

PTV法による複断面開水路流れの時空間相関解析

橋津家久¹・阿部崇²・志村拓也³・中山忠暢⁴

¹正会員 工博 京都大学助教授 環境地球工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工修 (株)竹中土木

³正会員 工修 (株)鴻池組

⁴学生会員 京都大学大学院 環境地球工学専攻

複断面開水路流れにおいて、流速の大きい低水路内の流体と流速の小さい高水敷上の流体との境界部にせん断層が形成され、斜昇流に代表される組織構造が間欠的に発生する。本研究はこの組織構造の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PTV法を用いて2次元内の多点同時ベクトルを求め、それを基に時空間相関解析や条件付きサンプリング手法によって複断面開水路内の時空間的な現象の解明を行ったものである。その際に、PTV法の精度を検証するために、同一水理条件の下での高精度なファイバーレーザ流速計(FLDA)による計測との比較を行った。

Key Words : compound open-channel flow, secondary current, coherent vortex, space-time correlation, PTV

1. 緒論

複断面開水路は、低水路と高水敷の境界によって水理量が不連続的に変化する。低水路と高水敷との流速差はせん断層を形成し、運動量・物質の輸送原因・大規模平面渦の発生原因となる。この大規模渦は、高水敷先端より低水路側水面に向かって発生する間欠性と三次元性を有する斜昇流を生み、発生・発達・消滅を繰り返す組織渦によって低運動量の流体塊が低水路側の水面付近に輸送される。

また、芦田ら(1988)¹⁾は、この組織渦によって浮遊砂が高水敷に運び上げられ、掃流力が低下して多くが堆積するといった高水敷管理上好ましくない現象を取り扱っている。

複断面開水路に形成される組織構造は、鉛直軸を有する大規模平面渦と高水敷端部から間欠的に発生する斜昇流の2種類に大まかに分類でき、福岡・藤田(1989)²⁾は両者の発生条件として水路幅・水深等を基準として選んでいる。今本ら(1992)³⁾は両者の混合機構を、カメリオン効果を利用した瞬間速度の平面分布で確認し、かつ統計的特性を検討して、境界部の混合域の特性を論じている。平面渦については、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いる玉井・河原(1981)⁴⁾の研究や、水平渦の発生を変曲点不安定性と非対称渦列の安定性により説明し、さらに2台の点計測を同時に用いた条件付きアンサンブル平均法を用いて水平渦の3次元平均像を捉えた池田ら(1995)⁵⁾の研究がある。斜昇流については、Tominaga and Nezu(1991)⁶⁾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3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ら(1993a,b)^{7),8)}は境界部の乱れの非等方性をうまくモデル化することによって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。

以上の論文においては、ホットフィルム流速計やレーザ流速計による点計測法が一般的であり、特に後者の流速計は高精度に流速成分を計測することができる。しかし、組織構造の瞬間的な特性を検証するには、瞬間的な広域流れ場の情報が得られる可視化手法も重要な要素となる。可視化手法としては、従来より、水素気泡法・染料注入法・微細粒子法等が用いられており、諸現象の物理的理を容易にするという特徴を持っている。それらを写真撮影

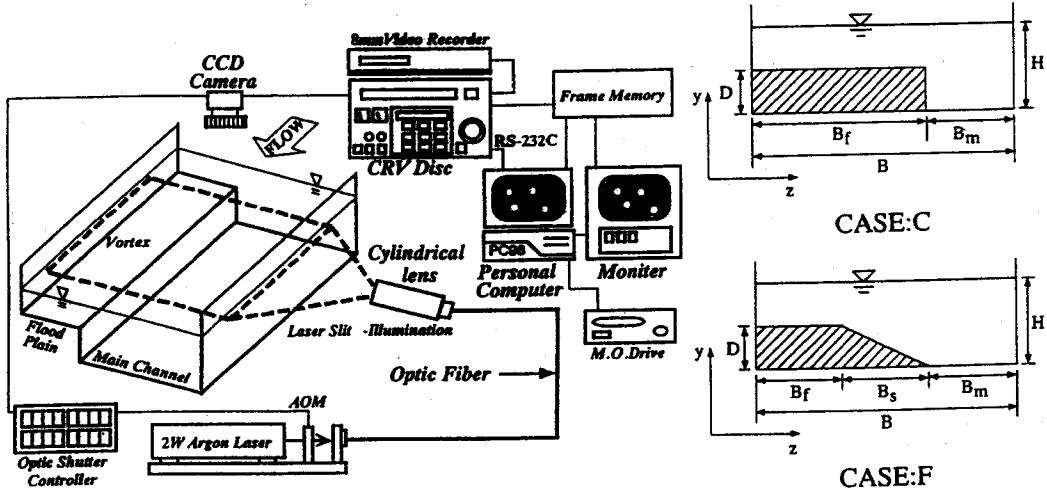


図-1 可視化および画像解析装置

表-1 水理条件

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
F	1/10000	10.0	0.333	1:2	2.0	3.00	13.2	16.7	6.6	0.13

やビデオ撮影とともに用いることによって再生・保存が容易になり、定量的評価への開発も行われている。Utami and Ueno(1987)⁹は連続断層面撮影法を用いて大規模乱流構造の可視化を行い、その結果を時空間相関解析に適用した。木下ら(1991)¹⁰は、洪水時の実河川に対して航空写真を用いて画像解析を行い、大規模渦の存在を定量的に示している。

近年、シート状のレーザ光線(LLS)とCCDカメラを用いて流れに追随する微細粒子を可視化し、広領域の流速場を瞬時に画像解析する技術が開発されてきた。本研究で用いるPTV(Particle-Tracking-Velocimetry)法^{11),12)}がそれに該当し、空間内の瞬時の多点速度情報を得ることができる。このPTV法を用いることによって、従来計測が困難であった複断面開水路流れにおける低水路と高水敷間の時空間的な相互作用を計測できるようになり、組織渦のメカニズムを検討する第一歩とすることが本研究の目的である。

2. 実験方法および解析方法

(1) 実験条件および可視化手法

本実験で使用した水路は、全長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に示すように、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アクリル製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。表-1に示すように、実験は等流状態が実現された、法面勾配が90度のCASE:Cと26.7度のCASE:Fの2通りについて行われた。

可視化手法において重要な点は明瞭な画像を撮影することであり、画像の鮮明度は以降の画像解析の精度と労力を大きく左右するため、トレーサ粒子の選定は可視化を行うにあたって重要である。まず第一に、トレーサは十分微細で中立浮遊であり、周囲の流体に完全に追随してトレーサ粒子速度でその点の流体の流速を代表できることが必要である。第二に、画像内のトレーサ粒子濃度が適切である必要がある。第三に、撮影画像からトレーサ粒子だけを分離・認識できる必要があり、トレーサの輝度が画像背景の輝度よりも大きい必要がある。

以上のことを考慮して本研究では、トレーサ粒子として直径 $100\mu\text{m}$ 、比重1.02のナイロン12粒子を用い、水中に拡散しやすいようにエタノールに浸して循環式水路に一様に混入した。このような微細なトレーサ粒子を鮮明に撮影するためには高強度のレーザ光線が不可欠である。図-1に示すように2Wのアルゴンイオンレーザを光ファイバーケーブルに通して、シリンドリカルレンズによって厚さ2mmのレーザライトシート(LLS)として水路側面に水平に照射した。従って、レーザ流速計も含めた従来の計測機器

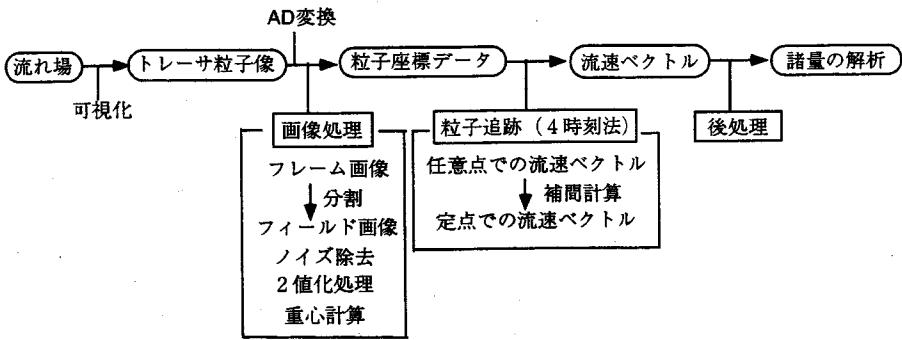


図-2 フローチャート

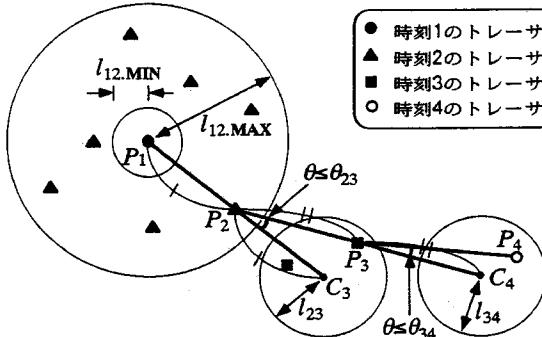


図-3 粒子追跡アルゴリズム

では計測できない、高水敷水深の浅い複断面開水路流れのような、浅水流の計測には本研究で用いるPTV法は非常に有効である。撮影は水路上方に設置されたCCDカメラを通して行われ、光ディスクに画像を記録した。その際に、 479×479 ピクセルの画像解析区間が 20×20 cmに対応するようにし、ピクセルと実長との関係が倍率で一意的に定まるようにした。

(2) 画像解析法

図-2は画像解析のフローチャートである。光ディスクの画像1コマは 479×479 ピクセルの格子目盛からなり、 $1/30$ secの間の画像情報が記録されていて、フレーム画像と呼ばれる。本研究では、2時刻のトレーサ粒子が混在するこの再生画像を $1/60$ secの画像情報を持つ2枚のフィールド画像に分離して、線形補間を用いて瞬時のトレーサの位置を検出した。

以上で決定された粒子座標を用いて流速ベクトルが決定される。その際に、真にトレーサと思われるもののみを抽出するために、ノイズ除去・2値化・画像改善などが行われた。図-3は粒子追跡のアルゴリズムであり、流速ベクトルを決定するために、連続した4コマのフィールド画像のトレーサを追跡する。その際に、以下のように6つのパラメータが設定される。まず最初に1時刻目のフィールド画像において任

意の粒子 P_1 が選ばれる。次に2時刻目のフィールド画像において、1時刻目の P_1 からの距離が $l_{12,\text{MIN}}$ と $l_{12,\text{MAX}}$ の間にあるような特定の粒子 P_2 が選ばれる。この P_2 は P_1 と同一の粒子の可能性のある粒子である。次に3時刻目のフィールド画像において、線分 P_1P_2 の延長線上で1時刻目の P_1 から2時刻目の P_2 までに移流された距離と等しい距離の点が予想位置 C_3 と考えられる。これより、この C_3 を中心とした半径 l_{23} の円内にあり、線分 P_2C_3 とのなす角が θ_{23} 以内の粒子 P_3 が採用される。次に4時刻目のフィールド画像において、同様に、線分 P_2P_3 の延長線上で同じように移流された予想位置 C_4 を考える。これより、この C_4 を中心とした半径 l_{34} の円内にあり、線分 P_3C_4 とのなす角が θ_{34} 以内の粒子 P_4 が採用される。以上より、時刻1-2-3-4と進むにつれて、最初の時刻における粒子と同一の可能性の粒子が制限されていく、4時刻を通しての最適粒子が選択される¹¹⁾。6つのパラメータは前もって誤追跡が最小になるように試行錯誤的に決定しておく。粒子追跡にはカルマンフィルター推定理論がアルゴリズムとして使われておらず、最適粒子をトレースできる工夫がなされている。以上による本解析での誤追跡の発生確率は $1/10^4$ 程度であり、誤追跡が最小限しか発生しないようにパラメータの設定を最大限厳しくした。これより、流速ベクトルは、個々の粒子の4時刻間における $3/60$ secの間の始点と終点の座標から計算される。本研究においてはLLSの厚さは2mm程度であるが、Tominaga and Nezu(1991)¹⁰⁾が実験計測によって求めているように、低水路水深が高水敷高さの2倍の時、2次流のオーダーは最大主流速の5%程度であることを考慮すると、本研究のように最大主流速が高々 20 cm/sの場合には $3/60$ secの間に粒子がLLS面内にとどまるものと考えられる。以上によって求めた流速ベクトルは任意点におけるものであり、以降の解析のために格子点での流速ベクトルに補間を行った。補間方法として、補間する格子点との距離の逆関数となる重み付け平均を用いた。

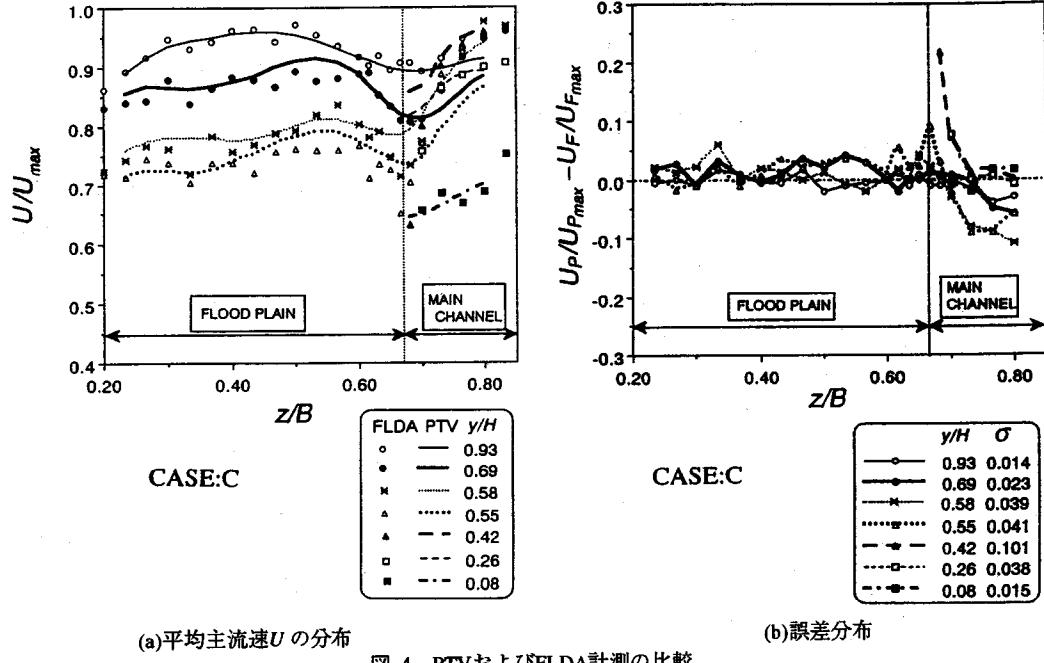


図-4 PTVおよびFLDA計測の比較

3. 実験結果とその考察

(1) PTV法の精度の検証

PTV法は同一平面内の多点での流速変動が得られるという長所を持つ反面、厳密に言うとトレーサ粒子の流れへの追随性・画像解析や補間による誤差を持つ。その結果、生データにはこれらの原因によるノイズ成分が含まれているため、まず、この高周波のノイズ成分をフーリエ級数を用いた数値フィルターによって取り除いた。フーリエ項の次数は可視化による組織渦の周期等を考慮に入れて161次とした。

予備実験として、前章で述べたアルゴリズムを用いたPTV法で、空間の任意点での流速変動を求め、そのスペクトル分布型を計算した¹²⁾。その結果、最も普遍的な特性であるKolmogoroffの-5/3乗則が良好に成立することが判明した。換言すれば、本PTV法は複断面流れのような複雑な幾何形状を持つ流れに対して、点計測においても乱流計測がかなりの精度で行えることがわかった。

本研究では組織渦構造を研究するにあたってまずPTV計測の精度や有効性を調べる必要があるため、同一水理条件の下でのファイバーレーザ流速計(FLDA)による計測結果との比較を行った。図-4(a)はCASE:Cに対する、FLDAおよびPTV計測による平均主流速Uについての横断分布の比較であり、図-4(b)はFLDA計測結果(U_F)を真値とみなしたときのPTV法

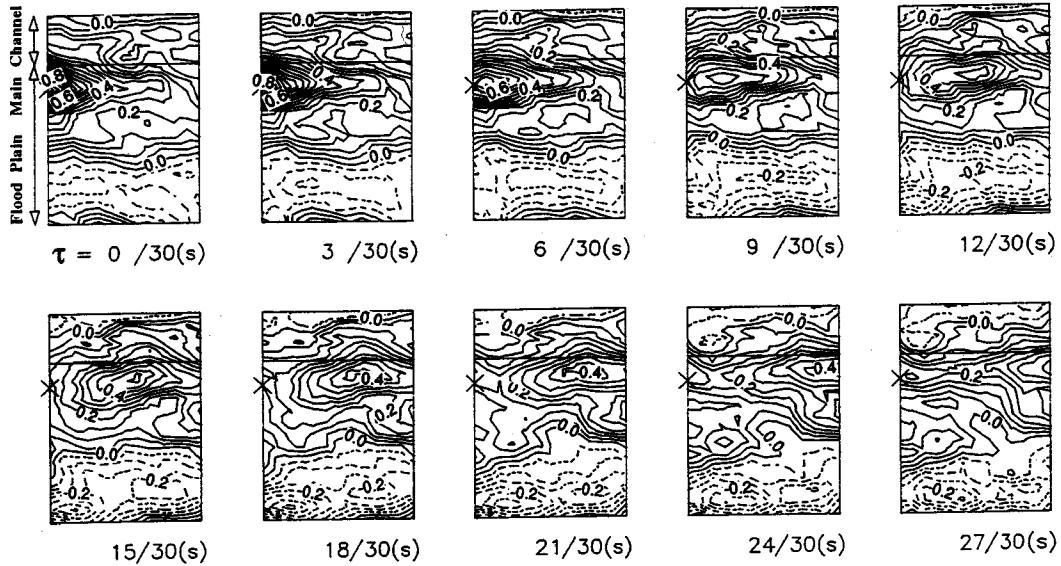
の計測(U_p)誤差である。その際に、それぞれほぼ同一点での最大流速で無次元化してある。また、両者の計測値(X_{PTV} , X_{FLDA})に関する標準偏差 σ は次式で表される。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left(\frac{X_{PTV_i}}{X_{PTV_{max}}} - \frac{X_{FLDA_i}}{X_{FLDA_{max}}} \right)^2} \quad (1)$$

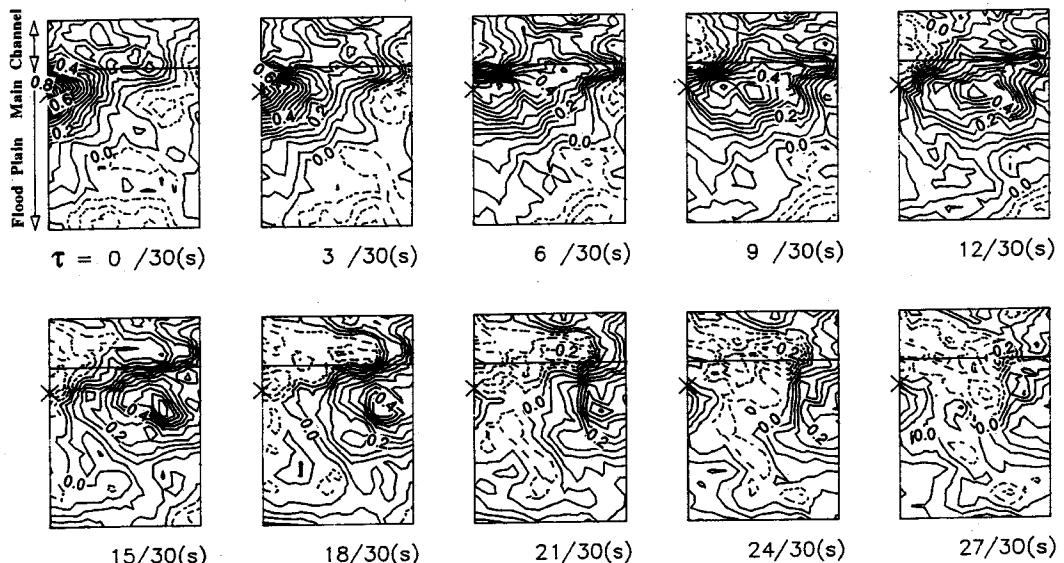
ただし、Mは測点数である。これより境界部や画像解析範囲の端部で誤差が大きくなる特性がわかる。境界部では、高水敷先端部での流速勾配が著しく大きく乱れも大きいために粒子追随性が悪くなり、また、複断面流れに特徴的な流れの3次元性が顕現した結果と考えられる。画像解析範囲の端部では解析区間の両端において追跡ベクトルが少くなり、補間精度が落ちるためである。しかし、全体的に誤差は5%程度でありPTVによる計測は比較的良い精度を持つことがわかる¹⁰⁾。また平均主流速の標準偏差 σ の鉛直方向分布は高水敷高さ付近で最大になっており、垂直面内の2次流の影響が現れていると考えられる。

(2) 無条件時空間相関解析

PTV法では平面内の多点同時計測が可能であり、従来のようにTaylorの凍結乱流の仮説を用いて時間相関から空間相関を求める必要がない点が最大の利点である。このように、PTV法を用いることによつて平面内ではあるが時空間相関特性を求めることが



(a) C_{uu} (CASE:C, $y/H = 0.58$)



(b) C_{ww} (CASE:C, $y/H = 0.85$)

図-5 時空間相関係数

可能であり、複断面開水路流れにおいて高水敷と低水路間の相互作用で発生する大規模な組織渦を解析できる点が特長である。

固定点 P と任意点 Q における流速変動成分 u_i, u_j に関する時空間相関係数 C_{uu} は、遅れ距離を $\Delta x, \Delta z$ 、遅れ時間を τ 、乱れ強度を u'_i, u'_j として次式で定義される。

$$C_{u_i u_j}(x_0, z_0, t; \Delta x, \Delta z, \tau) = \frac{u_i(x_0, z_0, t) u_j(x_0 + \Delta x, z_0 + \Delta z, t + \tau)}{u'_i(x_0, z_0) u'_j(x_0 + \Delta x, z_0 + \Delta z)} \quad (2)$$

図-5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($y/H = 0.85$)に対するものである。点線は負の値を表す。

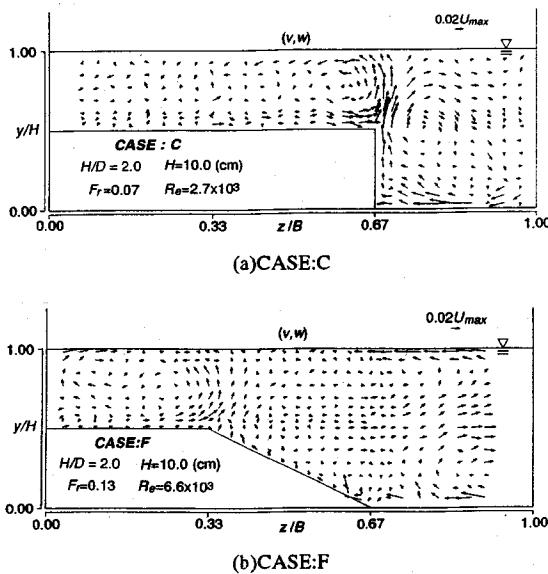


図-6 二次流ベクトル図 (FLDA)

表-2 移流速度と平均流速

fixed point		\bar{U}_c / \bar{U}	\bar{W}_c / \bar{W}
y/H	z/B		
0.85	0.60	0.967	0.000
0.85	0.73	0.988	0.604
0.58	0.73	0.991	3.264

解析範囲は、流下方向に12cm、横断方向に17cmである。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特性が見られ、水面に近い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として、単断面の場合との比較より次のようなことがわかった。まず第一に、図-5の(b)の C_{ww} に顕著に見られるように、固定点から境界部に向かって相関の減少する勾配が非常に大きいことである。このことと関連するが、高水敷側の境界部から離れたところに固定点がある場合には相関領域があまり変化せずに移流していくのにに対して、低水路側の境界部付近に固定点がある場合には低相関領域が拡大して移流していく傾向が見られた。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いる。図-6は同一水理条件の下でFLDAによって計測された二

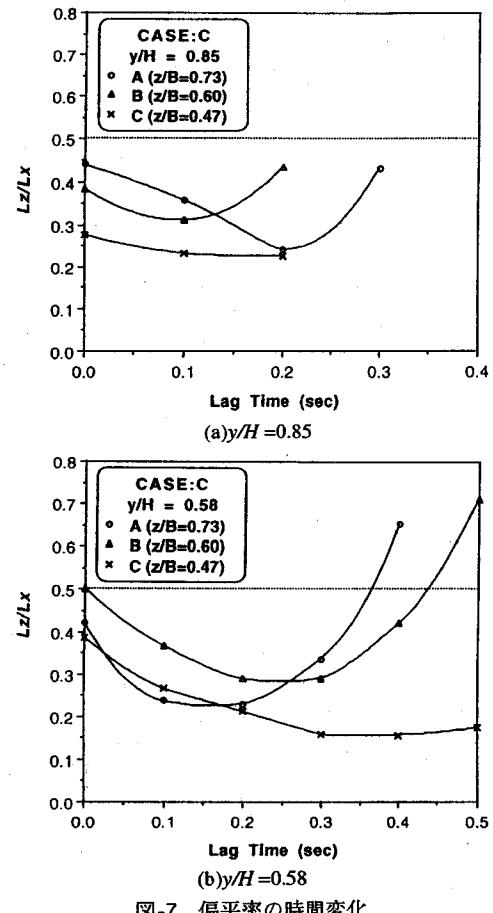


図-7 偏平率の時間変化

次流ベクトルである。図-5と図-6の比較より、上記の特性は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 CASE:F の場合でもこの特性が見られたが、CASE:C ほど顕著には見られなかった。

表-2はCASE:Cに対する渦の移流速度 \bar{U}_c, \bar{W}_c と断面平均流速 \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。

流下方向・横断方向の平均渦径はそれぞれ次式で与えられる。

$$L_x = \int_0^\infty C_{uu}(\Delta x, \Delta z = 0, \tau) d(\Delta x) \quad (3)$$

$$L_z = \int_0^\infty C_{uu}(\Delta x = 0, \Delta z, \tau) d(\Delta z) \quad (4)$$

図-7は遅れ時間に対する横断方向・流下方向の平均渦径の代表値の比(偏平率 $\Gamma = L_z/L_x$)の分布である。

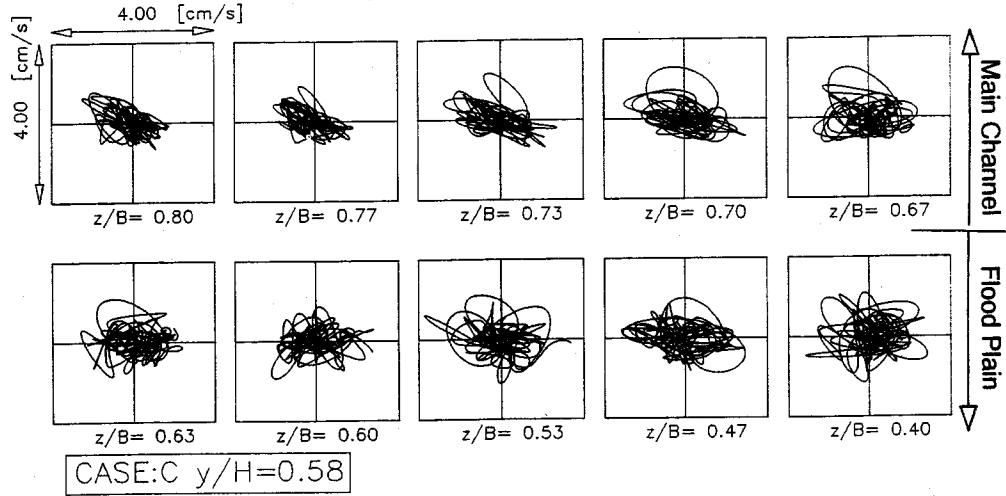


図-8 乱れ成分の変動軌跡

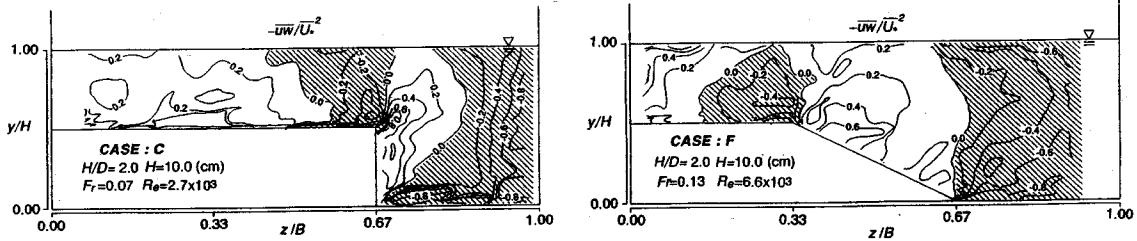


図-9 レイノルズ応力のコンター (FLDA)

ここで渦径の代表値として、式(3),(4)における積分範囲を無限大にとるかわりに、相関係数が最初に極大値の50%をとるまでに囲まれる面積を採用した。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く、異なる特性が見られた。これは、境界部に近いほどある時間を境にして、流下方向に比べて横断方向の混合作用の方が大きくなることを示している。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、やはり同様の特性が見られた。

(3) 条件付き時空間相関解析

前節の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、間欠性のある組織渦の構造・位相パターンや輸送現象は一律に平滑化され打ち消されてしまう恐れがある。そこで特有のパターンに適合したり判定条件を満足した特性量のみを抽出し、時空間相関における時空間的な乱

流変動量を抽出後に集合平均することを試みた。本研究では、壁面近傍のバースト現象に条件付きサンプリング手法の1つである四象限区分法を用いたNezu & Nakagawa(1993)¹⁴⁾と同様の手法を用いて解析を行った。

図-8はフーリエ級数分離を用いて高周波のノイズ成分を取り除いた瞬間流速 \tilde{u}, \tilde{w} の乱れ成分 u, w の時系列である。それぞれの図の横軸は主流方向の乱れ成分 u 、縦軸は横断方向の乱れ成分 w である。高水敷側のJunction近傍では $u-w$ 平面内の4つの象限にはほぼ等しく分布するのに対して、低水路側では第二象限($u < 0, w > 0$)と第四象限($u > 0, w < 0$)に偏る傾向が見られる。図-9はFLDAによって計測されたレイノルズ応力のコンターであり、Junctionから低水路側にかけて正のレイノルズ応力の領域が拡がっている。これより、PTV計測による図-8の結果はFLDA計測による図-9と良く対応している。図-10は図-8を模式的に描いたものであり、しきい値 H' を図のように設定し、以降の条件付き時空間相関解析を行う。しきい値 H' が大きくなるほど選ばれる組織渦の条件が厳しくなる。

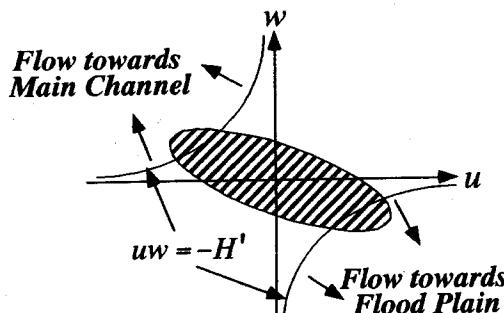


図-10 しきい値 H' の設定

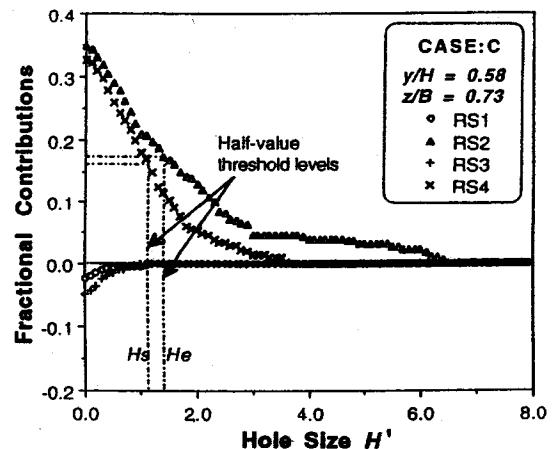


図-11は、変動成分による全レイノルズ応力- \bar{uw} の $u-w$ 平面内における各象限への寄与率を乱れ強度 u',w' の積で無次元化して表したものである。これよりCASE:Cの接合部近傍における低水路側の固定点($z/B=0.73$)においては第二象限(RS2: $u<0,w>0$)の寄与の方が大きいのに対し、CASE:Fの高水敷側の固定点($z/B=0.40$)においては第四象限(RS4: $u>0,w<0$)の寄与の方が大きいことがわかる。これは従来より複断面開水路流れにおいて指摘されているように、低速流体(組織渦)が高水敷側から低水路側へ、それを補う高速流体(補完流)が低水路側から高水敷側へ移流していることが原因と考えられ、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である。またCASE:Cでは第一・三象限の寄与が小さくなっているが、このことは今本ら(1984)¹⁵⁾も指摘しているように、複断面の法面が変化した場合における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、CASE:Cに比べてCASE: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 として次式のように与えられる。本研究では、しきい値としてレイノルズ応力への寄与の半値しきい値を用いた。

$$\begin{aligned} & \langle u_i(x_0, z_0, t; \Delta x, \Delta z, \tau) \rangle \\ &= \frac{\int u_i(x_0 + \Delta x, z_0 + \Delta z, t + \tau) \cdot I(x_0, z_0, t) dt}{\int I(x_0, z_0, t) dt} \\ &= \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M u_i(x_0 + \Delta x, z_0 + \Delta z, t_k + \tau) \quad (5) \end{aligned}$$

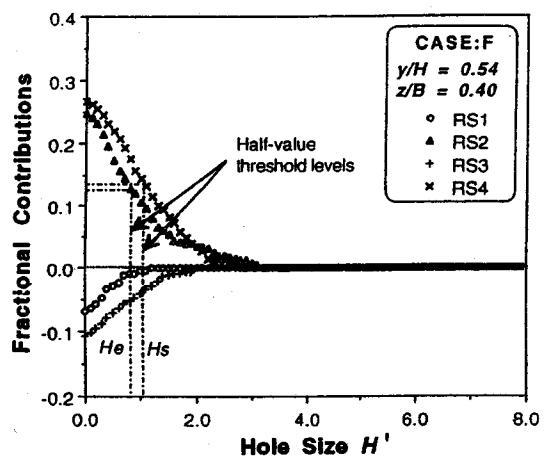
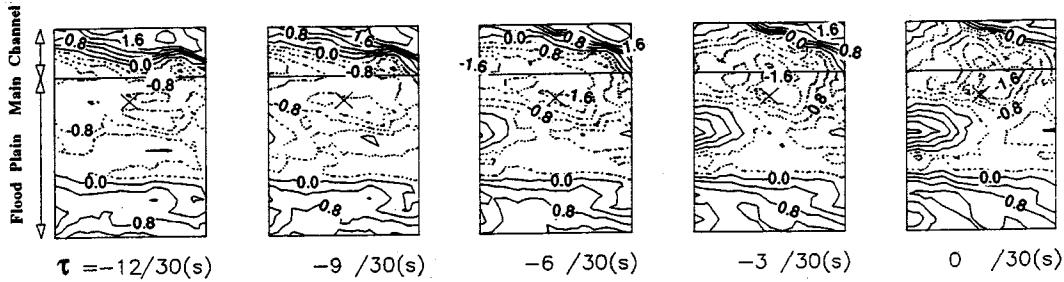
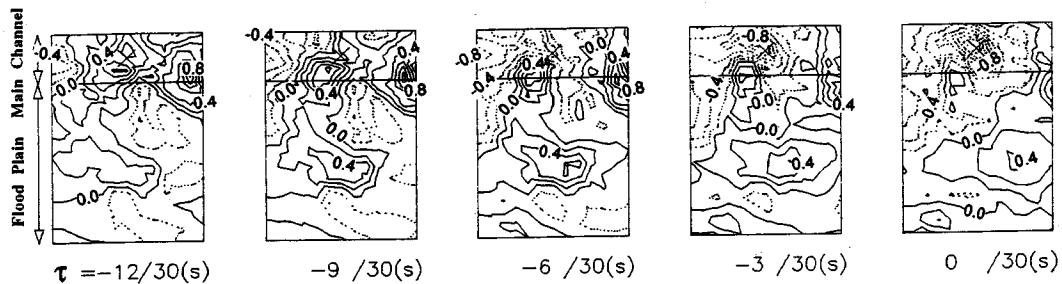


図-11 レイノルズ応力の各象限への寄与率

ここでは組織渦に関連しているとみなしう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-12は $\widehat{u}_i = |u'_i|/u'_i$ 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特性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手がかりになるものと考えられる。



(a) $\langle u \rangle$ ($L_2=1$, CASE:C, $y/H = 0.85$)



(b) $\langle w \rangle$ ($L_4=1$, CASE:C, $y/H = 0.85$)

図-12 条件付き時空間相関係数

4. 結論

本研究は、2次流に代表される組織渦による複断面開水路流れの3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り、PTV法を用いて実験的に解明したものである。直径 $100\mu\text{m}$ 、比重1.02のトレーサを水中に一様に混入し、LLSを照射してCCDカメラで撮影して光ディスクに画像を記録した。このPTV法を用いることによってLLS平面内の多点同時ベクトルが得られ、時空間相関解析や条件付

きサンプリング手法によって複断面開水路内の時空間的な現象の解明を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

(1) PTV法とFLDAによる計測を比較することによって、PTV法の精度の検証を行った。これより境界部や画像解析範囲の端部で若干誤差が大きくなる傾向が見られたが、全体的に誤差は5%程度でありPTV法による計測は比較的良い精度を持つことがわかった。

(2) 無条件時空間相関解析を行うことによって、平面的な場における相関の移流過程が示された。特に、水面付近と高水敷高さ付近では移流される方向が異なり、複断面流れにおける流体の移動・混合現象と関わりがある。

(3) 偏平率は境界部で特徴的な変化を示し、組織渦の変形過程は低水路と高水敷の相互作用と密接な関係がある。

(4) 条件付きサンプリング手法の1つである四象限区分法を用いた。これより境界部をはさんで第二象限もしくは第四象限が卓越しており、低速流体が高水敷側から低水路側へ、それを補う高速流体が低水路側から高水敷側へ移流していることが原因と考えられる。

(5) 条件付き時空間相関解析を行うことによって第二象限と第四象限のみを抽出し、移流過程を検証した。これより(4)の妥当性が示された。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、新日本製鐵(株)技術開発本部、伊佐隆善氏・津田宜久氏より貴重なご指導を受けたことを記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 芦田和男、藤田正治、劉柄義：複断面直線河道における浮遊砂の流送過程、第32回水理講演会論文集、pp.461-466、1988.
- 2) 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、pp.63-72、1989.
- 3) 今本博健、石垣泰輔、武藤裕則：複断面開水路流れにおける低水路流れと高水敷上流れの混合機構に関する実験的研究、水工学論文集、第36巻、pp.139-144、1992.
- 4) 玉井信行、河原能久：複断面開水路流れの特性と抵抗則に関する研究、第25回水理講演会論文集、pp.113-118、1981.
- 5) 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、pp.131-142、1995.
- 6) Tominaga, A. & Nezu, I. : Turbulent structure in compound open channel flows, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, 117(1), pp.21-41, 1991.
- 7) Naot, D., Nezu, I. & Nakagawa, H. : Hydrodynamic behavior of compound rectangular open channels, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, 119(3), pp.390-408, 1993a.
- 8) Naot, D., Nezu, I. & Nakagawa, H. : Calculation of compound open channel flow, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, 119(12), pp.1418-1426, 1993b.
- 9) Utami, T. & Ueno, T. : Experimental study on the coherent structure of turbulent open-channel flow using visualization and picture processing, *J. Fluid Mech.*, 174, pp.399-440, 1987.
- 10) 木下良作、宇民正、上野鉄男：洪水時河川に現れる大規模渦について、第23回乱流シンポジウム講演論文集、pp.329-334、1991.
- 11) 津田宜久、小林敏雄、佐賀徹雄：汎用PIVシステム(Current)の開発、第6回流れの計測大阪シンポジウム論文集、pp.47-52、1991.
- 12) Nezu, I., Nakagawa, H. & Saeki, K. : Coherent structures in compound open-channel flows by making use of particle-tracking visualization technique, *Proc. of Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation*, ASCE, pp.406-415, 1994.
- 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) Nezu, I. & Nakagawa, H. : *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR-Monograph, Balkema, 1993.
- 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、pp.433-444、1984.

(1995. 8. 8 受付)

SPACE-TIME CORRELATION ANALYSIS IN COMPOUND OPEN-CHANNEL FLOWS BY MAKING USE OF PARTICLE-TRACKING VELOCIMETRY

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 floodplain induced by coherent vortices, so-called secondary currents, etc. In this paper, a new quantitative visualization technique called the "Particle-Tracking Velocimetry (PTV)" was used to investigate space-time correlation structures of coherent vortices because instantaneous velocity components can be obtained at all grid points of laser-light-sheet (LLS) from continuous four images of one particle (four-field-images'method). At that time, a new-type two-component fiber-optic laser Doppler anemometer (FLDA) was used to verify the accuracy of PTV measurements.