

複断面開水路流れの乱流構造と二次流に関する実験および数値計算

Experimental and Numerical Study on Turbulent Structure and Secondary Currents in Compound Open-Channel Flows

欄津家久*・阿部崇**・中川博次***

By Iehisa NEZU, Takashi ABE and Hiroji NAKAGAWA

It is very important in Hydraulic Engineering as well as in River Environment Engineering to investigate turbulent structures in compound open-channel flows with flood plains. The present study is to conduct both the accurate turbulence measurements with two-component fiber-optic laser Doppler anemometer (LDA) and the numerical simulations using three-dimensional algebraic stress model (3-D ASM). Both of them were compared with each other. As the results, numerical calculations including secondary currents were in a good agreement with accurate LDA database of compound open-channel flows. Of particular significance is the anisotropy of turbulence and the interaction between main channel and flood plain.

KeyWords : Compound Open-channel Flows, Secondary Currents, Turbulence Measurements, Anisotropy of Turbulence, LDA

1. はじめに

複断面開水路流れにおける二次流を伴う三次元乱流構造に関する研究は、近年の河川環境創造とリンクするため研究が活発となっている。特に、低水路と高水敷間の速度差に伴う流体混合や各種の物質輸送および高水敷接合部付近から強い斜昇流が発生し、これが二次流の一部であり流れの三次元性を示すものとして注目されている。二次流の計測は従来のホットフィルム流速計では精度上困難で、近年のレーザ流速計(LDA)、特にファイバー型の後方散乱型LDAが開発されてこの種の実験的研究が可能となってきた。Tominaga and Nezu(1991)²⁾は、ファイバーレーザ流速計(LDA)を用いて、複断面開水路流れの精密な三次元乱流計測を行い、ホットフィルム流速計や一成分レーザ流速計では困難だった接合部付近に卓越する二次流の構造を計測した。Shiono & Knight(1991)³⁾は、大型水路で複断面流れをLDAで計測し、最近、Rhodes & Knight(1994)⁴⁾は、これを閉管路でシミュレートして低水路と高水敷間の相互作用を実験的に解明しようとしている。一方、複断面流れという複雑乱流の数値シミュレーションも最近活発になってきた。Naot, Nezu & Nakagawa(1993 a, b)^{5), 6)}(一般に3Nモデルとよばれる)は、単断面の三次元計算に成功したNaot-Rodiモデル⁷⁾を複断面に拡張

* 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

*** 正会員 工博 京都大学工学部教授 環境地球工学教室

して、Tominaga & Nezu (1991)²⁾ の LDA データとの同定を行い、良好な三次元代数応力モデル (3-D ASM) を提案した。ごく最近では、Pezzinga (1994)⁸⁾ は、非線形 $k-\epsilon$ モデルを用いて、また Thomas & Williams⁹⁾ (1995) は、LES を用いてやはり Tominaga & Nezu の値と同定を行い、複断面水路の三次元乱流計算を開発中である。

本研究は、最新鋭のファイバーレーザ流速計 (LDA) を駆使して、複断面開水路乱流構造をより広範囲の水理条件のもとで高精度に計測し、次に 3 N モデルを適用してこれらの LDA データと比較検討を行ったものであり、その適用度の妥当性がさらに確認された。

2. 実験装置と実験方法

本実験で使用した水路は、長さ 8m、幅 30cm、高さ 25cm のアクリル製可変勾配型循環式水路である (図-1)。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 (DANTEC 社製) を用いて、速度の 3 成分 (U, V, W) を精密に計測した。LDA は、レーザ光の ON, OFF, シフト光の位相制御、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、ドップラー信号が相関法によって処理され、従来のトラッカー法やカウンター法より高性能で、複断面水路のように前方散乱式が使用できない実験では不可欠である。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 区間に遷移部を設け、残り 7m の区間に、非対称複断面水路形状のアクリル製の BOX を設けた。(図-1) 水面上方からの計測の場合、自由水面の変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、自由水面の変動の十分に小さい流れ ($Fr=0.1$ 程度) で計測した。側壁からと水面上方からの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 60 秒で行った。測点はケースによっては断面内に 500 点ほど設けて、精密にトラバースした。しかし、水路底面や壁面付近では、極端にサンプリング率が低下し約 10Hz 程度までになることもあった。(本システムは、事前設定した高質のバースト信号のみをサンプリングする。) 2 組のビームは流下方向に対して 45 度にセットしたが、計測後に Nezu & Rodi (1986)¹⁰⁾ 方式の角度補正を行い連続式を満足させたが、その際の補正角は 0.5 度以内であった。実験条件表を表-1 に示す。複断面の形状と水深を変化させ 4 ケース行った。なお、全ケースとも最大主流速 U_{max} が 10~20 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 平均流特性

表-1 実験条件表

CASE	l/b	H (cm)	B_m/B	H/D	Q (l/s)	$\bar{U}$ (cm/s)	U_{max} (cm/s)	Re ($\times 10^3$)	Fr
A	1/3000	6.0	0.333	1.2	0.92	11.5	19.9	2.4	0.15
B	1/5000	7.5	0.333	1.5	1.06	8.5	17.9	2.4	0.10
C	1/10000	10.0	0.333	2.0	1.29	6.4	16.0	2.7	0.07
D	1/10000	10.0	0.667	2.0	2.45	9.8	16.0	5.0	0.10

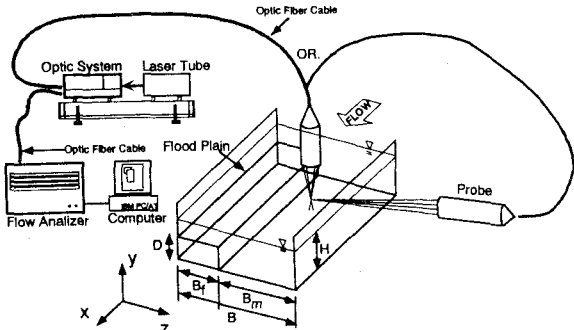


図-1 実験水路図

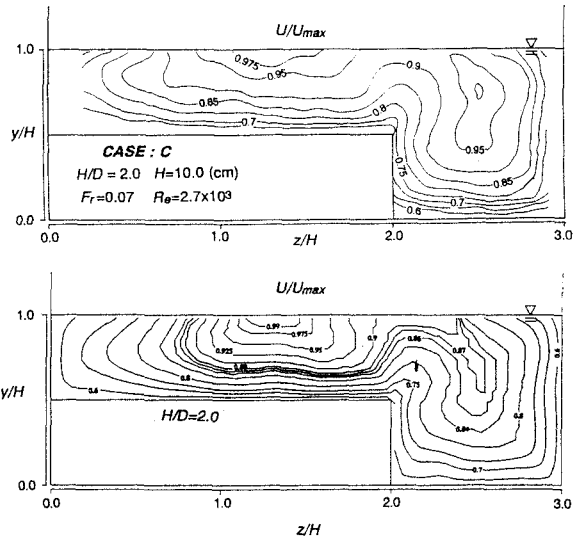


図-2 は、平均流速 $U(y,z)$ を最大流速 U_{max} で 図-2 主流速 U のコンター (上. EXP. 下. CAL.)

無次元化したコンターを、実験値 (LDA) と計算値 (3Nモデル) とで比較したものである。実験値と計算値は双方とも、CASE:C のものであるが、よく一致しているといえる。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ふくらみが見られる。高水敷の水深 h を系統的に変化させた増分を比較すると、実験値・計算値の両方とも、水深の浅い場合から深い場合になるにつれて、高水敷先端から低水路側に低速度領域の広がりが見えだしていき、最大流速の位置が水面より降下するという「最大流速点の降下現象」は、水深の浅い場合ほどその傾向が顕著で、アスペクト比 B/H の小さな流れにおける特徴をよく表している¹¹⁾。

図-3 (a), (b), (c) は、各ケースにおける二次流を U_{max} で無次元化してベクトル表示したもので単位矢印は $0.02U_{max}$ である。一般に二次流のオーダーは主流の数%と微流速なので、十分な計測精度が必要とされる。

この図から、接合部における斜昇流およびコーナー流が顕著に見られることがわかる。このような二次流の存在を確認できたことで、今回の実験における目的が十分に達せられたといえる。また、実験値と計算値との比較においても、ほぼ一致している。低水路側壁と高水敷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、その運動量の大小および水深が斜昇流の自由水面に向かう角度を決定づける要因の一つとして考えられる。また水深の浅い場合は、自由水面の存在が斜昇流を横断方向へと方向づけていることもわかる。二次流は主流の流速勾配 (シア) を変化させ、このため、次に述べる底面せん断応力 τ_b も変化する。Nezu & Nakagawa (1984)⁶⁾ や Knight ら (1985)¹²⁾ 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、下降部で増加すると報告されており、この特性は実験結果と数値計算でも見られている。

図-4 に水深平均した主流速 $\bar{U}$ 、垂直方向流速 $\bar{V}$ の横断分布を示す。これらの図より、実験結果と計算結

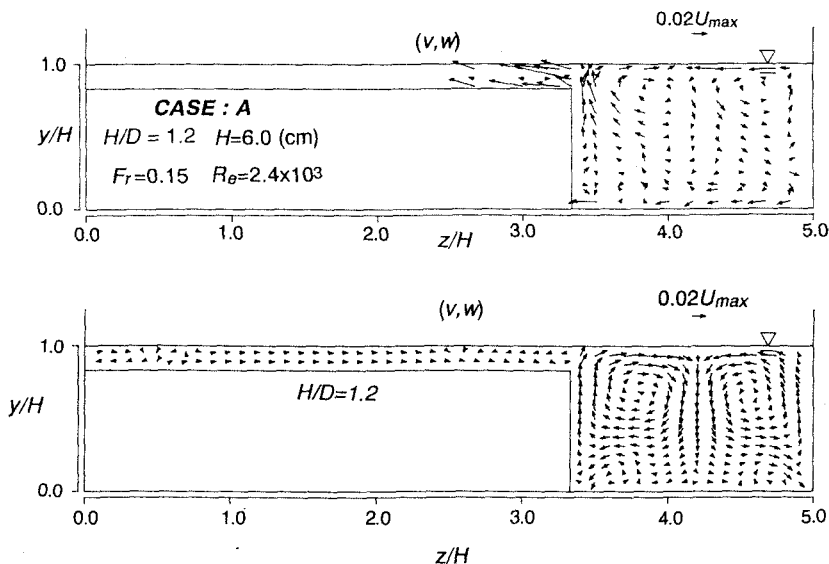


図-3 (a) 二次流ベクトル図 ($H/D = 1.2$: 上. EXP., 下. CAL.)

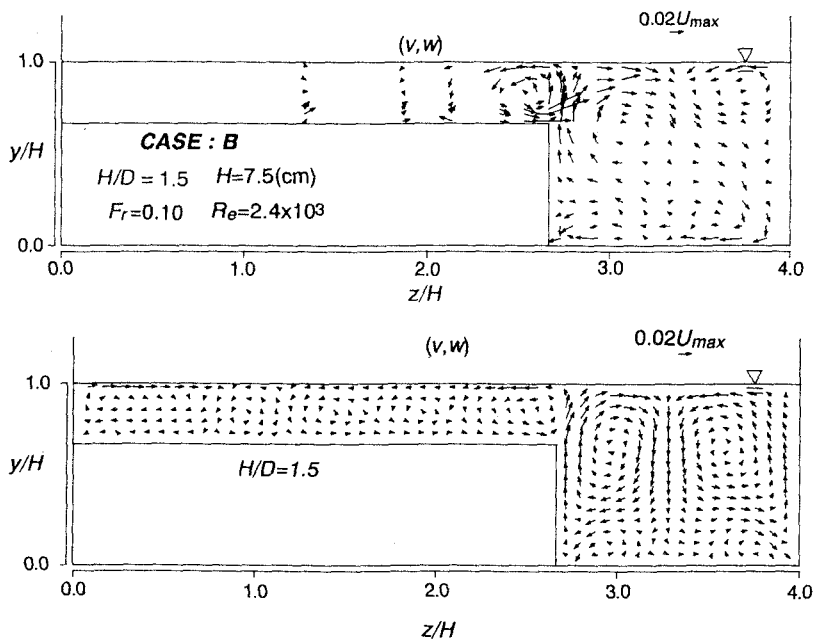


図-3 (b) 二次流ベクトル図 ($H/D = 1.5$: 上. EXP., 下. CAL.)

果との良好な一致が見られる。水深が浅くなるにつれて低水路・高水敷間の流速勾配が非常に大きくなるのが見られる。これより、接合部付近に大きな自由せん断層が形成されていることが確認できる。次に、垂直方向流速 $\bar{v}$ であるが、主流速の数%で実験でも計算でも精度は低いと考えられるが、両者は比較的良好一致を示している。計算値では、いずれのケースも接合部より少し低水路側に上昇流と下降流が非常に卓越する部分が見られる。実験値では、水深の深い $H/D=2.0$ のこの領域において流速の増減が激しいことから、他のケースに比べて接合部付近の

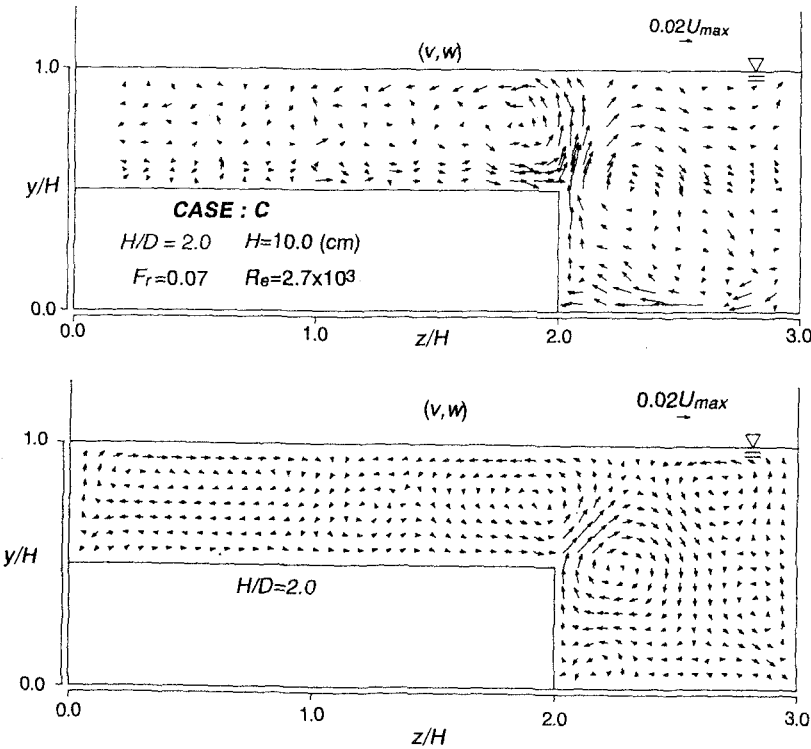


図-3(c) 二次流ベクトル図 ($H/D=2.0$: 上. EXP., 下. CAL.)

縦渦の上昇流・下降流が卓越しているのがわかる。

3. 2 レイノルズ応力の分布特性

図-5 は、主流速に関するレイノルズ応力 $-\bar{u}v$ と $-\bar{u}w$ を断面平均された摩擦速度 $\bar{U}_*$ の2乗で無次元化したコンターを表している。なお、摩擦速度 U_* は対数則に一致させることで決定した。レイノルズ応力は、壁面近くを除けば、主流速 U の勾配に比例する。レイノルズ応力 $-\bar{u}w$ の値が、接合部付近で負の値をとることは、複断面水路の主な特徴として表されている。その負の値をとる領域において、流速勾配 $\partial U / \partial z$ の値も負の値をとる。このことは、渦動粘性モデルを導入した代数応力モデル (ASM) の妥当性を立証している。

3. 3 せん断応力特性

図-6 は、底面せん断応力 $\tau_b = \rho U_*^2$ の横断分布で底面せん断応力の平均値 $\bar{\tau}_b$ で無次元化したものであるが、低水路の水深 H を高水敷高さ D で比をとり、

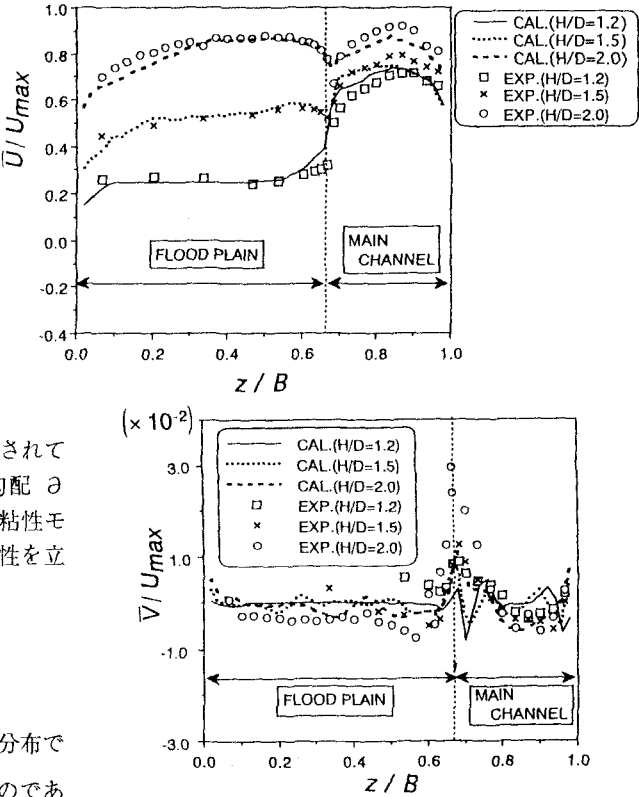


図-4 水深平均の $\bar{U}$, $\bar{v}$ の横断分布

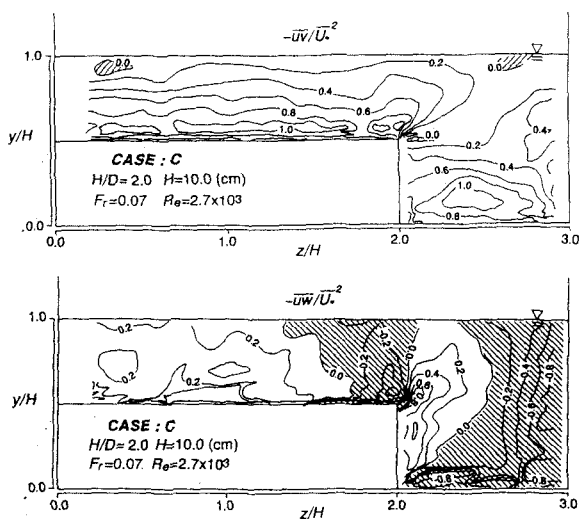


図-5 主流速に関するレイノルズ応力 $-\overline{uv}$, $-\overline{uw}$ の分布

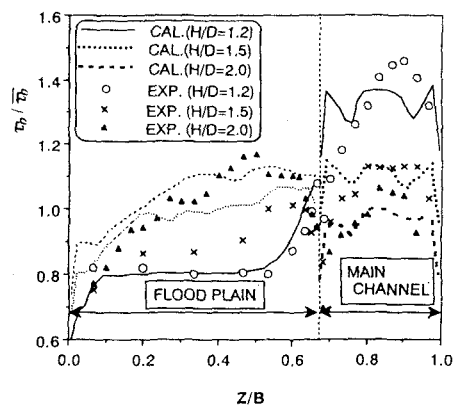


図-6 底面せん断応力分布

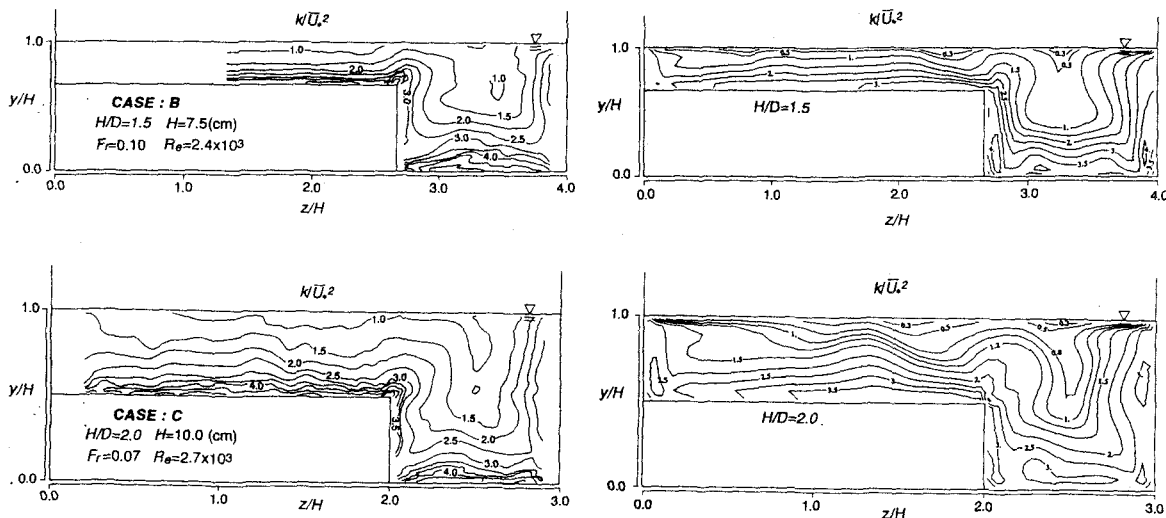


図-7 乱れエネルギーのコンター ($H/D=1.5, 2.0$: 左. EXP., 右. CAL.)

3 ケース全てを比較している。水深が大きい場合ほど、高水敷上のせん断抵抗と低水路との比が大きくなり、単断面水路の特性に近くなる。最も注目すべき点は、高水敷と低水路境界部でジャンプ的にせん断応力が急変することである。また、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。この底面せん断応力分布は、河川工学上非常に重要なパラメータであり、複断面水路における低水路と高水敷の間の物質輸送機構を知る上で必要である。

3. 4 乱れの非等方性と二次流の関係

図-7 は、乱れエネルギー $k = (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})/2$ を摩擦速度 $\overline{U_*}$ 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いる。接合部における乱れの非等方性が二次流の発生原因であり、これが低水路

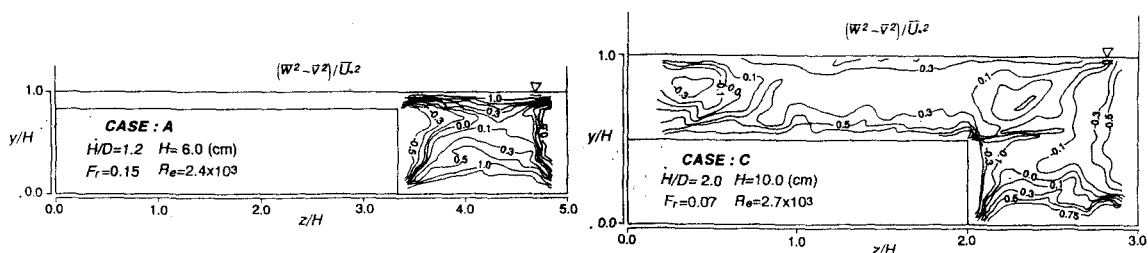


図-8 渦度発生項のコンター (EXP.: 左, $H/D = 1.2$, 右, $H/D = 2.0$)

と高水敷間の運動量輸送や物質輸送に対して大きな影響を与えることが以下の渦度方程式からわかる。ところで、直線水路の二次流(V, W)は、次の渦度方程式に支配される¹¹⁾。

$$V \frac{\partial \Omega}{\partial y} + W \frac{\partial \Omega}{\partial y} = \frac{\partial^2}{\partial y \partial x} (\overline{v'^2} - \overline{w'^2}) + \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \overline{v'w'} + v \nabla^2 \Omega \quad (1)$$

A 項

B 項

C 項

D 項

$$\Omega \equiv \frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z} \quad (2)$$

式(1)は主流速 U を含まないので、二次流(V, W)のみの運動を厳密に表現している式としてよく知られている。特にB項は、渦度発生項で、乱れの非等方性を表すとともに、乱れによる二次流構造を決定する。さらに、流下方向の渦度 Ω の支配的な項であり、二次流セルは $B < 0$ で時計回りに回転し、 $B > 0$ で反時計回りに回転することが示されている。¹³⁾ このように、乱れの非等方性項は非常に重要な乱れ特性値である。この乱れ特性値 $(\overline{w'^2} - \overline{v'^2})$ をコンターとして表したのが図-8である。コンターラインは横断方向に周期的な揺動パターンを示し、側壁から離れたところでも、ゼロにはならない。すなわち、複断面水路における二次流セルの存在が理論的に説明できるといえる。さらに、接合部付近において $(\overline{w'^2} - \overline{v'^2})$ の値は、負の値をとり、複雑な構造を示している。このことは、接合部付近に強い二次流構造が存在することが、乱れの非等方性項から予測できるのである。

4. おわりに

本研究は、複断面開水路流れの全断面にわたって、高精度のレーザ流速計を駆使して精密な三次元乱流計測を行い、また3D-ASMを使って数値計算を行った。その結果、両者は良好な一致が得られた。特に、精度よく二次流構造を解明できた点は意義が大きい。今後このデータベースをもとにさらに詳細な解析を進め、複断面開水路流れの三次元乱流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、これに感謝する。

参考文献

- 1) Nezu, I. (1994), 第9回国際水理学会アジアパシフィック国際会議, 基調講演論文, pp.1-24.
- 2) Tominaga, A. & Nezu, I. (1991), *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, vol.117, No. 1, pp.21-41.
- 3) Shiono, K. and Knight, D.M. (1991), *JFM*, vol.222, pp.617-646.
- 4) Rhodes, G., & Knight, W. (1994), *J. Hydraulic Research*, vol. 32, 1994, No. 5, pp. 743-763.
- 5) Naot, D., Nezu, I. & Nakagawa, H. (1993a), *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, vol.119, No.3, pp.390-408.
- 6) Naot, D., Nezu, I. & Nakagawa, H. (1993b), *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, vol.119, No.12, pp.1418-1426.
- 7) Naot, D. & Rodi, W. (1982), *J. Hydraulics Div.*, ASCE, vol.108, pp.948-968.
- 8) Pezzinga, G. (1994), *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, vol.120, No.10, pp.1176-1198.
- 9) Thomas, T.G. & Williams, J.J.R. (1995), *Applied Scientific Research*, (to be published)
- 10) Nezu, I. & Rodi, W. (1986), *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, vol.112, pp.335-355.
- 11) Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993), *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR-Monograph, Balkema.
- 12) Knight, D.W., Demetriou, J.D. and Hamed, M.E. (1985), *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, vol.111, pp.405-422.
- 13) Nezu, I. and Nakagawa, H. (1984), *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, vol.110, No.2, pp.173-193.