図-14 渦動粘性係数水深平均値の比較

わんど形状と植生の影響に関する研究,水工学論文集,vol.47,517-522,2003.

- 3) 松本大三, 冨永晃宏: 越流型水制群を用いた河床変動創 出に及ぼす水制設置角度の影響, 水工学論文集, Vol.50, 1009-1014, 2006.
- Kim, S.-C., Friedrichs, C. T., Maa, J. P.-Y.and Wright, L. D.: Estimating Bottom Stress In Tidal Boundary Layer From Acoustic Doppler Velocimeter Data, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 126, No. 6, 2000.
- Song, T. and Chiew, Y. M.: Turbulence Measurement In Nonuniform Open-Channel Flow Using Acoustic Doppler Velocimeter (ADV), Journal of Engineering Mechanics, Vol. 127, No. 3, 2001.
- Strom, K. B. and Papanicolaou, A. N.: ADV Measurements around a Cluster Microform in a Shallow Mountain Stream, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 133, No. 12, 2007.
- 7) 禰津家久: 開水路の乱流構造に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, 1977.
- 8) 冨永晃宏・金田雪雄・神谷昌文:河川湾曲部における3 次元乱流構造の現地計測と底面せん断応力の評価方法, 水工学論文集, vol.3, pp.727-732, 1994.
- Bradshaw, P., Conditions for the existence of an inertial subrange in turbulent flow, A.R.C., R.&M., London, No.3603, 1967.

(2009年4月9日受付)