

最新鋭乱流計測法による複断面開水路流れの実験的研究

Characteristics of Compound Open-Channel Flows with FLDA and PTV

襴津家久*・阿部崇**・志村拓也***・中山忠暢****

By Iehisa NEZU, Takashi ABE, Takuya SHIMURA and Tadanobu NAKAYAMA

In compound open-channel flows, it is very important to clarify the interaction between main-channel and flood-plain induced by coherent vortices, so-called secondary currents and large-scale horizontal vortices. In this paper, secondary currents and three-dimensional turbulent structures were revealed experimentally by making use of two-component fiber-optic laser Doppler anemometer (FLDA). These experimental data were compared with the numerical simulations using three-dimensional algebraic stress model (3-D ASM) and coincided well with them. Next, space-time correlation structures were evaluated by making use of particle-tracking velocimetry (PTV) which can measure the simultaneous velocity components at all points of laser-light-sheet (LLS).

Keywords : compound open-channels, secondary currents, coherent vortex, FLDA, PTV

1. はじめに

複断面開水路は低水路と高水敷とで構成され、洪水時には高水敷に水が乗り上げるため水理特性が大きく変化する。このとき、高水敷と低水路の境界部で形成されるせん断層が原因となって2種類の組織構造が存在し、低水路と高水敷の相互干渉が疎通能力に与える影響が問題になっている。1つは鉛直軸を持つ大規模平面渦であり、もう1つは高水敷端部から間欠的に発生する斜昇流である。福岡・藤田(1989)¹⁾は両者の発生条件を水路幅・水深等で分類している。前者について玉井・河原(1981)²⁾は低水路と高水敷の運動量交換に注目してせん断応力を評価し抵抗則を導いており、池田ら(1995)³⁾は水平渦の発生を変曲点不安定性和非対称渦列の安定性により説明しており、さらに条件付き抽出アンサンブル平均法により水平渦の3次元平均像を捉えている。後者についてはTominaga and Nezu(1991)⁴⁾はファイバーレーザ流速計(FLDA)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っている。また乱流モデルを用いた数値計算法の発達によりNaot, Nezu & Nakagawa(1993a,b)^{5),6)}は単断面のモデルを複断面に拡張し三次元代数応力モデルを提案した。本研究では、この複雑な三次元構造を解析するために、まず第一に、ファイバーレーザ流速計(FLDA)を用いて横断面全体

* 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)

** 正会員 工修 (株)竹中土木

*** 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

を精密に計測し、時間平均的な特性を調べた。その際に実際の河川をより忠実に反映するために、法面を有する場合の計測も行った。これらの高精度なデータベースに基づいて、既存の乱流モデル(3Nモデル)による数値計算結果と比較検討を行った。第二に、組織構造の瞬間的な特性を調べるために、近年の画像解析手法の急激な進展の中で生まれた可視化法の一つであるPTV法(Particle - Tracking - Velocimetry)を用いて計測を行った。この計測を用いた解析の背景には、乱流の組織構造の本質要素は二次流を含む階層的な渦運動であるということが基本となっており、時空間相関解析や条件付きサンプリング手法により低水路と高水敷間に存在する水平渦に見られる組織構造の一端を調べた。以上の二種類の計測法により複断面開水路流れの特性を考察する。

2. 実験装置および実験方法

本実験で使用した水路は、長さ8m、幅30cm、高さ25cmの亚克力製可変勾配型循環式水路である。実験はFLDAとPTVにより別々に行われた。

図-1にFLDAによる実験装置を示す。水路側壁(光学ガラス製)方向と水路上方より4ビーム散乱型2成分ファイバーレーザ流速計(DANTEC社製)を用いて流速の3成分(U, V, W)を精密に計測した。水路長8mのうち上流部と下流部それぞれ50cmの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亚克力製BOXを右岸側に設けた。計測地点は流れが十分に発達している水路上流端から5mとした。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が悪くなる可能性があるため、今回は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。2組のビームは流下方向に対して45度にセットし、計測後にNezu & Rodi (1986)の方式の角度補正を行い連続式を満足させた結果、補正角は0.5度以内であった。実験条件表を表-1に示す。

図-2はPTVによる実験・画像解析装置である。実験は表-1のうち法面勾配が90度のケースCと26.7度のケースFの2通りで行った。直径約100(μm)、比重1.02のナイロン12粒子をトレーサ粒子として水中に一様に混入し、厚さ約2(mm)のレーザライトシート(LLS)を $x-z$ 平面に平行に照射して、20×20(cm)の範囲を上方からCCDカメラで撮影した。撮影空間はFLDAの場合と同じように水路上流端から5mの地点に設けた。撮影された画像は光ディスクに記録されフレームメモリーボードを介してコンピュータで処理された。この際4時刻の連続した画像からカルマンフィルター推定理論を用いた追跡アルゴリズムにより流速ベクトルを算出し、重み付け平均によって格子点でのベクトルに補間した。以上の方法により空間内の瞬時の多点速度情報を得た⁸⁾。

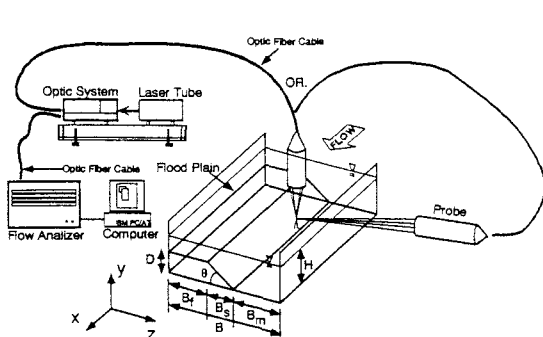


図-1 実験装置(FLDA)

表-1 実験条件表

CASE	$1/b$	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
A	1/3000	6.0	0.333	1:0	1.2	0.92	11.5	19.9	2.4	0.15
B	1/5000	7.5	0.333	1:0	1.5	1.06	8.5	17.9	2.4	0.10
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

水路形状パラメータ

H : 低水路水深
h : 高水敷水深
D : 高水敷高さ
B : 水路幅
Bm : 低水路幅
Bs : 法面幅
Bf : 高水敷幅
 θ : 法面勾配角

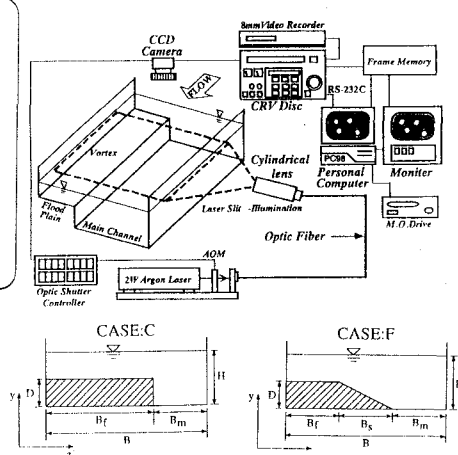


図-2 実験および画像解析装置(PTV)

3. FLDAによる計測結果

3. 1 水深変化が二次流構造に及ぼす影響

図-3は平均流速 U を最大流速 U_{max} で無次元表示したコンターであり、図-4は二次流を U_{max} で無次元してベクトル表示したものである。図-4より接合部から低水路側の自由水面に向かって斜昇流が見られ、図-3における接合部でのコンターのふくらみと対応している。図-3より水深が浅くなるにつれて最大流速点が水面下に降下していく傾向が見られ、アスペクト比の小さな流れの特徴⁹⁾を示している。図-4の斜昇流は高水敷高さが低水路水深の1/2であるケースCの時に最も大きく¹⁰⁾、またその両側には一対の縦渦が形成されている。水深が浅くなるにつれて低水路・高水敷間での主流速の横断方向流速勾配が大きくなる結果が得られ、せん断層が形成され水面渦が形成されやすい¹¹⁾。図-5は底面せん断応力 τ_b をその横断平均値 $\bar{\tau}_b$ で無次元化した横断分布であり、実験値と計算値とは比較的良く一致している。境界部付近での斜昇流の上昇によりせん断応力が急減しているのが見られ、同様な傾向はTominaga and Nezu(1991)⁴⁾によっても得られている。また、水深が深くなるにつれて高水敷の値の方が大きくなるが、これは側壁の効果によるものであり、低水路幅と全水路幅との比を変化させた数値計算でもそのような傾向が見られた。図-6は、二次流の発生を支配する垂直応力差、すなわち二次流に関する渦度方程式における渦度発生項 $(\overline{w'^2} - \overline{v'^2})$ のコンター¹¹⁾である。富永ら(1990)¹²⁾も同様の結果を得ているように、接合部から低水路側にかけて $(\overline{w'^2} - \overline{v'^2})$ の値が負に急変し、強い二次流構造による複雑な機構の存在が考えられる。

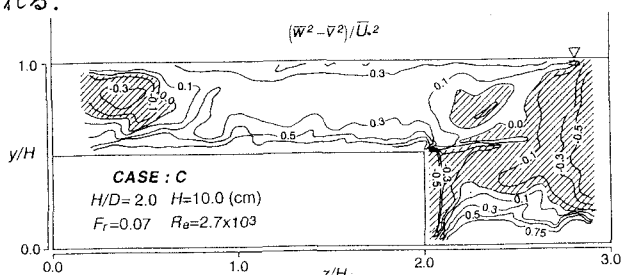


図-6 垂直応力差 $(\overline{w'^2} - \overline{v'^2})$ のコンター

3. 2 法面勾配が二次流構造に及ぼす影響

図-7は法面勾配を変化させた時の平均流速 U のコンターであり、法面の傾斜が緩くなるにつれて高水敷端部から低水路側にかけての低流速域の突出が小さくなり、流速が平滑化されていく傾向が見られる。図-8は二次流ベクトルであり、今本・石垣(1990)¹³⁾も述べているように、法面が付くことで二次流セルの構造に変化が見られる。表-2は斜昇流ベクトルの特性をまとめたものである。ケースEにおいて接合部における斜昇流が他のケースよりも大きくなっており、ケースFのように法面勾配が緩くなると斜昇流は小さくなり横断方向の

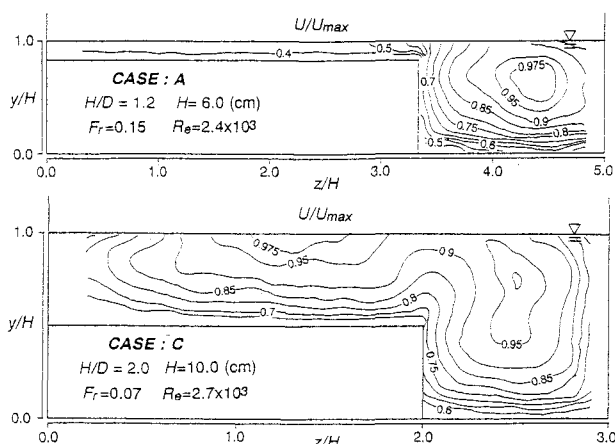


図-3 主流速 U のコンター

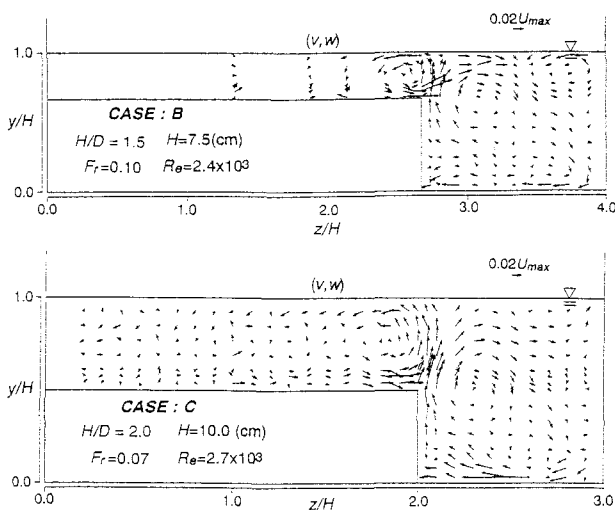


図-4 二次流ベクトル図

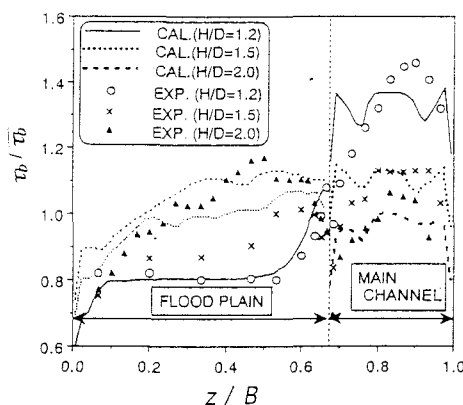


図-5 底面せん断応力分布

表-2 斜昇流の特性

CASE	D	E	F
形状			
鉛直成分 V	弱い	強い	弱い
横断成分 W	強い	弱い	弱い
二次流ベクトルの大きさ $\sqrt{V^2+W^2}$	強い	接合部で強い	弱い
角度 θ	約45°方向 $\longleftrightarrow$ ほぼ鉛直方向		

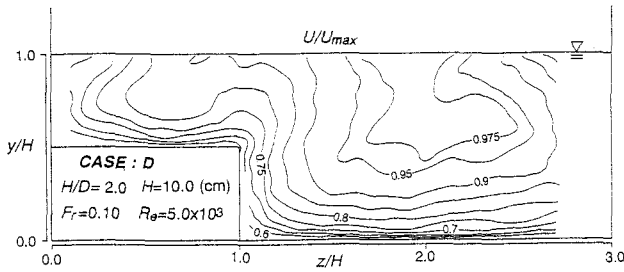


図-7 主流速Uのコンター

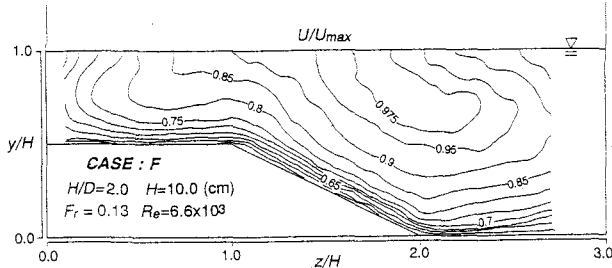


図-8 二次流ベクトル図

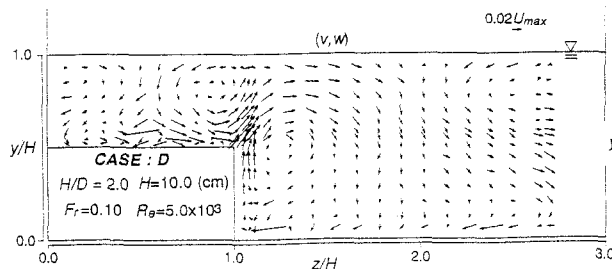


図-9 乱れエネルギーのコンター

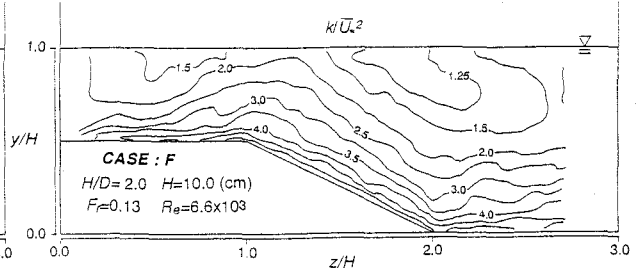


図-10 レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ のコンター

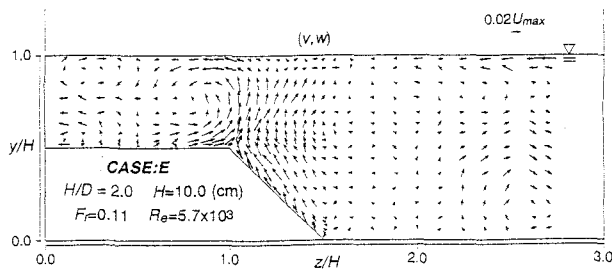
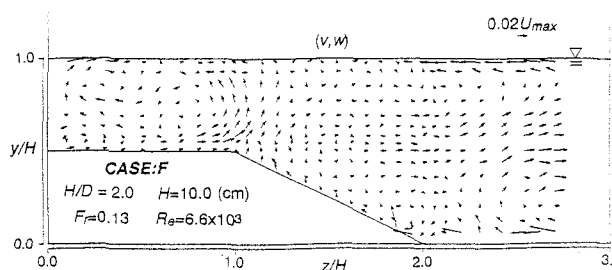


図-11 渦動粘性係数 ν_t のコンター



物質輸送は緩和される。図-9は乱れエネルギー $k = (u'^2 + v'^2 + w'^2)/2$ を断面平均摩擦速度 U_* の2乗で無次元化して表示したものである。高水敷端部から低水路側の自由水面にかけての高エネルギーの突出は乱れ強度 u' のコンターと類似しており、法面の勾配を緩やかにすることで接合部における斜昇流を伴う複雑な乱流構造が薄れていくと考えられる。また、この高エネルギーの突出域では図-7の平均主流速 U が小さくなっており、大きさは逆だが非常に似たコンターとなっている。図-10は横断方向のレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ を摩擦速度 U_*^2 で無次元化したコンターを表している。 $-\overline{uw}$ は低水路と高水敷間の相互作用を示す特性値である。図-10では接

合部でピークをとり、符号が接合部より低水路側の底面付近と高水敷上とで逆転している。このような特性は風洞を用いた複断面ダクトでも確認されている¹⁴⁾。図-11は渦動粘性モデルを用いてレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ と流速勾配 $\partial U/\partial z$ より求められた渦動粘性係数 ν_t のコンターである。これより法面勾配が緩やかになるにつれて ν_t の大きい領域が低水路側に移っていき、接合部での河床形状の不連続性による影響が緩和されていくと考えられる。

4. PTV法による計測結果

PTV法によって得られる流速変動には画像解析や補間の際に生じるノイズ成分が含まれているため、この高周波のノイズ成分をフーリエ級数分離を用いた数値フィルターによって取り除いた。

まずPTV法の精度や有効性を調べるために、同一水理条件の下でのFLDAによる結果との比較を行った。図-12はケースCに対する平均主流速 U の両者の計測誤差であり、それぞれほぼ同一点での最大流速で無次元化してある。これより境界部や画像解析範囲の端部で誤差が大きくなっているが、前者は高水敷先端部での流速勾配が著しく大きいこと、後者は解析区間の両端において追跡ベクトルが少なくなるために精度が落ちることが主な原因と考えられる。全体的に誤差は5%程度でありPTVによる計測は比較的良い精度を持つことがわかる。また標準偏差 σ の鉛直方向分布は高水敷高さ付近で最大になっているのがわかる。図-13は瞬間流速 $\tilde{u}, \tilde{w}$ の乱れ成分 u, w の時系列である。高水敷側のJunction近傍では u - w 平面内の4つの象限にほぼ等しく分布するのに対して、低水路側では第二象限と第四象限に偏る傾向が見られ、Junctionから低水路側にかけて正のレイノルズ応力の領域が広がっている図-10の結果と良く一致する。

流下方向に距離 Δx 離れた点の主流速の変動成分の同時空間相関係数 $C_{uu}(\Delta x, \tau=0)$ 、平均渦径 L_x は式(1)のように与えられる。

$$C_{uu}(\Delta x, \tau=0) = \frac{\overline{u(x_0, t) u(x_0 + \Delta x, t)}}{\overline{u'(x_0, t) u'(x_0 + \Delta x, t)}}, L_x = \int_0^\infty C_{uu}(\Delta x) d(\Delta x) \quad (1)$$

図-14は固定点 $\times$ に対する主流方向及び横断方向それぞれの乱れ成分の時空間相関係数 C_{uu} 、 C_{ww} の分布であり、高水敷高さ付近($y/H=0.58$)と水面付近($y/H=0.85$)に対するものであり、図-15は同一水深・同一流量での単断面に対するものである。点線は負の値を表す。一般に時間とともに高相関領域のピークが低くなるとともに主に主流方向に伸びていく傾向が見られ、水面ほど高相関領域が保持されやすかった。複断面に特徴的な傾向は単断面の場合との比較より次のようなことである。まず第一に、境界部付近で相関が急減することで C_{ww} に顕著に見られる。第二に、高水敷高さ付近では相関が低水路側へ移流される場合が多かったのに対して、水面付近では高水敷側へ移流される場合が多かったことである。このことについては、今本・石垣(1990)¹³⁾の研究にも見られるように流体の移動・混合現象と関わっており、図-4、図-8の平均二次流ベクトルに見られるように、斜昇流によって高水敷側に形成される二次流セルの影響であると考えられる。法面のあるケースFの場合でもこの傾向が見られたが、ケースCほど顕著には見られなかった。

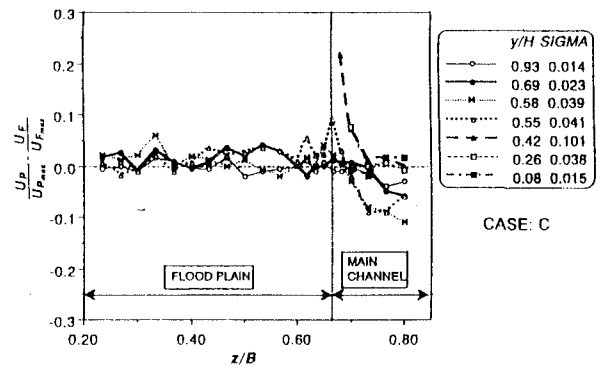


図-12 PTVとFLDAの誤差(平均主流速 U)

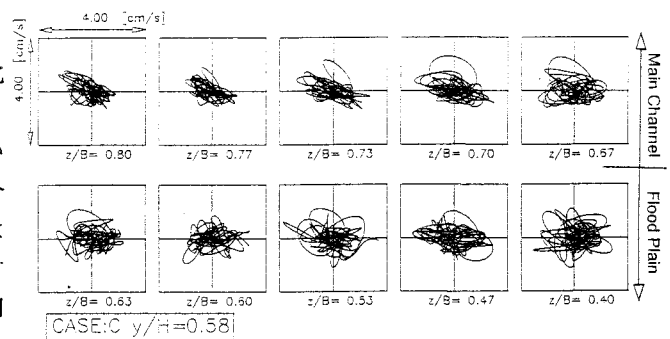


図-13 乱れ成分の変動軌跡

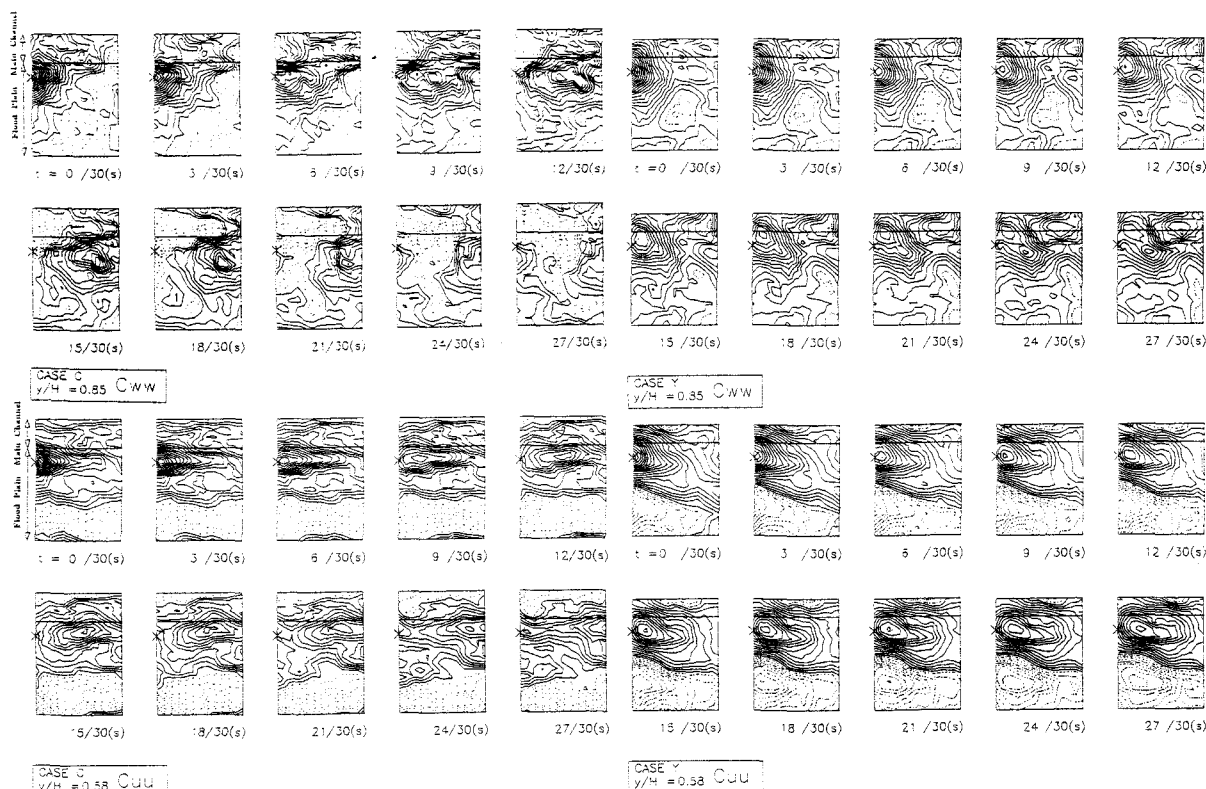


図-14 時空間相関係数(複断面開水路)

図-15 時空間相関係数(単断面開水路)

表-3はケースCに対する渦の移流速度 $\bar{U}_c, \bar{W}_c$ と平均流速 $\bar{U}, \bar{W}$ との関係を示しており、主流方向に対しては移流速度は平均流速の約9割となり従来の結果とほぼ一致するが、横断方向に対してはスケールが小さく補間が適当でなかったため値にばらつきが見られる。図-16は横断方向・流下方向の平均渦径の比(偏平率 $\Gamma = L_z/L_x$)の分布である。高水敷高さ付近($y/H=0.58$)においては、高水敷上の境界部から離れたところ(基点C)では時間とともに偏平率が単調減少するのに対して、低水路の境界部近傍(基点A)や高水敷上の境界部近傍(基点B)では偏平率がいったん減少するがある時刻を境に増加していき異なる特性が見られた。水面付近($y/H=0.85$)においては高水敷高さ付近($y/H=0.58$)ほど顕著ではないが、やはり同様の傾向が見られた。

表-3 移流速度と平均流速

y/H	fixed point	$\bar{U}_c/\bar{U}$	$\bar{W}_c/\bar{W}$
0.85	B	0.967	0.000
0.85	A	0.988	0.604
0.58	A	0.991	3.264

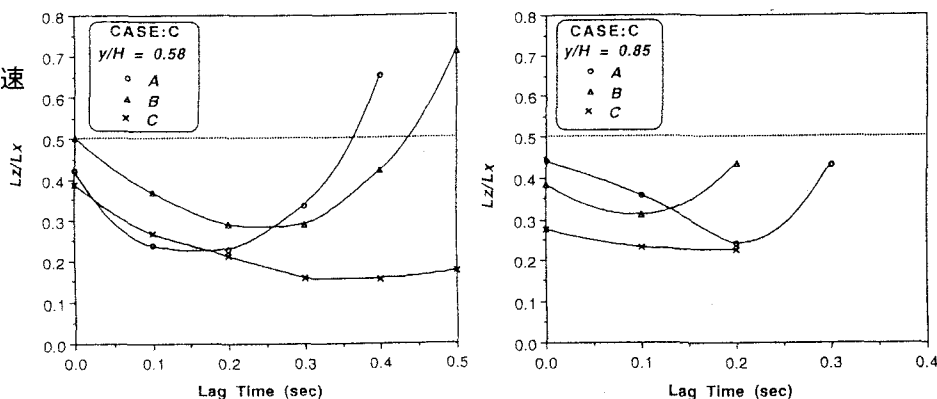


図-16 偏平率の時間変化

無条件時空間相関解析では時空間的に流速の時系列全てを平均化してしまい、間欠性の組織渦の構造・位相パターンや輸送現象は一律的に平滑化され打ち消されてしまう恐れがある。そこで条件付きサンプリング手法の1つである四象限区分法⁹⁾を用いた解析を行った。しきい値としては、レイノルズ応力への寄与の半値しきい値を用いた。図-17は、バースト現象を取り扱う際に用いられているように、変動成分による全レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の u - w 平面内における各象限への寄与率を乱れ強度 u', w' の積で無次元化して表したものである。これよりケースCの接合部近傍における低水路側の固定点($z/B=0.73$)においては第二象限($RS2: u<0, w>0$)の寄与の方が大きいのに対し、ケースFの高水敷側の固定点($z/B=0.40$)においては第四象限($RS4: u>0, w<0$)の寄与の方

が大きいことがわかる。これは低速流体(組織渦)が高水敷側から低水路側へ、それを補う高速流体(補完流)が低水路側から高水敷側へ移流していることを示しており、複断面開水路流れにおける低水路と高水敷の相互作用を表しているものと考えられる。またケースCでは第一・三象限の寄与が小さくなっているが、このことは表-2に見られるよ

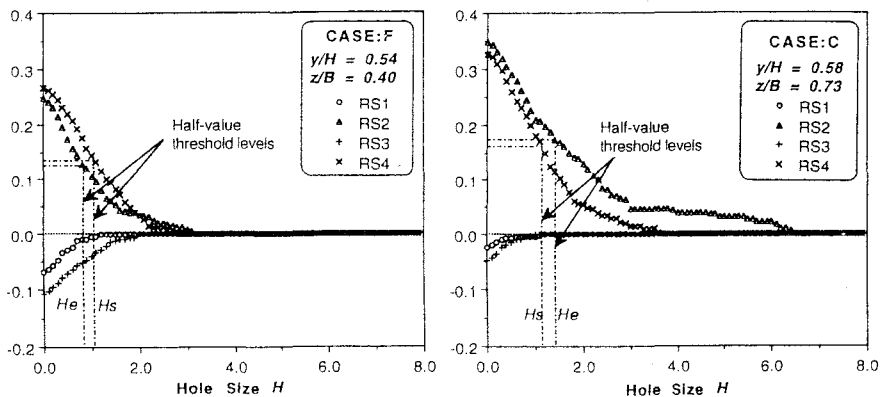


図-17 レイノルズ応力- $\overline{uw}$ の各象限への寄与率

うに法面が変化した場合での高水敷端部より発生する斜昇流の大きさ・角度との関連が大きく¹⁵⁾、ケースCに比べてケースFの方が低水路の流れが高水敷に及ぼす影響が大きいことがうかがえる。

上記のしきい値での条件付き時空間相関係数は判別関数を I 、遅れ時間を τ 、検出時間を T 、検出数を M として式(2)のように与えられる。

$$\langle u_i(x_0, z_0, t; \Delta x, \Delta z, \tau) \rangle = \frac{\int_T u_i(x_0 + \Delta x, z_0 + \Delta z, t + \tau) \cdot I(x_0, z_0, t) dt}{\int_T I(x_0, z_0, t) dt} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M u_i(x_0 + \Delta x, z_0 + \Delta z, t_k + \tau) \quad (2)$$

ここでは組織渦に関連していると思われるレイノルズ応力が正の領域、すなわち第二象限と第四象限のみを解析対象として、その際にしきい値の条件を満たせば判別関数 $I=1$ 、条件を満たさなければ $I=0$ となるようにした。図-18は $\langle \overline{u_i} \rangle = \langle u_i \rangle / u_i'$ のように各点での乱れ強度で規格化して表示したものである。これより、第二象限のみを抽出した場合($I_2=1$)には比較的低速で低水路側へ、第四象限のみを抽出した場合($I_4=1$)には比較的高速で高水敷側へ移動する傾向が全般的に見られる。これらは前者が低速流体(組織渦)に対応し、後者がそれを補う高速流体(補完流)に対応するものと考えられる。このように特定条件下での相関の移動方向・距離・大きさは高水敷と低水路との相互作用を知る上での手がかりになるものと思われる。

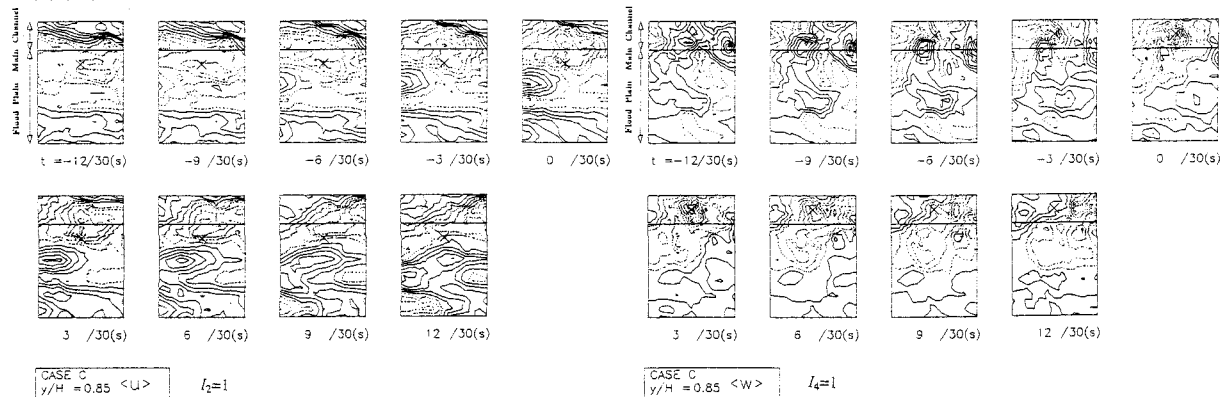


図-16 条件付き時空間相関係数

5. 結論

本研究は、二次流に代表される組織渦による複断面開水路流れの三次元乱流構造について、主に低水路と高水敷間での相互作用に焦点を絞って、FLDA及びPTVを用いて実験的に解明したものである。また、3D-ASMを用いた数値計算によってFLDAとの比較を行い、比較的良好な一致が得られた。得られた結果は次のようにまとめられる。

(1) FLDAを用いた解析では複断面開水路流れの時間平均的な乱流構造が解明された。特に水路幅・水深比(アスペクト比)と水路断面形状が二次流構造に及ぼす影響についての解明が行われた。両者の変化によって、

境界部から低水路側に向かって発生する斜昇流の大きさ・方向が変化し、高水敷と低水路の相互作用に与える役割は非常に大きいものと考えられる。

(2) PTVを用いた解析では時空間相関解析を用いて、主に組織渦構造の瞬間的な特性についての考察が行われた。また、条件付きサンプリング手法を用いて組織渦構造の特定のパターンのみを抽出する試みも行われ、高水敷側へ移動する高速流体と低水路側へ移動する低速流体が複断面開水路流れにおいて高水敷と低水路の相互作用に重要な影響を及ぼすことがうかがわれた。

謝辞

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) 福岡捷二・藤田光一: 複断面河道の抵抗予測と河道計画への応用, 土木学会論文集, 第411号/II-12, 1989.
- 2) 玉井信幸・河原能久: 第25回水理講演会論文集, pp.113-118, 1981.
- 3) 池田駿介・村山宜義・空閑健: 複断面開水路水平渦の安定性とその3次元構造, 土木学会論文集, 第509号/II-30, 1995.
- 4) Tominaga, A. & Nezu, I. (1991), J. Hydraulic Eng., ASCE, vol.117, NO. 1, pp.21-41.
- 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) Nezu, I. & Rodi, W. (1986) : J. Hydraulic Eng., ASCE, vol.112, pp.335-355.
- 8) Nezu, I et al., Proc. of Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements, ASCE, pp.406-415, 1994.
- 9) Nezu, I. and Nakagawa, H.(1993); Turbulence in Open-Channel Flows, IAHR-Monograph, Balkema.
- 10) 富永晃宏・江崎一博・森上秀樹: 複断面開水路接合部の乱流構造, 第33回水理講演会論文集, pp.523-528, 1989.
- 11) Nezu, I. and Nakagawa, H.(1984), J. Hydraulic Eng., ASCE, vol.110, No.2, pp.173-193.
- 12) 富永晃宏・江崎一博・小葉竹重機: 複断面開水路流れの三次元乱流構造, 土木学会論文集, 第417号/II-13, 1990.
- 13) 今本博健・石垣泰輔: 複断面開水路流れの水理特性について(4), 京都大学防災研究所年報, 第33号B-2, pp.559-569, 1990.
- 14) Rhodes, G. & Knight, W. (1994) : J. Hydraulic Research, vol. 32, No. 5, pp. 743-763.
- 15) 今本博健・石垣泰輔・木下聖司: 複断面開水路流れの水理特性について(2), 京都大学防災研究所年報, 第27号B-2, 1984.