

前田川における ADV による 3 次元乱流計測

3-D Turbulent Measurement by ADV in Maeda River

小金理宏*・長林久夫**・木村喜代治***

By Michihiro KOGANE, Hisao NAGABAYASHI and Kiyoji KIMURA

The Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) is used to determine 3-D flow characteristics of small scale river Maeda. Even if the flow of the river has very complex 3-D characteristics owing to sand waves of the bed, vegetation zone of the side walls and trapezoidal shape of the channel, it is recognized that the turbulent characteristics of the river has highly similarity to the flow in the model channel examination. The frequency response of the ADV to the velocity fluctuation has good agreement in the range from region of the energy containing eddies to the inertial subrange in universal equilibrium region of power spectrum.

Keywords : 3-D velocity profile, turbulent characteristics, ADV, Maeda River

1. はじめに

実河川の流れは、乱流状態にあり大きい平均流速勾配を持つせん断乱流である。そして、その流れの挙動は3次元적であり、より複雑な構造となる。流水抵抗、流砂などは、乱流現象と密接な関係があり、この乱流現象の解明は、水工学上最も重要な課題の一つである。すでに実験室規模の模型開水路における流れの乱流構造やその発生機構は、実験や数値計算などから詳細に検討がなされており、水路幅水深比 b/h の小さな水路では、最大流速位置が自由水面より降下することや、側壁効果から並列らせん流が生ずる機構など、その基本的特性が明らかにされている。

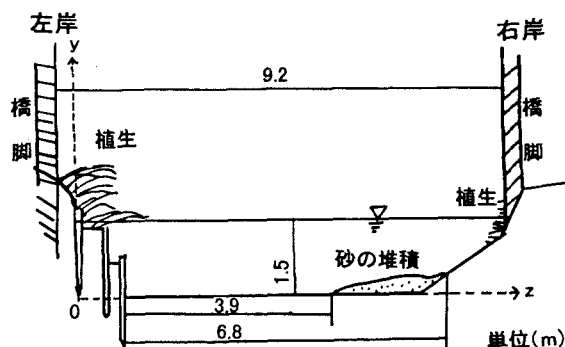


図1 計測地点の横断面図

* 学生会員 日本大学大学院工学研究科
(〒963 福島県郡山市田村町徳定字中河原1)

** 正会員 工修 日本大学助教授

*** 正会員 工博 日本大学教授

一方、現地観測による検討も行われ、用水路規模の流れにおける乱流計測も試みられている^{1)~4)}。本研究では、小河川規模の水路での乱流特性を把握することを目的としている。測定は、幅 8m、平均水深 1.5m、総延長約 1.5km、平均河床勾配 1/3000 の発電用の取水路において（一部農業用水に利用している）、超音波流速計 ADV を用いて 3 次元乱流計測を行い、流れの特性および ADV の応答特性について検討を行った。

2. 計測地点および計測断面内の状況

計測地点は直線区間 300m の中間点の橋梁下とした。この水路は農業用水路を取水路に用いたもので流下方向に水路断面の様相が異なり、側面が石貼りの部分や松杭で河岸を補強して台形断面とした箇所があり、自然河川に近い状態であった。計測点の河床、側岸の状況は図 1 に示すように河床では左岸から約 5m の付近から右岸に向かうにつれて砂が堆積してるのがみられた。また側岸においては兩岸ともに植生がみられた。右岸では約 5~10cm の雑草が密集しているのに対して、左岸では約 30~40cm ぐらいの細い草が繁茂しており草の先端は水面と接していた。

3. 計測方法

流速計測は、Sontec 社製の 3 次元超音波流速計 ADV-Lab(Acoustic Doppler Velocimeter) を用いて、行った。測線は、左岸より 2m を始点として 0.5m 間隔で 6.5m まで 10 測線とした。測点は、各測線ごとに水面から 10cm 間隔で鉛直方向に 11 点~14 点とした。サンプリング周波数は 10Hz としデータ数は 512 個（河床付近のみ 1024 個）とした。なお本測定における水理諸量を表 1 に示す。

4. 結果および検討

4-1 流れの特性についての検討

断面最大流速 U_{max} で無次元化した主流流速分布を図 2-a に示す。河床付近では河床面に平行な分布が得られており、水面に向かうにつれて等流速線は複雑となり、3 次元性の強い流れであること、また両側岸の水面付近では植生の存在により流速が低下していることが確認できる。さらに、河床付近の $z=5m$ で低速領域となっており上昇流による渦が集中していることや、最大流速位置が水面から降下しており水面付近にお

表 1 水理諸量

水路幅	断面積	潤辺	径深	水路勾配
b (m)	A (m^2)	P_s (m)	R (m)	I_0
8.000	9.031	8.297	1.088	1/3000
水面勾配	摩擦速度	平均流速	流量	フルード数
I_s	U_{*0} (m/sec)	V_m (m/sec)	Q (m^3/sec)	F_r
1/30000	0.019	0.389	3.513	0.119

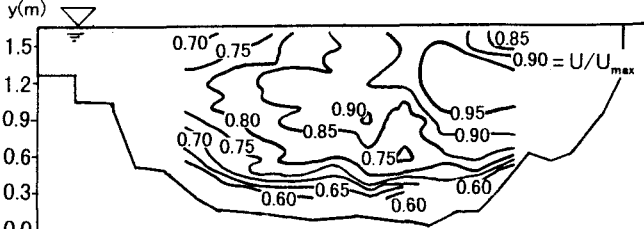


図 2-a 主流流速分布 (U/U_{max})

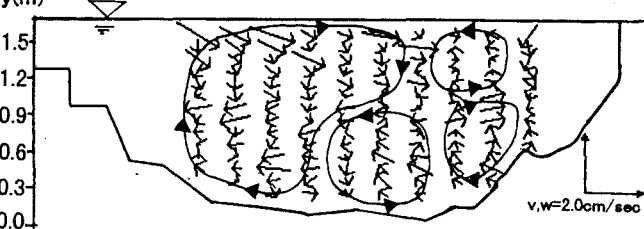


図 2-b 2 次流ベクトル図



図 2-c 主流乱流強度分布 (u'/U_{*0})

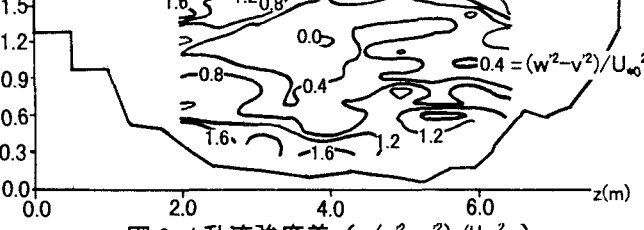


図 2-d 乱流強度差 ($(w^2 - v^2)/U_{*0}^2$)

ける2次流効果が推測される。また、最大流速位置が中央ではなく右岸側に寄っているのは、計測地点直上流で川幅が左岸に広幅しているためだと考えられる。次に、2次流ベクトル図を図2-bに示す。左岸の側岸部水面付近から水路中央測線に向かう、非常に大きな渦が見られる。また、右岸側にも左岸側よりも小さいが水路中央に向かう渦が見られ、この渦により最大流速位置が水面より降下するものと考えられる。さらに、左岸側から発生する大きな渦が、水路中央測線を越えて $z=5\text{m}$ 測線付近まで達しているのは、水路の断面が複雑な形状となっていることや、側岸部に繁茂している植生帯の影響が水路中央付近まで及ぶためと考えられる。また、河床付近には、 $z=5\text{m}$ において局所的な河床粗度の変化による、2つの対向する渦の集中領域が確認できる。

次に、主流乱流強度分布を図2-c、乱流強度差 (w^2-v^2) の分布を図2-dにそれぞれ示す。これらは、すべて断面平均摩擦速度： $U_{*0} = \sqrt{gRI_s}$ で無次元化してある。図2-cは、河床および側岸付近において乱れが強くなっており、乱れの発生領域となっている。特に両岸の水面付近は底面と同程度の強度となっており植生の効果が強い。図2-dは、河床付近で正領域、計測断面の中央で零となる。そして、水深の約6割ぐらいから水面付近にかけて再度正領域となっている。これは、水面付近で v が w よりも抑制されるためである。さらに、水面付近の両側岸付近における分布は、右岸と左岸とでは異なっているため、この領域の乱流構造に着目して検討を行う。両側岸付近の測線における乱流強度差 $(w^2-v^2)/U_{*0}^2$ の分布を図3-aに、乱流強度 w'/U_{*0} 、 v'/U_{*0} の分布を図3-bにそれぞれ示す。図3-aから、 $0.2 \leq y/h \leq 0.6$ の領域の値はほぼ等しいが、 $y/h > 0.6$ では、左岸の方が大きな値となっている。このことは、図3-bの v' と w' の分布から、 v' は水面近くで右岸に比べて左岸の乱れの増加が押さえられていること、それに加えて w' が右岸よりも大きいことから裏付けられる。よって、両側岸における植生の性質が異なることや、それに加え断面形状の差異の影響が大きな要因になっていると考えられる。

4-2 河床せん断応力についての検討

レイノルズ応力 $-uv$ の鉛直分布を図4に示す。

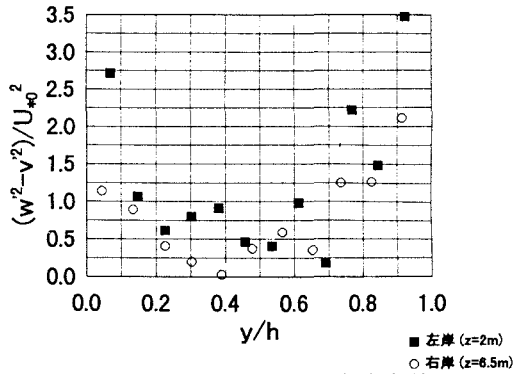


図3-a 両側岸付近の乱流強度差

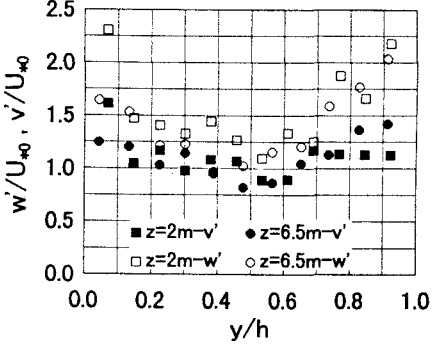


図3-b 両側岸付近の乱流強度分布

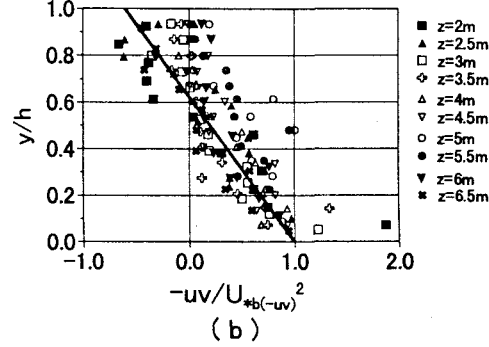
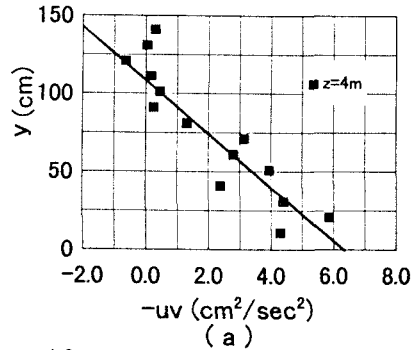


図4 レイノルズ応力分布

図 4-a は $z=4\text{m}$ の結果であり、底面を最大値とする直線分布に従っている。この直線から河床せん断応力 τ_0 を各測線ごとに評価した。各測線のレイノルズ応力- uv の直線分布は最大流速位置を 2 次元開水路の水面と仮定して引いている。 τ_0 から評価された河床摩擦速度 $U_{*b(-uv)} = \sqrt{\tau_0/\rho}$ によって無次元化したレイノルズ応力の鉛直分布を図 4-b に示す。図中の直線は図 4-a と同じものであり、河床付近のデータは図中の直線に従うことから、各測線のレイノルズ応力による河床摩擦速度 $U_{*b(-uv)}$ の評価はほぼ良好と見てよい。さらに、 $U_{*b(-uv)}$ から式(1)を用いて各測線の y' を評価した。

$$\frac{U}{U_{*b}} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{y'}\right) \cdots \cdots \cdots (1)$$

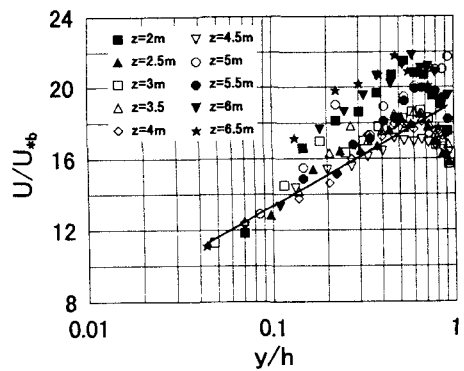


図 5-a 対数則分布

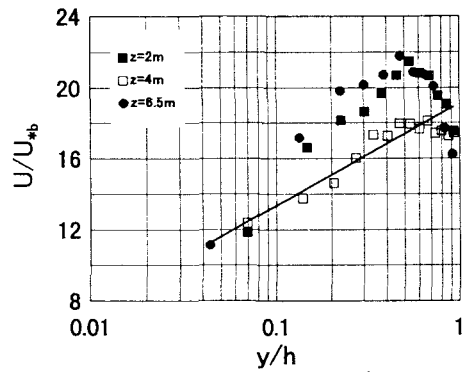


図 5-b 対数則分布

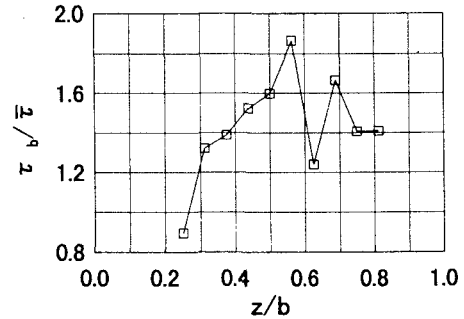


図 6 河床せん断応力分布

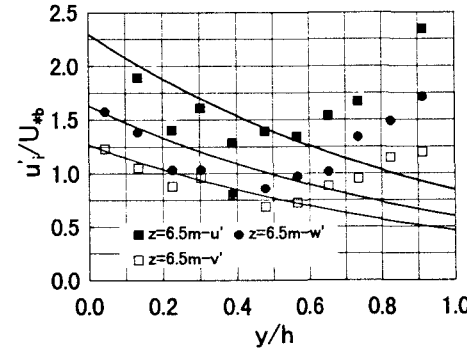
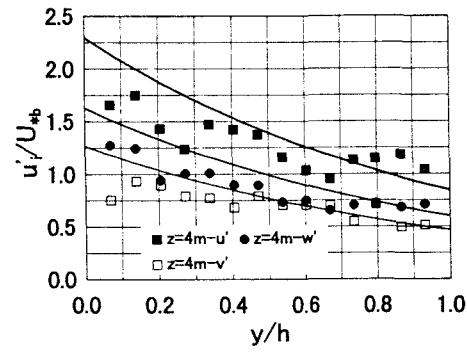
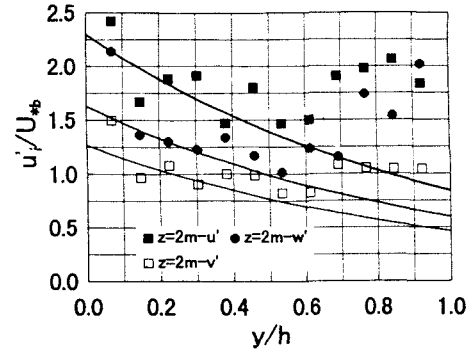


図 7 乱流強度分布(3成分)

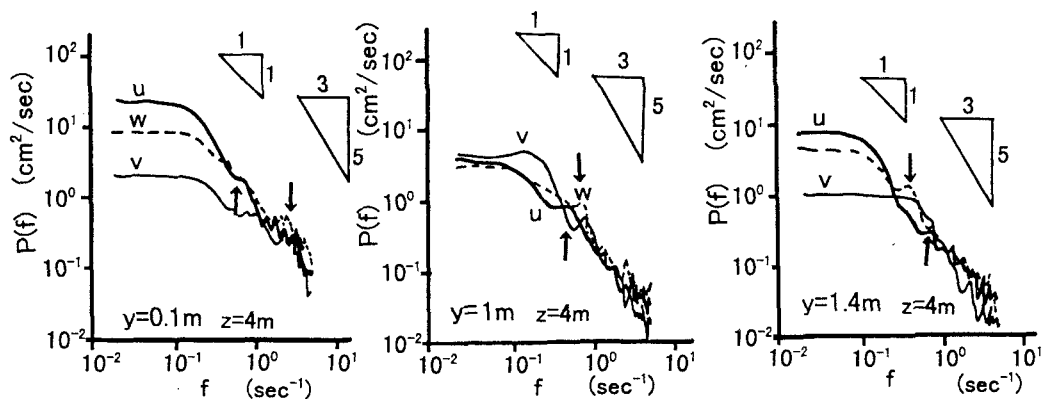


図 8-a パワースペクトル

そして、 y' の平均値を用いて河床付近で式(1)が成立するように、主流速度分布から U_{*b} を再度決定した。この U_{*b} を用いた主流速度の無次元表示を図 5-a に、また図 5-b に左岸付近の測線 ($z=2m$)，中央測線 ($z=4m$)，右岸付近の測線 ($z=6.5m$) における主流速度の無次元表示を示す。まず図 5-a において、約 $y/h \leq 0.2$ でほぼ対数則が成立しているのがわかる。また、 $z=5m$ より右岸側の河床には、砂の堆積があり河床粗度が変化しているために、 $z=5 \sim 6.5m$ では $y/h > 0.2$ で対数則分布から大きく上方に外れている。また、図 5-b では、両側岸付近の分布は、河床付近においてのみ対数則が成立することを示している。次に、対数則で評価された河床せん断応力の横断分布を図 6 に示す。なお、図中において τ は断面平均せん断応力 wRI_s である。値は、左岸から右岸に向かって増加しており、下降流による渦が集中する $z/b=0.56(z=4.5m)$ 付近においてピークとなる。そして、上昇流による渦が集中する $z/b=0.63(z=5m)$ 付近で一旦減少し、また右岸に向かって増加が始まるといった分布をしている。 $z=5m$ において河床せん断応力が減少することは、砂の堆積による河床面粗度の急変に対応しているためだと考えられる。

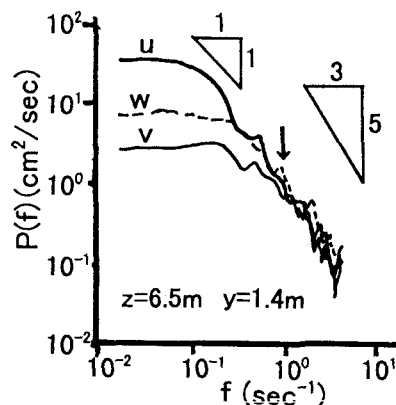
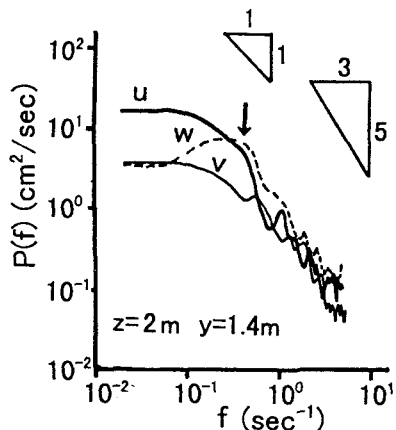


図 8-b パワースペクトル

また、図 7 は乱流強度の 3 成分を左岸付近の測線 ($z=2m$)，中央測線 ($z=4m$)，右岸付近の測線 ($z=6.5m$) について表示したもので、図中の実線は次式の補正による半理論普遍関数である⁵⁾。

$$\frac{u_i'}{U_{*b}} = K_i \exp(-y/h) \cdots \cdots (2)$$

$i=1,2,3$ で $u_i'=u',v',w'$ ， $K_i=2.30,1.27,1.63$ となる。また、 U_{*b} は河床付近において対数則によって評価されたものである。これより水路中央付近 ($z=4m$) の測線の分布は、普遍関数表示とほぼ一致している。さらに、左岸付近・右岸付近についても約 $y/h=0.2$ 以下の河床付近では、普遍関数で表示されることが確認された。

4-3 ADVの応答周波数特性とパワースペクトルの変化特性についての検討

水路中央付近の測線 ($z=4\text{m}$) における u, v, w のパワースペクトルを河床付近 ($y=0.1\text{m}$), 中央付近 ($y=1\text{m}$), 水面付近 ($y=1.4\text{m}$) に分けて図 8-a に示す。10Hz のサンプリングにより慣性領域まではほぼ対応していることがわかる。また、測点が上昇すると u のスペクトルピーク $\uparrow$ は高い周波数に移動するのに対して、 w のスペクトルピーク $\downarrow$ は低い周波数に移動しており、何らかのエネルギー伝播が考えられるが、これに関しては今後の考察にゆだねる。図 8-b の w 成分における低周波側のスペクトルピーク位置 $\downarrow$ に着目して、兩岸の植生帯の流れの効果を検討する。この植生帯が円柱状の障害物であるとして、その後流によりスペクトルピークが生じたものと仮定する。円柱の径 D は、ストロハール数 : S を用いることにより次式で表わされる。

$$D = \frac{SU}{f} \dots\dots\dots (3)$$

ストロハール数はレイノルズ数 $Re > 10^3$ の場合 $S=0.21$ となることが知られている⁶⁾。また、 f は円柱の背後に発生する渦周波数 (sec^{-1}) で、 U は主流平均流速である。この f を図 8-b に示すパワースペクトルにおけるスペクトルピーク $\downarrow$ の周波数とすると、 D は右岸では約 6cm, 左岸では約 30cm となり左岸植生帯は右岸植生帯よりも 5 倍の大きさを持つ粗度要素であることが推定される。

5. 結論

小河川ではあるが、自然河川に近い水路の乱流計測を行って、主流流速と乱れ特性量の分布特性を検討した。境界面は複雑であり、側岸部には植生も見られたが、室内実験で得られた多くの知見が適用できることが認められた。以下に主要な結論を示す。

- (1) 河床粗度の変化に対応した 2 次流による渦構造が確認された。
- (2) レイノルズ応力- uv の直線分布から評価した河床摩擦速度 $U_{*b(uv)}$ を用いて対数則の y' の平均値求め、さらに対数則から求めた河床摩擦速度 U_{*b} はほぼ良好な一致を示した。
- (3) 3 次元性の強い流れにおいても、河床摩擦速度を妥当に評価することにより、河床付近において 2 次元開水路の乱流強度の普遍関数表示が成立することが認められた。
- (4) 各流速成分のパワースペクトルから約 0.5~5Hz の間で $5/3$ 乗則の慣性領域が確認され、ADV の周波数対応が確認された。
- (5) 左岸の植生は水面付近の w を増大させ v を抑制させることが認められ、流れに及ぼす両側岸植生帯の性質の違いが確認できた。さらに、植生帯の流れに及ぼす効果を円柱の後流に換算すると、その径は左岸側で約 5 倍ほど大きく、植生による流れへの影響が確認できた。

最後に、本計測を実地するにあたり㈱アレック電子および東北電力㈱のご協力を賜りました。記して感謝申し上げます。

<参考文献>

- 1) 長林・木村：用水路における乱流計測，第 38 回日本大学工学部学術研究講演要旨集，pp154-157，1995
- 2) 桶津・富永：河川乱流の野外計測と 2 次流に関する研究，土木学会論文集，第 467/II-23，pp.49-56，1993
- 3) 辻本・北村：小型電磁流速計による野外流路での乱流測定，水工学論文集，第 35 巻，pp.333-338，1991
- 4) 福岡・渡辺：水草が繁茂している用水路の流れ，水工学論文集，第 37 巻，pp.215-220，1993
- 5) 桶津 家久：開水路乱流の乱れ強度に関する研究，土木学会論文集，第 261，pp.67-76，1977
- 6) 小川 明 著：渦学，山海堂，pp.15-16，1983