

# 多断層スキニングPIVの開発と 複断面開水路流れの 3 次元可視化計測

## DEVELOPMENT OF MULTI-LAYER SCANNING PIV SYSTEM AND 3-D VISUALIZATION MEASUREMENTS IN COMPOUND OPEN-CHANNEL FLOWS

禰津家久<sup>1</sup>・山上路生<sup>2</sup>・神谷敦史<sup>3</sup>

Ichisa NEZU, Michio SANJOU and Atsushi KAMIYA

<sup>1</sup>フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 社会基盤工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 京都大学大学院助手 社会基盤工学専攻 (同上)

<sup>3</sup>学生員 京都大学大学院修士課程 社会基盤工学専攻 (同上)

A multi-layer scanning 3-D PIV system was developed, in which the different elevated laser light sheets (LLS) were projected into the tilting flume almost simultaneously. This specially designed PIV system is able to measure time-dependent velocity components in the 3-D region at the same time. In this study, turbulence measurements were conducted in a compound open-channel flow, in which large-scale horizontal eddies were observed near the junction region between the main-channel and floodplain, and as the results, it was found that there were large correlation properties between the different elevated layers and the tube-like horizontal eddies were transported in the downstream.

**Key Words :** multi-layer scanning PIV, 3-D flow visualization, compound open-channel, horizontal eddy

### 1. はじめに

主流速シアを有する複断面開水路流れでは、せん断不安定に起因する水平渦が発生し、従来から多くの研究者に注目されてきた。水平渦のような組織構造の解明には可視化手法が適しており、例えば池田ら<sup>1)</sup>はアルミ粉を用いて両側複断面開水路における水平渦の安定特性を明らかにした。また石垣・今本<sup>2)</sup>は、トレーサー粒子のパスラインを追跡して複断面開水路流れにおける 2 次流と水平渦の関係性を考察した。一方禰津ら<sup>3)</sup>は、PIV による乱流計測を行って、かぶり水深が大きい流れ場では一対の双子水平渦が発生することを明らかにした。最近、著者らのグループは水平渦の立体構造に着目して、レーザーライトシート(LLS)を高低差の異なる 2 面に分割して水路側壁から照射する 2 層 PIV 手法を開発した<sup>4)</sup>。このシステムによる複断面開水路流れの 3 次元可視化計測の結果、水平渦が管状の立体構造を有しながら流下することが予測されたが、可視化システムの特性上、2 層の LLS は流下方向に位置ずれしており、同一流下方向位置における異なる鉛直位置での流速ベクトルデータの同時計測は行えないという問題がある。

したがって本研究では、この問題点を克服するために新たな 3 次元 PIV 計測システムを開発し、複断

面開水路流れにおける水平渦の立体構造を考察する。さて PIV の 3 次元化は、近年の計測機器やソフトウェアの発達とともに大きく進展しているが、完全な手法はまだ確立されているとはいえず、解析目的にあわせた手法の選択が必要である。最近では 3 次元領域における流速 3 成分を同時計測できるホログラフィ PIV が開発されている<sup>5)</sup>が、高価な計測システムと高度な計測技術が必要なために研究例はまだ少ない。一般的に 3 次元 PIV でよく用いられるものは、ステレオ PIV である。この方法では複数のカメラを使用して LLS 上の 3 成分流速ベクトルを同時解析できる。これまでに種々の流れ場に適用されており、水工学分野では、Wels<sup>6)</sup>がステレオ計測によって開水路流れの組織乱流構造を画像解析している。しかしながら、2 台のカメラを用いる標準ステレオ PIV では、3 次元空間における流速成分を同時解析できない。したがって、ステレオ PIV を用いて水平渦の立体構造を直接的に可視化計測することは困難である。

その他の代表的な 3 次元 PIV として LLS の照射位置を高速移動させて 3 次元空間を撮影するシートスキニング PIV があげられる。牛島<sup>7)</sup>は 2 台のスキナーを用いて立方水槽内の回転流れを対象に、3 次元領域を撮影し流速ベクトルの 3 成分を時系列計測した。シートスキニング PIV では、単体の

表-1 実験条件

| case name | $Q$ (l/s) | $U_m$ (cm/s) | $D$ (cm) | $H$ (cm) | $h$ (cm) | $Re$ | $\xi_f$ | $\xi_m$ |
|-----------|-----------|--------------|----------|----------|----------|------|---------|---------|
| A14B32    | 1.8       | 9.5          | 5.0      | 7.2      | 2.2      | 6840 | 0.14    | 0.32    |
| A14B50    |           |              |          |          |          |      |         | 0.5     |
| A14B68    |           |              |          |          |          |      |         | 0.68    |
| A14B86    |           |              |          |          |          |      |         | 0.86    |
| A50B14    |           |              |          |          |          |      | 0.5     | 0.14    |
| A50B32    |           |              |          |          |          |      |         | 0.32    |
| A50B68    |           |              |          |          |          |      |         | 0.68    |
| A50B86    |           |              |          |          |          |      |         | 0.86    |
| A86B14    |           |              |          |          |          |      | 0.86    | 0.14    |
| A86B32    |           |              |          |          |          |      |         | 0.32    |
| A86B50    |           |              |          |          |          |      |         | 0.5     |
| A86B68    |           |              |          |          |          |      |         | 0.68    |

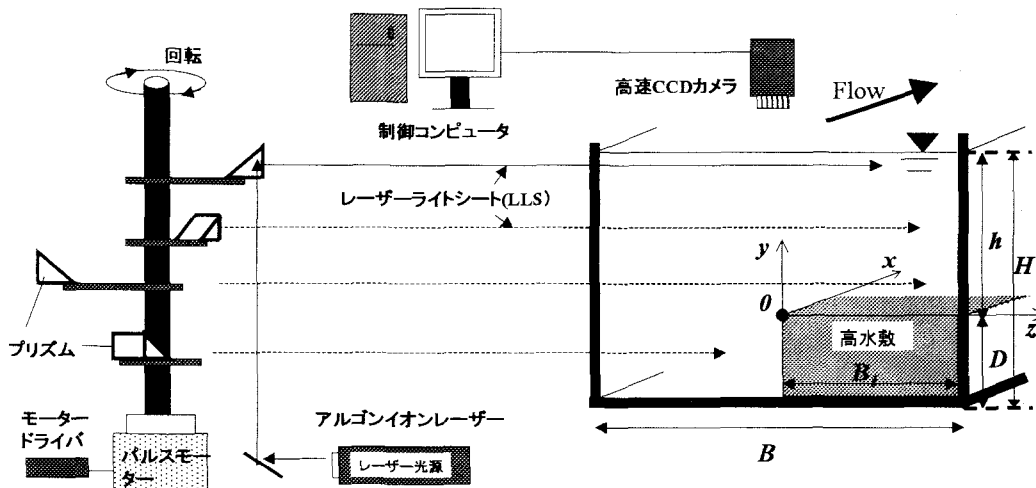


図-1 実験装置図

カメラを用いて3次元空間における流速ベクトルを同時計測できるので、この手法を適用すれば水平渦の立体構造が明らかにできると考えられる。

そこで、本研究では上述のシートスキャニング手法をベースにした3次元PIVシステムを構築し、複断面開水路流れの乱流計測を試みた。さらにその実験結果から、鉛直方向における流速データの相関特性を明らかにし、水平渦の立体構造を考察した。

## 2. 実験装置と水理条件

### (1) 計測システムの概要

図-1に実験システムの概要を示す。実験水路は、全長10m、全幅 $B=40\text{cm}$ の可変勾配型総ガラス製の直線水路である。水路の右岸側にアクリルボックスを用いて高さ $D=5\text{cm}$ の高水敷を全長にわたって設置し、複断面開水路を作成した。図中の $B$ ,  $B_f$ ,  $D$ ,  $H$ および $h$ はそれぞれ水路幅、高水敷幅、高水敷高さ、低水路水深、高水敷かぶり水深を表す。また座標系は流下方向、鉛直方向および横断方向を、それぞれ $x$ ,  $y$ および $z$ とし、その時間平均流速を $U$ ,  $V$ および $W$ 、乱れ成分を $u$ ,  $v$ および $w$ とする。なお図に示すように鉛直方向および横断方向の原点をそれぞれ高水敷高さおよび水路中央部とした。

後述する回転プリズム装置によって、高低差をもつ複数のLLSを水路側壁からほぼ同時に照射し、LLS上のトレーサー粒子を水路上方に設置したCCDカメラ(DALSA, 解像度 $512 \times 512$ ピクセル, 撮影速度 $250\text{Hz}$ )で高速撮影する。

### (2) 多断層レーザーライトシートの照射原理

本実験では、図-1に示す回転プリズム装置によって多断層のLLSを水路に照射する。この回転装置はステッピングモーターに接続された回転軸と光学プリズムが設置された4本のアルミ製アームから構成される。光源のアルゴンイオンレーザーを、高速回転するアーム先端のプリズムで反射させることで、流れ内部に高さの異なるLLSをほぼ同時に照射する。各アームの取り付け高さは任意に調整でき、またアーム数を増やせば、その分多くの計測LLS面を確保できる。CCDカメラはコンピュータ制御されており、プリズムの回転数に合わせて時系列にデジタル撮影を行う。

### (3) 計測ケース

表-1に水理条件と計測ケースを示す。本実験では1種類の水理条件を設定した。 $Q$ は流量、 $U_m$ は断面平均主流速および $Re \equiv U_m H / \nu$ はレイノルズ数である。本実験では同時に解析するLLSの数は2層

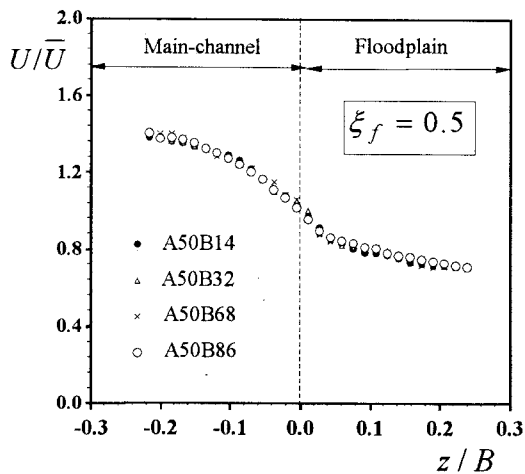


図-2 平均主流速分布

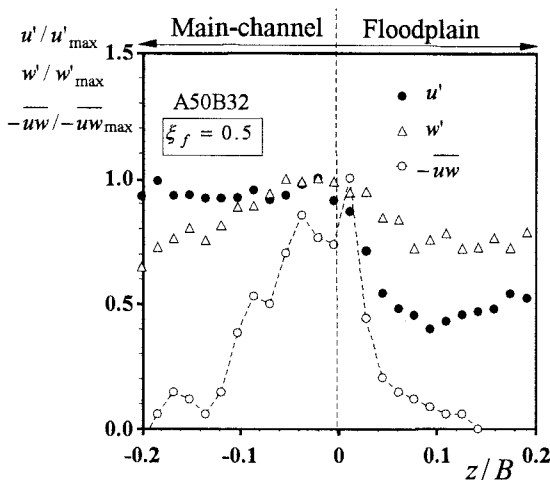


図-3 乱れ強度とレイノルズ応力分布

とし、その組み合わせパターンを計測ケースとして整理した。鉛直方向の相関特性を明らかにするために、2層のうち的一方を固定LLSとし、もう一方の高さを高水敷底面から水面まで変化させた。ケース名中のAが固定LLS、Bが移動LLSを表し、表-1中の $\xi_f = y_f/h$ および $\xi_m = y_m/h$ はそれぞれ高水敷のかぶり水深で無次元化した固定LLSおよび移動LLSの照射高さを示し、添字の $f$ および $m$ はそれぞれ固定LLSおよび移動LLSを示す。本研究では固定LLS高さとして底面部( $\xi_f = 0.14$ )、半かぶり水深部( $\xi_f = 0.5$ )および水面部( $\xi_f = 0.86$ )の3位置を設定した。それぞれの $\xi_f$ に対して、4通りの $\xi_m$ を組み合わせ合計3シリーズ12ケースとした。

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 平均主流速分布

ここでは、主流速分布の実験結果を考察する。図-2はケースA50シリーズの4ケースで計測された $\xi_f = 0.5$ における時間平均した主流速 $U$ の横断方向分布を比較したものである。 $U$ の値は横断方向の

平均値 $\bar{U}$ で無次元化してある。この図から撮影ケース間の計測結果の差はほとんどなく、LLSが設定高度 $\xi_f$ に精度よく照射されていることがわかる。多くの既往研究と同様に、主流速分布 $U(z)$ は低水路の方が高水敷よりも大きく、低水路と高水敷の境界部付近に変曲点をもつ。この結果、境界部ではせん断不安定となり水平渦が発生すると考えられている。

#### (2) 乱れ統計量の分布

図-3はケースA50B32で計測された固定LLS上の $\xi_f = 0.5$ における乱れ強度 $u'$ 、 $w'$ およびレイノルズ応力 $-uw$ の横断方向結果を示す。結果はそれぞれの最大値で無次元化してある。 $u'$ は主流速分布に対応して低水路の方が高水敷よりも大きな値をもつ。また低水路と高水敷の境界部で最大値が存在する。 $w'$ に関しても $u'$ と同様に境界部で最大値が観察される。これは境界部でのせん断不安定によって大きな乱れが発生するからだと考えられる。

レイノルズ応力は、乱れ強度と同様に低水路と高水敷の境界部で大きな正値がみられ、高水敷と低水路の間で運動量の交換が活発に行われていることがわかる。この特性は既往研究と同様の結果であり、水平渦が低水路と高水敷の境界付近に存在することを意味している。

#### (3) 瞬間ベクトル分布

本節では2層LLSの同時解析結果について考察する。図-4はケースA50B86における固定LLS $\xi_f = 0.5$ および移動LLS $\xi_m = 0.86$ の高さに照射された2つのLLS上の同時瞬間ベクトルを0.2sごとに時系列に示したものである。2つのLLSの間隔差は $\Delta y = y_f - y_m = 8\text{ mm}$ である。また図は主流速の横断平均値 $\bar{U}$ を差し引いた移動座標系で示し、水平渦の中心位置に×印をつけた。渦中心はベクトル分布と渦度分布より算定した。基準時刻 $t = 0\text{ s}$ では $\xi_f = 0.5$ および $\xi_m = 0.86$ において、水平渦が低水路と高水敷の境界付近に存在することがわかる。これらの位置は、2つのLLS上においてほぼ同一である。また時間変化とともにこれらの渦は流下していくが、 $t = 0.2\text{ s}$ および $0.4\text{ s}$ においても、2層間の渦の相対位置に変化はほとんどない。この特性は他のLLSの組み合わせにも観察され、水平渦は鉛直方向に強い相関構造をとまって、渦管状の立体構造を有しながら移流していくことがわかる。この特性は凍結乱流の仮説によって楠津ら<sup>4)</sup>の2層PIV結果で予測されていたが、今回のシートスキニングPIVで凍結乱流仮説を用いずに直接実測され解明された意義は大きい。

#### (4) LLS間の鉛直相関特性

本節ではLLS間の相関を定量的に評価する。そのために式(1)で定義される空間相関係数を計算して

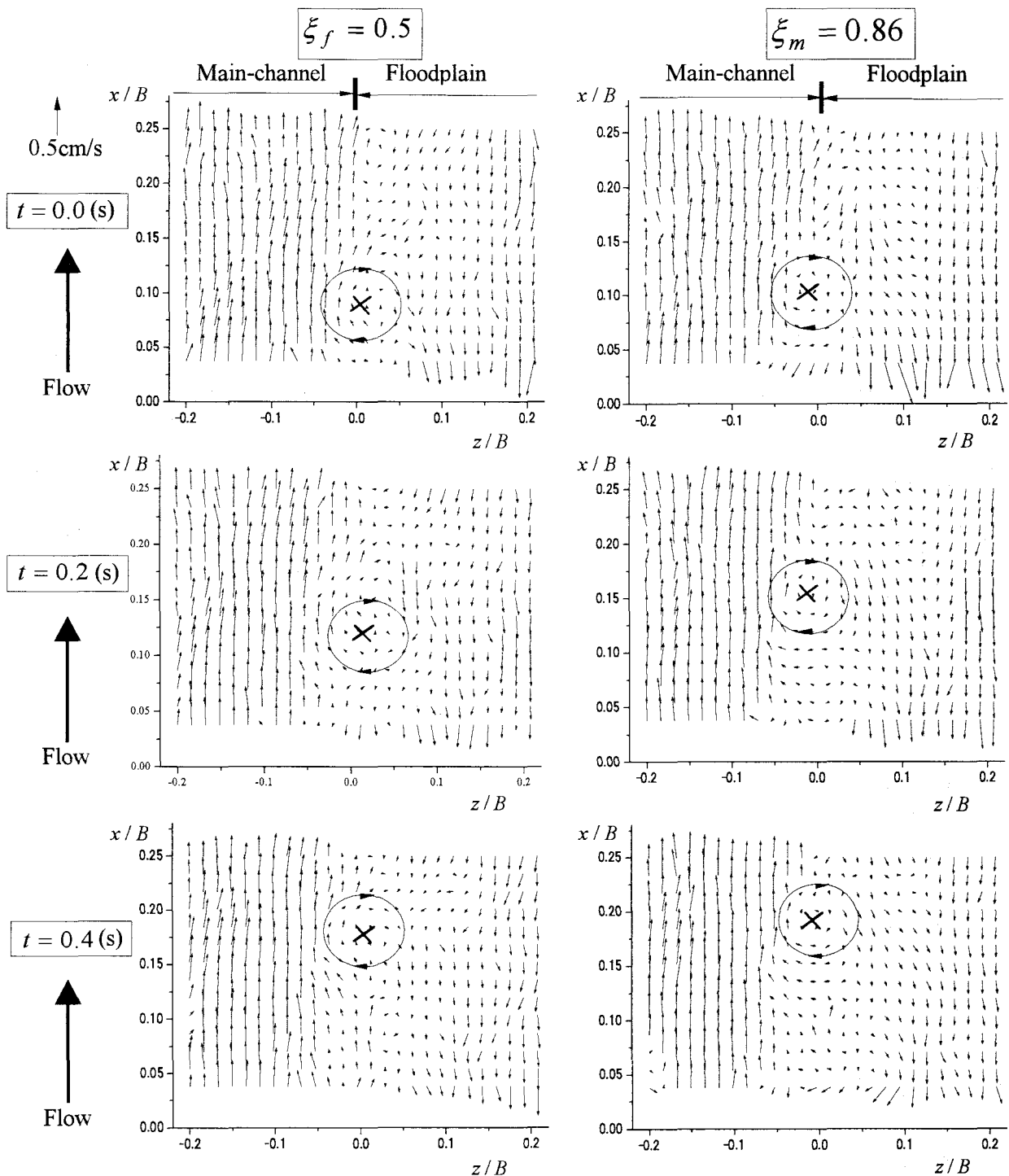


図-4 同時瞬間ベクトル分布 (×印は渦中心を示す)

実験結果を考察する。

$$C_{u_i u_j}(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = \frac{u_i(x_f, y_f, z_f, t) \cdot u_j(x_f + \Delta x, y_f + \Delta y, z_f + \Delta z, t)}{u_i'(x_f, y_f, z_f, t) \cdot u_j'(x_f + \Delta x, y_f + \Delta y, z_f + \Delta z, t)} \quad (1)$$

ここで  $(x_f, y_f, z_f)$  は基準となる固定点座標で、 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  は固定点から対象点までの距離である。また上付きバーは時間平均操作を示す。

水平渦の通過によって瞬間流速の横断成分  $w$  が周期的に特徴ある時間変化するから<sup>4)</sup>、横断流速に

関する空間相関  $C_{ww}$  の分布特性に着目する。ケース A50 シリーズを対象とし、固定点の平面位置は画像中央点 ( $x_f/B = 0.15$  および  $z_f/B = 0$ ) とした。ここでの瞬間流速  $w$  と  $\Delta y$  を正負に変化させた移動 LLS における  $w$  の相関係数を計算した。その平面分布を図-5(a)~(d) に示す。各図には固定点位置  $(x_f, z_f)$  に × 印をつけた。いずれの結果も固定点に近い位置での相関値が大きく、固定点から離れるにつれて相関が小さくなっていく様子がわかる。また LLS 間の鉛直距離が小さいほど、相関係数は大きいことがわ

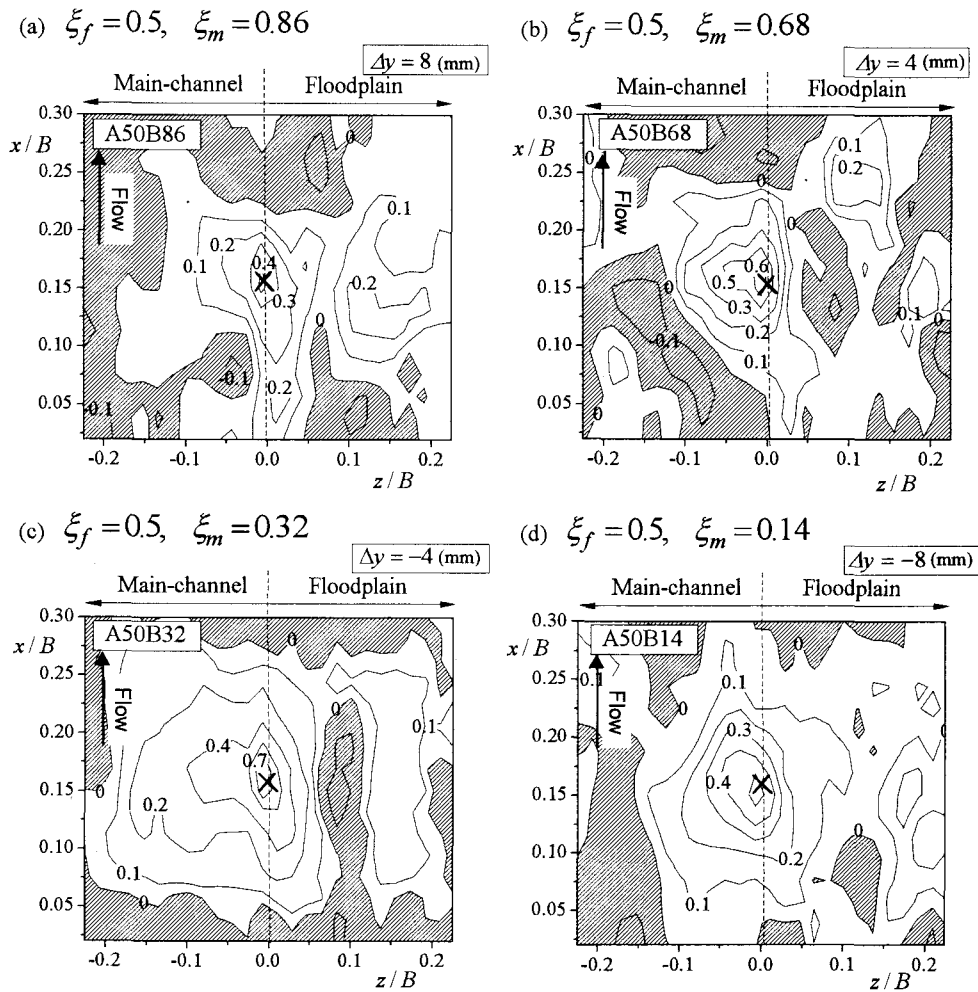


図-5 2層間相関係数のコンター (A50シリーズ, ×印は固定基準点位置を示す)

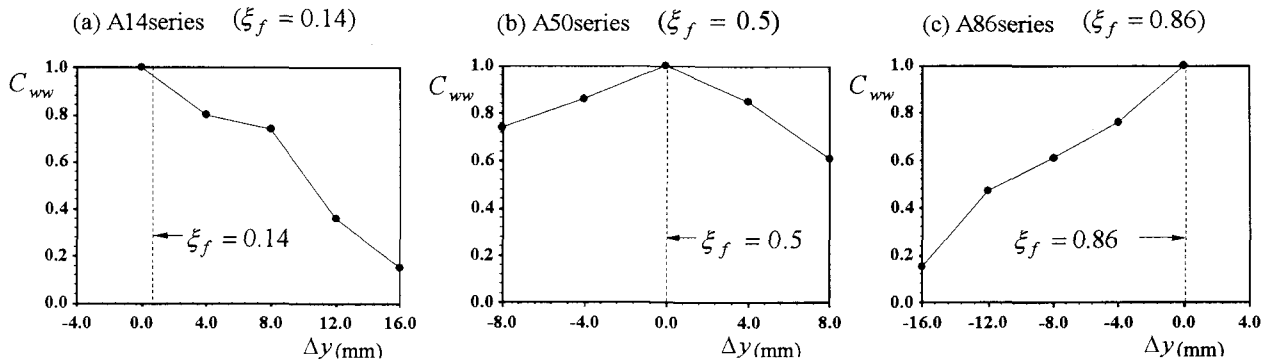


図-6 2層間相関係数の鉛直変化

かる。

次に固定点の鉛直位置 $\xi_f$ を系統的に変化させて考察する。これらの固定点の平面座標位置はすべて高水敷と低水路の境界上にある画像中央点( $x_f/B=0.15$ および $z_f/B=0$ )とした。図-6(a)~(c)は、固定点と同一の平面座標に位置する対象点との相関係数 $C_{ww}$ をプロットした。すなわち、 $\Delta x = \Delta z = 0$ とし、 $\Delta y$ のみ変化させた相関係数 $C_{ww}(\Delta y)$ を算出した。ここで固定点と対象点が同一高さ( $\Delta y = 0$ )の場合の相関係数は $C_{ww} = 1$ である。

これらの結果から固定点の鉛直位置に関係なく、固定点から離れるにつれて相関値は減少することがわかる。またシリーズA14とA86の結果から、水面側および底面側に向かう場合で、相関係数の減少特性に大きな差はみられない。

#### (5) 基準点の横断位置変化の相関特性への影響

前節では低水路と高水敷の境界上に固定点を取り、空間相関特性を明らかにした。本節ではこの固定点 $z_f$ を横断方向に移動させて、相関係数の変化を考察する。図-7は2層のLLS間距離が $\Delta y = 8 \text{ mm}$ の

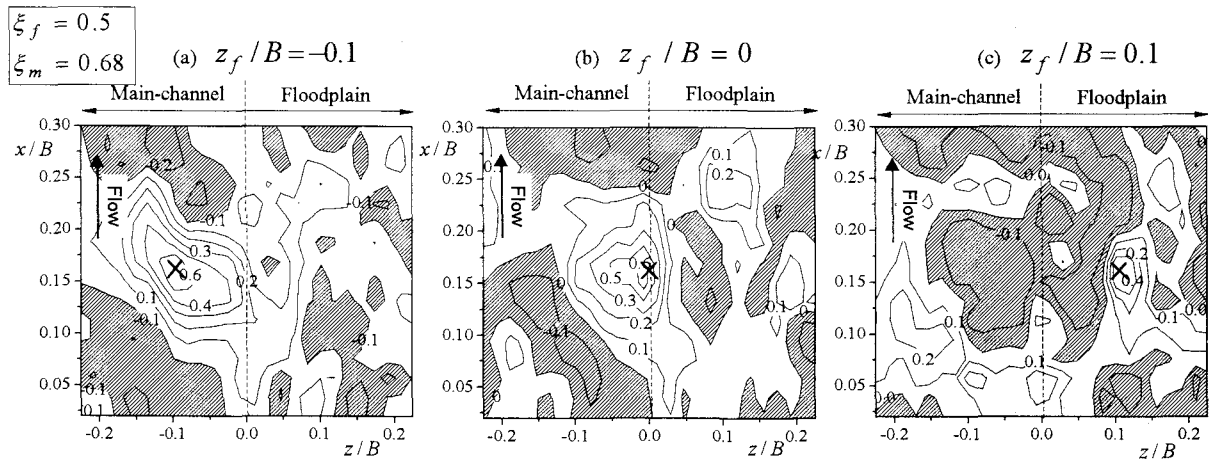


図-7 固定点の横断位置を変化させた相関係数コンター（×印は固定点位置を示す）

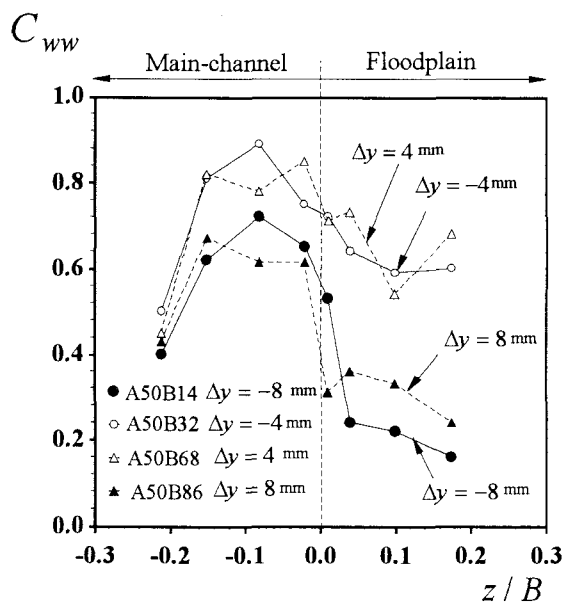


図-8 2層間相関係数の横断方向変化

ケースA50B68を対象に、低水路、境界部および高水敷に位置する3種類の固定点( $z_f/B = -0.1, 0$  および  $0.1$ )の相関係数  $C_{ww}$  のコンターを示したものである。この結果から相関係数の最大領域は、いずれの場合も固定点近くに存在することが確認できる。

最後に鉛直相関の横断方向特性について考察する。図-8は固定点の鉛直位置が  $\xi_f = 0.5$  であるA50シリーズを対象に、鉛直位置のみが異なる2点の相関係数について横断方向の変化を示したものである。この結果からも  $\Delta y$  が小さいほど鉛直相関が大きいことがわかる。さらにいずれのケースにおいても、 $C_{ww}$  は境界部の低水路側に大きな分布をもつ。すなわち水平渦の通過領域では、鉛直方向の大きな相関があるが、通過ラインから離れると鉛直相関が小さくなる。特に高水敷側への減少が顕著である。このことは水平渦が管状構造をもって流下することと対応している。

#### 4. おわりに

本研究では、レーザー光を回転分光するシートスキャニングPIVシステムによって、複断面開水路流れの3次元の画像計測を行った。流速成分の瞬間ベクトル分布や鉛直方向の流れの相関特性から、水平渦は管状の立体構造を有しながら、流下することを明らかにした。今後、同時解析するLLS層の数を増やしてさらに詳細な水理特性を研究したい。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、関西大学工学部植村知正教授には多くの助言と資料を頂いた。またレントオール奨学財団から研究助成を受けた。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 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, No.509/II-30, pp.131-142, 1995.
- 2) 石垣泰輔, 今本博健: 可視化法による複断面開水路流れの3次元構造に関する研究, 土木学会論文集, No.515/II-31, pp.45-54, 1995.
- 3) 梶津家久, 鬼束幸樹, 相良幸輝, 池谷和哉: かぶり水深の変化が複断面開水路流れの組織渦に及ぼす影響に関する研究, 土木学会論文集, No.649/II-51, pp.1-15, 2000.
- 4) 梶津家久, 山上路生, 後藤健: 二層PIVを用いた複断面開水路流れにおける乱流渦の三次元組織構造に関する実験的研究, 水工学論文集, Vol.48, pp.535-540, 2004.
- 5) 木村一郎, 植村知正, 奥野武俊: 可視化情報計測, 近代科学社, 2001.
- 6) Wells, J.C., 岸田圭史: 開水路流における壁面乱流構造のステレオPIVによる計測, 水工学論文集, Vol.46, pp.529-534, 2002.
- 7) 牛島省: レーザーライトスキャニングを用いた三次元画像処理流速計測法, 機械学会論文集, Vol.62, No.595, pp.134-139, 1996.

(2004.9.30 受付)