

低水路・高水敷間の法面勾配が流速分布 および二次流分布に及ぼす影響

Effects of Angle between Main Channel and Flood Plain
on Velocity Profiles and Secondary Currents

中川博次*・瀬津家久**・阿部崇***・志村拓也****

By Hiroji NAKAGAWA, Ichisa NEZU, Takashi ABE and Takuya SHIMURA

It is very important in River Engineering and Hydraulic Engineering to investigate the effects of side-bank angle θ between the main channel and flood plain on velocity profiles and secondary currents in compound open-channel flows. In the present study, very accurate turbulence measurements were conducted with a new two-component fiber-optic laser Doppler anemometer (FLDA). Because the measuring points were about 500, accurate contour lines of velocity and vector plot of secondary currents could be obtained and analyzed in detail. Of particular significance is the shift of velocity-dip phenomena towards the main channel as the flood-plain angle decreases.

KeyWords : Compound Open-channel Flows, Effects of Flood-plain Angle, Secondary Currents, Turbulence Measurements, FLDA

1. はじめに

一般の自然河川には往々にして、緩やかな勾配を持つ法面や高水敷が存在している。高水敷は通常はレクリエーション等に用いられるが、高水時には流量調節上重要な働きを果たすものであり、高水敷を含んだ河川の流れの仕組みはかねてからの懸案の問題でもある。またそのような状態における流速分布、境界せん断応力の予測は護岸や土砂輸送の研究には不可欠なものである。底面で生じる乱れによる横断方向のせん断応力と横断方向の二次流の組織相関は、水工学はもとより流体力学上非常に興味深い問題であり、実験的研究では、Shiono & Knight (1991)¹⁾やTominaga & Nezu (1991)²⁾、数値計算的研究としてはNaotら (1993)³⁾でそれぞれ検証されてきた。しかしながら、これらの研究でモデリングされた複断面水路は矩形で構成された水路形状であった。実際の自然河川においては先に述べたような法面勾配が存在しており、このような水路形状における水理学的な特徴は、実験上ではその複雑な幾何形状および乱流構造ゆえ、未だ解明されていない。また本実験ではファイバー・レーザ流速計 (FLDA) を用いて、これまで計測が困難であった複断面開水路流れの精密な三次元乱流計測を行った。このような計測は、これまでには Rhodes & Knight (1994)⁴⁾の例がある

* 正会員 工博 京都大学工学部教授 環境地球工学教室

** 正会員 工博 京都大学工学部助教授 環境地球工学教室

(〒606 京都市左京区吉田本町)

*** 学生員 工修 京都大学大学院 環境地球工学専攻

**** 学生員 工修 京都大学大学院 環境地球工学専攻

程度であり、法面勾配を考慮した精密な実験データは皆無であると言ってよい。そこで本研究では、1種類の矩形複断面とそれに対応した2種類の法面勾配の複断面水路について高精度な実験を行う。これによって得られたそれぞれについての詳細な実験データを用いて、水理学的特徴と法面との相関的な影響を考慮し、実際上の河川工学に寄与したいと考える。

2. 実験装置と実験方法

実験に用いた開水路の寸法としては長さ8m、幅30cm、高さ25cmであり、図-1のようなアクリル製可変勾配型循環式水路である。また瞬間流速の計測には、水路側壁（光学ガラス製）方向と水路上方の2方向より4ビーム後方散乱型2成分ファイバーレーザ流速計（FLDA, DANTEC社製）を用いて、速度の3成分（ U, V, W ）を精密に計測した。FLDAは、レーザ光を周波数シフトして位相制御し、バイアス制御などの計測に必要な全ての設定がコンピュータ支援で行われ、ドップラー信号がAD変換されたのち、計測データとしてLANシステムやハードディスクにファイルとして記憶される。このようなコンピュータ支援バースト信号処理器は最近開発されたものであり、高性能な流速計である。また複断面水路のような後方散乱方式を必要とする乱流計測には必要不可欠な計測機器である。このシステムに記録される値は、バーストの開始時刻（散乱粒子の到着時刻）、バースト継続期間（散乱粒子の通過時間）、ドップラー信号より計算された粒子速度である。計測地点は、上流からの流れが十分に発達している必要があるため、水路上流端から5mとした。また、水路長8mのうち上流部と下流部50cmには遷移区間を設け、7mの区間には、非対称複断面水路形状の、法面勾配をもつアクリル製のBOXを設けた。さらに水面上方からの計測の場合、自由水面の揺動が大きいと計測精度に大きな誤差を含む可能性があるため、自由水面の振動の十分に小さい流れ（ $Fr=0.1$ 程度）で計測した。二方向からの計測による主流速 U の誤差は、最大主流速 U_{max} の2%以内、乱れ強度 u' ではその最大値 u'_{max} の3%以内であった。なお、今回の計測にあたって平均サンプリング周波数は約100Hz、サンプリング時間は60secで行った。測点はケースによっては断面内に500点ほど設け、精密にトラバースした。また、十分な数のドップラー信号を得るために、2組のビームは流下方向に対して45°にセットしたが、計測後にNezu & Rodi (1986)⁵⁾のように角度補正を行い連続式を満足させたが、その際の補正角度は0.5°以内であった。実験条件表は表-1に示

表-1 実験条件表

CASE	I_b	H (cm)	B_m/B	$D: B_s$	H/D	Q (l/s)	$\bar{U}$ (cm/s)	U_{max} (cm/s)	Re ($\times 10^3$)	Fr
C	1/10000	10.0	0.333	1:0	2.0	1.29	6.4	16.0	2.7	0.07
D	1/10000	10.0	0.667	1:0	2.0	2.45	9.8	16.0	5.0	0.10
E	1/10000	10.0	0.500	1:1	2.0	2.64	11.1	15.9	5.7	0.11
F	1/10000	10.0	0.333	1:2	2.0	3.00	13.2	16.7	6.6	0.13

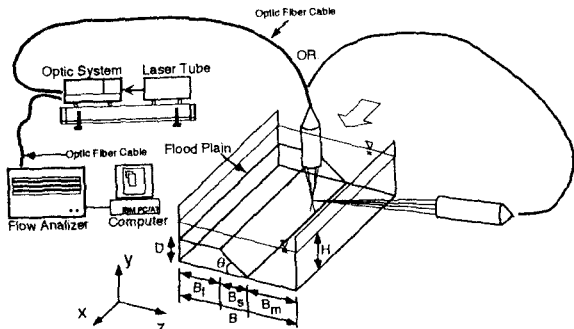


図-1 実験水路図

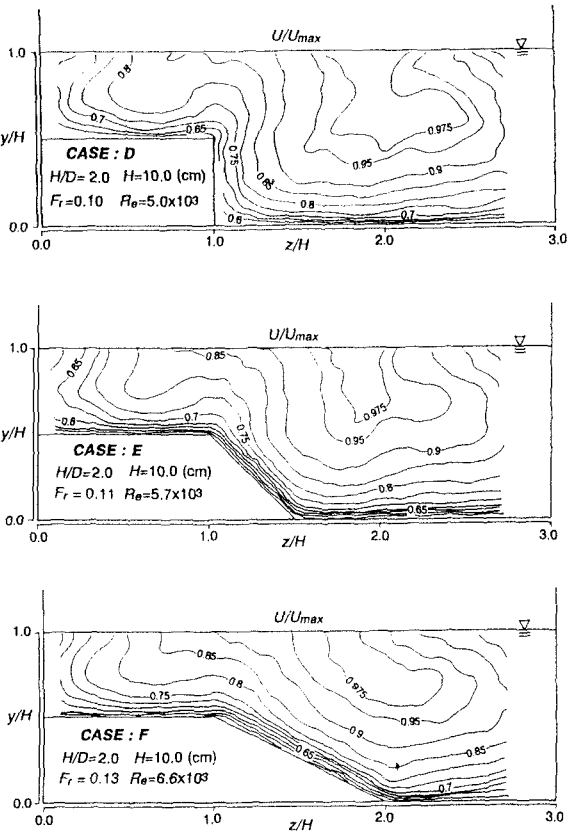


図-2 主流速 U のコンター

すように、複断面の形状を設定し、4 ケース行った。なお、全ケースとも最大主流速 U_{max} が $10 \sim 20 \text{ cm/s}$ 程度の緩やかな流れで計測された。

3. 実験結果およびその考察

3. 1 平均流速分布特性

図-2 は、平均流速 U を最大流速 U_{max} で無次元化したコンターをケースD ($\theta=90^\circ$, D:Bs = 1:0), ケースE ($\theta=45^\circ$, D:Bs = 1:1), ケースF ($\theta=26.7^\circ$, D:Bs = 1:2) の場合で比較したものである。接合部から低水路側の自由水面に向かって斜昇流と呼ばれている上昇流を裏付けるようにコンターラインの歪みが見られるがTominaga & Nezu (1991)²⁾ の論文でも同様な現象は顕著に見られる。

また、法面の傾斜が緩くなるにつれて、高水数先端から低水路側の自由水面に向かうコンターラインの突出が低流速平均速度領域の広がりとして、小さくなっていくのがわかる。また法面の傾斜にあわせてコンターラインが傾斜していく様子が顕著に観察される。さらに、アスペクト比の小さな狭水路で見られる特徴

として、最大流速の位置が降下するという「最大流速点の降下現象」も全てのケースで確認される。

図-3 は、二次流を最大流速 U_{max} で無次元化してベクトル表示したものである。一般に二次流の計測においては、二次流のオーダーは主流の数%と小さいので、高精度なレーザ流速計を用いての十分な計測精度が必要とされている。我々の計測では、この図に示されるように接合部における斜昇流およびコーナー流が顕著であり、その存在を確認することができた。この図より判断すると、法面と高水数底面に沿った壁面流が接合部で激しくぶつかりあうことで、法面と高水数底面のなす角度が斜昇流の自由水面に向かう角度を決定づけている要因の一つであろう。また法面勾配が変化することにより、流れの非等方性に影響し、その斜昇流が図-2 で示すコンターの接合部の突出した形状を示すものとなっていると説明できる。さらに、二次流は主流の流速勾配(シェア)を変化させ、このため、次に述べる底面せん断応力 τ_b を変化させる。Nezu & Nakagawa (1984)⁶⁾ や Knight ら (1985)⁷⁾ の研究によれば、二次流の上昇部で底面せん断応力 τ_b は減少し、下降流部で増加することが報告されている。

図-4 に水深で平均した主流速 $\bar{U}$, 垂直方向流速 $\bar{V}$ の横断分布を示す。法面の傾斜が緩くなるにつれて低水路・高水数間の流速勾配が徐々に小さくなっているのが見られ、低水路部と高水数部とで流速の差が小さくなるのがわかる。また、垂直方向流速 $\bar{V}$ であるが、いずれのケースも接合部付近に上昇流が非常に卓越

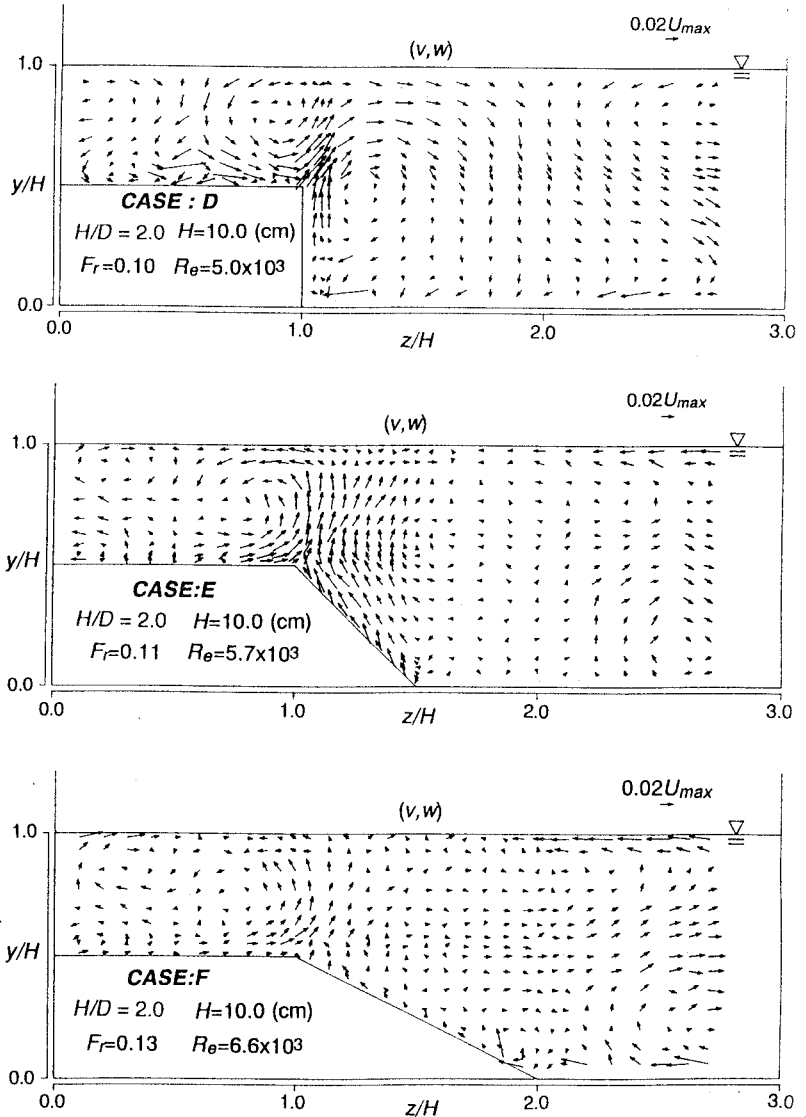


図-3 二次流ベクトル図

する部分が見られる。鉛直流自体としては、ケースEの時に最も大きくなっている。

3. 2 せん断応力特性

図-5 は、底面せん断応力 $\tau_b = \rho U_*^2$ (U_* は摩擦速度で、対数則により決定したものをを用いている) の横断分布であり、ケースによる低水路と高水数間の比較である。高水数部と低水路部との接合部付近における底面せん断応力の変化は、法面勾配が緩くなるにつれ小さくなっていく。さらに低水路中央部で分布はピークに達し、いずれも接合部の低水路側で急減している。また、先の述べたような二次流の上昇部で減少する特徴も確認できる。同様な傾向は Tominaga & Nezu (1991)²⁾ によっても指摘されている。この底面せん断応力分布は、抵抗則や土砂輸送による護岸洗掘などの河川工学上非常に重要な水理量であり、複断面水路における低水路と高水数間の物質輸送機構を知る上でも必要である。

3. 3 乱れ分布特性

図-6 は、各ケースの乱れエネルギー $k = (u'^2 + v'^2 + w'^2)/2$ を断面平均の摩擦速度 $\overline{U}_*$ の2乗で無次元化して示したものである。接合部付近に見られる高エネルギー領域の低水路自由水面領域への突出は、主流速 U のコンターで表されているものと非常に類似しており、法面の傾斜による特性も同様である。また、減速流によってその領域における乱れエネルギーが大きくなっていることもよくわかる。すなわち、接合部における乱れの非等方性が、低水路と高水数間の運動量輸送や物質輸送に対して与える影響がよく反映されているといえる。

3. 4 レイノルズ応力と渦動粘性係数の評価

図-7 は、横断方向のレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ を摩擦速度の2乗 $\overline{U}_*^2$ で無次元化したコンターを表している。 $-\overline{u'w'}$ は、低水路と高水数間の相互作用を解明する最も重要な特性値であり、FLDAでは初めて高精度に計測されたものである。ここで、渦動粘性モデルを適用すれば、

$$-\overline{u'w'} = \nu_t \frac{\partial U}{\partial z} \tag{1}$$

でレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ を表すことができる。ここで、 ν_t は横断方向の渦動粘性係数である。式(1)で示すようにレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ は主流速 U の横断勾配に比例し、 $-\overline{u'w'}$ の符号が、

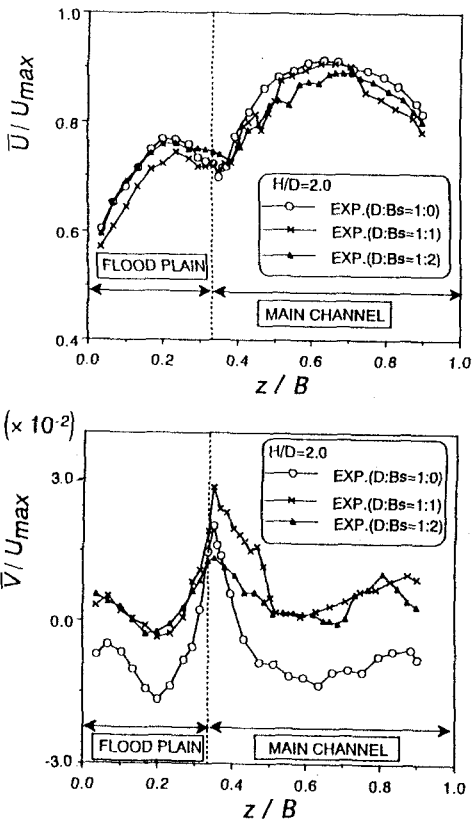


図-4 水深平均の $\overline{U}$ 、 $\overline{V}$ の横断分布

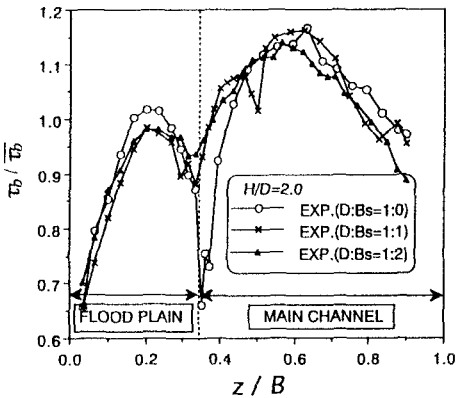


図-5 底面せん断応力分布

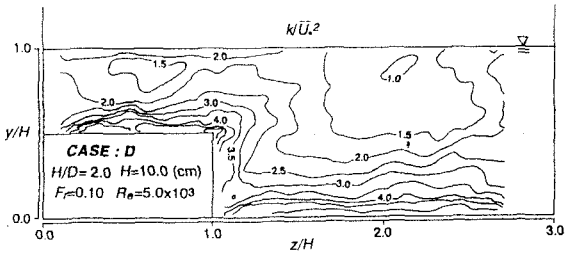


図-6 乱れエネルギーのコンター(CASE:D)

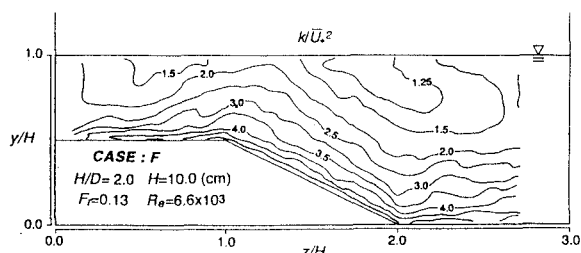
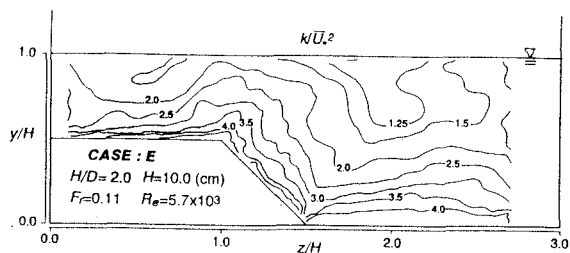
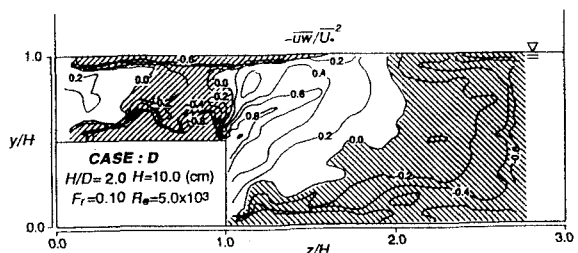


図-6 乱れエネルギーのコンター(CASE: E, F)



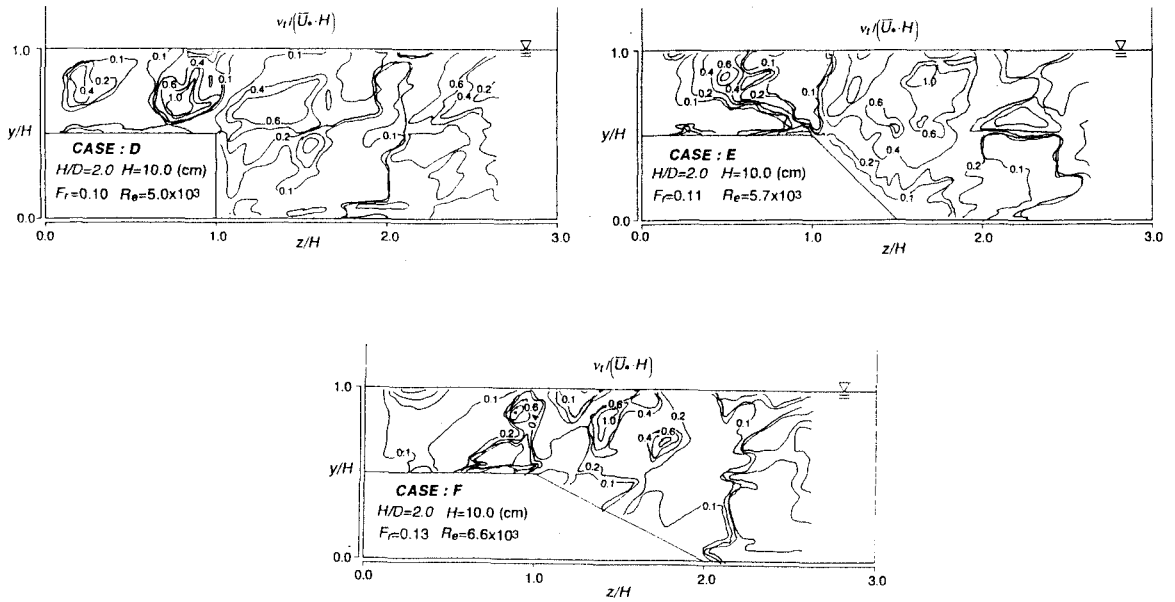


図-9 渦動粘性係数 v_t のコンター

従来より渦動粘性係数 v_t を高精度に表せたものはあまりなく、今後さらに高精度な計測、解析が望まれる所である。

4. おわりに

本研究は、複断面開水路流れを全横断面にわたって高精度に三次元乱流計測を行ったものであり、法面を有する複断面水路における平均流速分布、二次流分布、および複断面河道における法面の角度によるレイノルズ応力や渦動粘性係数への効果を検証することができた。現在までにこのような法面を有する複断面水路についての詳細なデータはほとんどなかったことから、今回の結果は貴重なものであろう。今後このデータをもとに、法面勾配を有する複断面開水路流れの組織構造の全貌を解明していきたい。最後に、本研究は、文部省科研費試験研究(研究代表者: 中川博次, No. 05555144)の助成で行われたことを記し、これに謝意を表す。

参考文献

- 1) Shiono, K. and Knight, D. M. (1991): J. Fluid. Mech, vol. 222, pp. 617-646.
- 2) Tominaga, A. & Nezu, I. (1991): J. Hydraulic Eng., ASCE, vol. 117, No. 1, pp. 21-41.
- 3) Naot, D., Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993): J. Hydralic Eng, vol. 119, pp. 390-408.
- 4) Rhodes, G. & Knight, W. (1994): J. Hydraulic Research, vol. 32, No. 5, pp. 743-763.
- 5) Nezu, I. and Rodi, W. (1986): J. Hydraulic Eng., ASCE, vol 112, No. 5, pp. 335-355.
- 6) Nezu, I. and Nakagawa, H. (1984): J. Hydraulic Eng., ASCE, vol. 110, No. 2, pp. 173-193.
- 7) Knight, D. W., Demetriou, J. D. and Hamed, M. E. (1985): J. Hydraulic Eng., ASCE, vol. 110, pp. 405-422.