

多断層スキニングPIVを用いた蛇行複断面 開水路流れの時空間相関特性に関する研究

SPACE- TIME CORRELATION PROPERTIES IN MEANDERING COMPOUND
OPEN-CHANNEL FLOW BY USING MULTI-LAYER SCANNING PIV

山上路生¹, 禰津家久², 土井智礼³, Hoang Quang³
Michio Sanjou, Iehisa Nezu, Tomonori Doi and Hoang Quang

¹正会員, 博(工), 京都大学大学院助手, 工学研究科社会基盤工学専攻(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²フェロー, 工博, 京都大学大学院教授, 工学研究科社会基盤工学専攻(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³学生員, 京都大学大学院修士課程 工学研究科社会基盤工学専攻(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

It is necessary to investigate coherent turbulence structure in meandering compound open-channel flows for predicting the transport and distribution of suspended sediment in actual rivers. However, in previous studies, flow-visualization techniques such as PIV and PTV, have not been applied sufficiently, and thus, there is almost no detailed information of coherent turbulence in meandering compound open-channel flows.

Therefore, in this study, we conducted innovative flow-visualization measurements by using a multi-layer scanning PIV system, and could analyze instantaneous velocity vectors on horizontal planes at several different elevations simultaneously. As the results, the correlation properties between the different elevations were revealed in the meandering compound open-channel flow.

Key Words : meandering compound channel, multi-layer scanning PIV and space-time correlation

1. はじめに

本研究では直線状の高水敷流れと蛇行低水路流れから構成される複雑な開水路流れを対象とする。このような蛇行複断面開水路流れは実際の河川においてもみられ、多くの実験的成果が報告されている。例えば、福岡ら(1997)¹⁾は実河川を想定して高水敷粗度が大きな蛇行複断面水路を用いて、電磁流速計による水理実験を行い、2次流セルの変化特性を考察している。また彼ら²⁾は航空写真を用いて実河川の洪水流の表面流速を計測して、その分布特性と相対水深、蛇行度および位相差の関係を明らかにした。レーザー流速計(LDA)を用いた基礎水理特性の解明も試みられている。Shiono&Muto(1998)³⁾はLDAを用いて蛇行複断面流れの流速3成分の分布を報告し、2次流渦の流下方向の変化やかぶり水深による水理特性および乱流構造の変化を考察している。また河川工学上、その解明が重要な底面せん断応力についても検討が行われている。石垣・武藤(1998)⁴⁾はフィルムセンサーを用いて蛇行複断面河道の河床せん断応力を計測して、かぶり水深が大きくなるにつれて最大せん断応力の作用位置が内岸側に移動することを示した。また渡邊ら(2004)⁵⁾はLDAを用いて蛇行複断面流れを乱流計測してレイ

ノルズ応力分布から底面せん断応力を求めた。このように多くの研究者によって蛇行複断面流れの水理特性が明らかにされてきた。

しかしながら、蛇行複断面流れにおける組織乱流構造についてはほとんど解明されていない。禰津ら(2005)⁶⁾はDVカメラを用いて蛇行複断面流れをPIV計測しているが、航空写真手法と同様に自由水面上の計測にとどまっており、流れ内部の組織構造については詳細な知見は得られていない。蛇行複断面流れでは蛇行低水路流れと直線高水流れのクロス効果により、流れの合流および分離が顕著となり、新たな乱れが生成されることが予想される。また多くの既往研究で報告されている横断面2次流によって運動量や乱れが鉛直方向にも輸送される。このような高水敷と低水路間の運動量あるいは乱れエネルギーの交換は組織乱流による寄与も大きいと考えられるから、時間平均的な考察だけでなく、瞬間流速特性についても考察する必要がある。この場合、特に高水敷領域と低水路領域の瞬間流速データを同時に得る必要がある。実河川ではこのような組織渦によって浮遊土砂や溶存化学物質が輸送・拡散されるため、乱流渦構造を立体的に捉えることは河川工学や水域環境工学において重要である。

そこで本研究では、昨年度開発した多断層シート

表-1 実験ケース

U_m (cm/s)	B_m (cm)	D (cm)	H (cm)	H/D	s
7.7	8.0	4.0	5.8	1.45	1.09

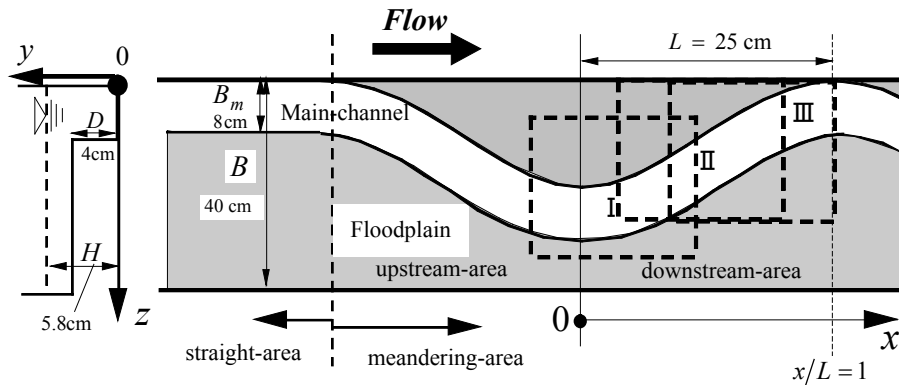


図-1 実験水路と座標系

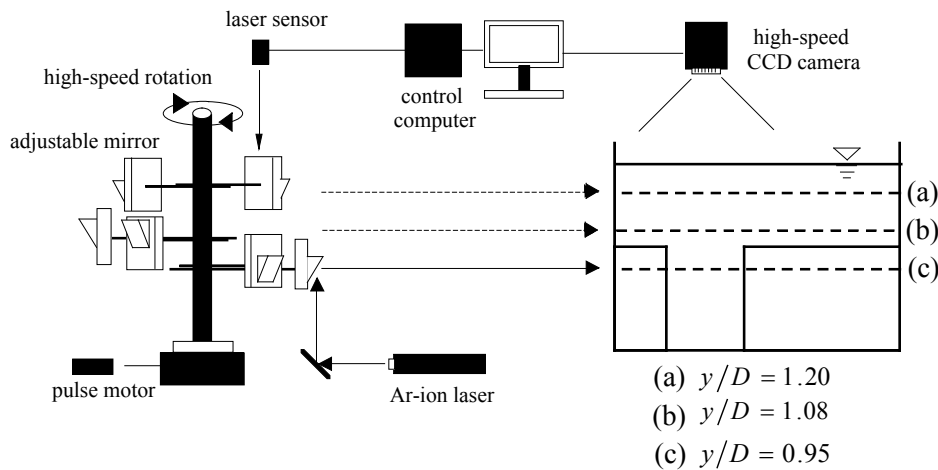


図-2 多断層スキャニングPIVシステムとレーザーライトシートの照射高さ

スキャニングPIVシステム⁷⁾を用いて、低水路内と高水敷領域を同時に乱流計測した。その結果から水平方向および鉛直方向における蛇行複断面流れの時間空間相関特性を実験的に解明した。

2. 流れ場の説明と実験方法

図-1に実験システムを示す。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。湾曲アクリル部材と木材を用いて高水敷を作成し蛇行複断面水路とした。蛇行部は水路上流端から7mの地点から2波長分設置し、上流側に位置する蛇行領域を計測対象とする。低水路形状はサインカーブに従っており、蛇行度(=蛇行長さ/波長)は1.09とした。低水路の幅 B_m は8cmであり、高水敷高さ D はその半分の4cmとした。また蛇行の半波長を L とすると、 $L = 25\text{cm}$ である。 H は水深で本実験ケースでは $H = 5.8\text{cm}$ である。

図-1に示すように座標軸は、流下方向、鉛直方向および横断方向にそれぞれ x 軸、 y 軸および z 軸を

とる。最上流側に設置した蛇行部の頂点に x 軸の原点を、水路底面に y 軸の原点を、水路の左岸側壁に z 軸の原点をそれぞれとった。それぞれの軸に対応する時間平均流速を U 、 V および W として、乱れ成分を u 、 v および w とする。

染料による予備実験の結果、蛇行部の下流領域 ($0 \leq x/L \leq 1$) では蛇行低水路と直進高水敷流の合流や分離により、流れの揺動がみられた。また既往研究で報告されている横断面の2次流とも大きな関連があると推測され、この組織的な乱れによって低水路内の下層と高水敷上の流れが激しく交換されている可能性がある。本研究ではこのメカニズム解明の基礎ステップとして、蛇行下流領域の多断層PIV可視化計測を行った。なおこの領域を全て計測できるように、図-1に示したI~IIIの3つの面を、水路上方に設置した高速CCDカメラで撮影した。またそれぞれの撮影面サイズは約20cm四方であった。

図-2は本実験で用いた多断層PIVシステム⁷⁾と計測面高さを示したものである。この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複数のアルミ製アームから構成され

る。光源にはアルゴンイオンレーザーを用いて、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レーザーライトシート(LLS)をほぼ同時に照射できる。またアームの回転によりシート光が作られる。これによりほぼ同時に、異なる撮影高さの流速データを時系列に計測できる。本実験では高水敷の側岸を透明アクリルで作成して、蛇行低水路内($y/D < 1$)にもLLSが照射できるように工夫し、低水路も含めて合計3層のLLSを照射した。それらの高さは図-2に示すように $y/D = 0.95, 1.08$ および 1.20 であり、高さ間隔はいずれも $\Delta y = 5 \text{ mm}$ である。以後これらをそれぞれ下層、中層および上層とよぶ。同一高さに設置した2つのアームを1ペアとして、合計3ペア(6アーム)を用いた。すなわち各層のPIV解析は1ペアの2画像から行われ、濃度相関を計算する2画像間の時間間隔 δt はペアのアーム間角度で調整できる。今回は6本のアームを 60° の等角間隔で配置し、シャフトを10Hzで回転させたので、 δt は $1/60\text{s}$ となり、異層間の時間差は $1/30\text{s}$ である。このような高水敷上と低水路内部の同時可視化計測によって、既往研究では扱えなかった高水敷上流れと低水路流れの相関特性を明らかにできる点が本研究の特徴といえる。

表-1に水理条件を示す。また高速カメラの感度とシャッタースピードを考慮して1つの水理条件を決定した。表中の U_m は蛇行上流域の直線部における断面平均主流速であり、 $U_m = 7.7 \text{ cm/s}$ であった。

3. 実験結果と考察

(1) 平面ベクトル分布

図-3に上層面($y/D = 1.20$)における時間平均流速の平面ベクトル分布(U, W)を示す。低水路にあたる領域では低水路形状の影響を受けて、蛇行していることがわかる。このことから蛇行低水路流れとその上部の高水敷上流れには相関特性があることが予想される。また $x/L = 0.1$ から 0.5 の左右岸の低水路/高水敷の境界ラインに注目すると、左岸境界ラインから低水路中心にかけて、直流下する高水敷流と蛇行高水敷流が衝突することがわかる。右岸境界ライン付近では蛇行高水敷流と直進高水敷流に流れが分離している。したがって本計測領域では流れが激しく変化するため強い乱れが生成されることが推測される。

そこで以下では直進流と蛇行流のクロスが顕著な撮影面II ($0.1 < x/L < 0.8, 0 < z/B_m < 3.0$)の結果に注目して考察を進める。

(2) 主流速と横断流速のコンター

図-4はおおよび図-5はそれぞれ撮影面IIにおける時間平均した主流速と横断流速のコンター図を上・中・下層の全3層について示したものである。なお負の領域には斜線を引いて区別した。

まず図-4の主流速 $U(x, z)$ について考察する。低水

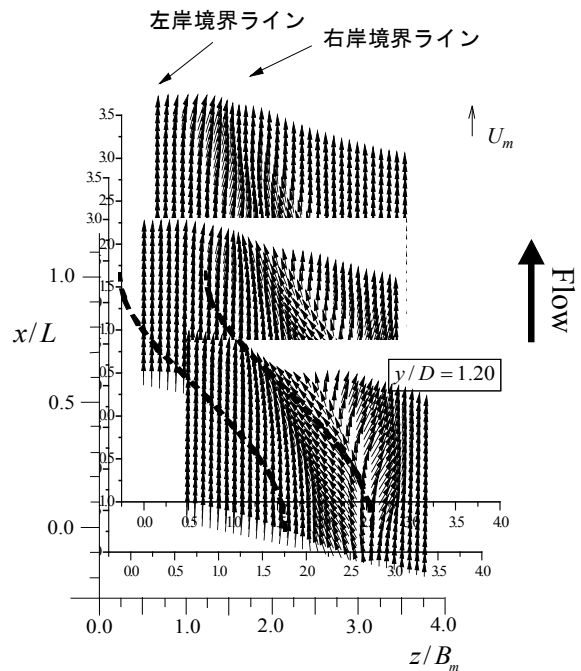


図-3 上層面における平均流速ベクトル

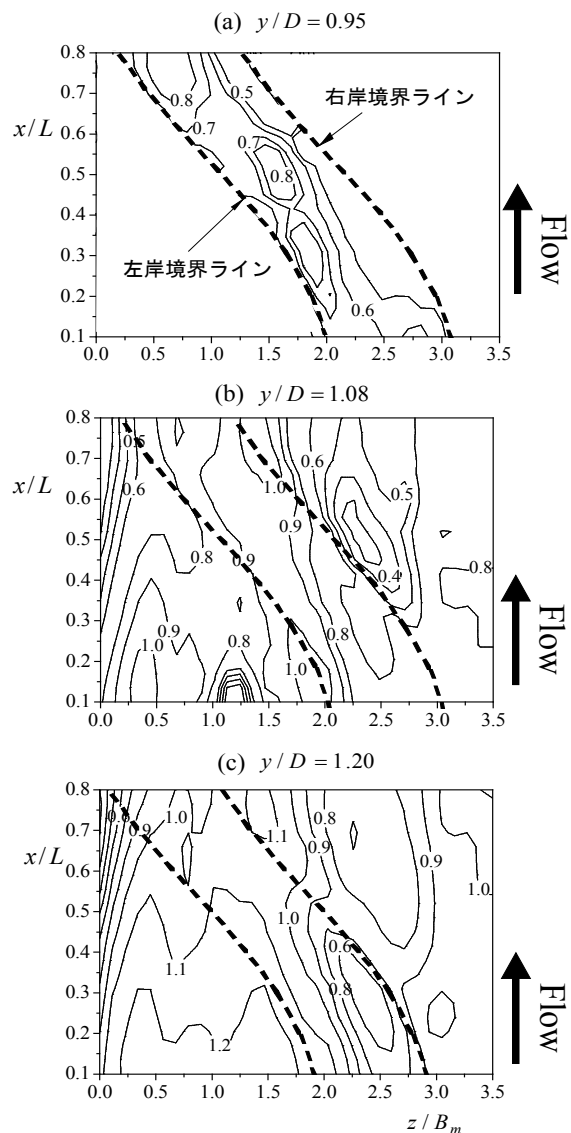


図-4 時間平均主流速 U コンター

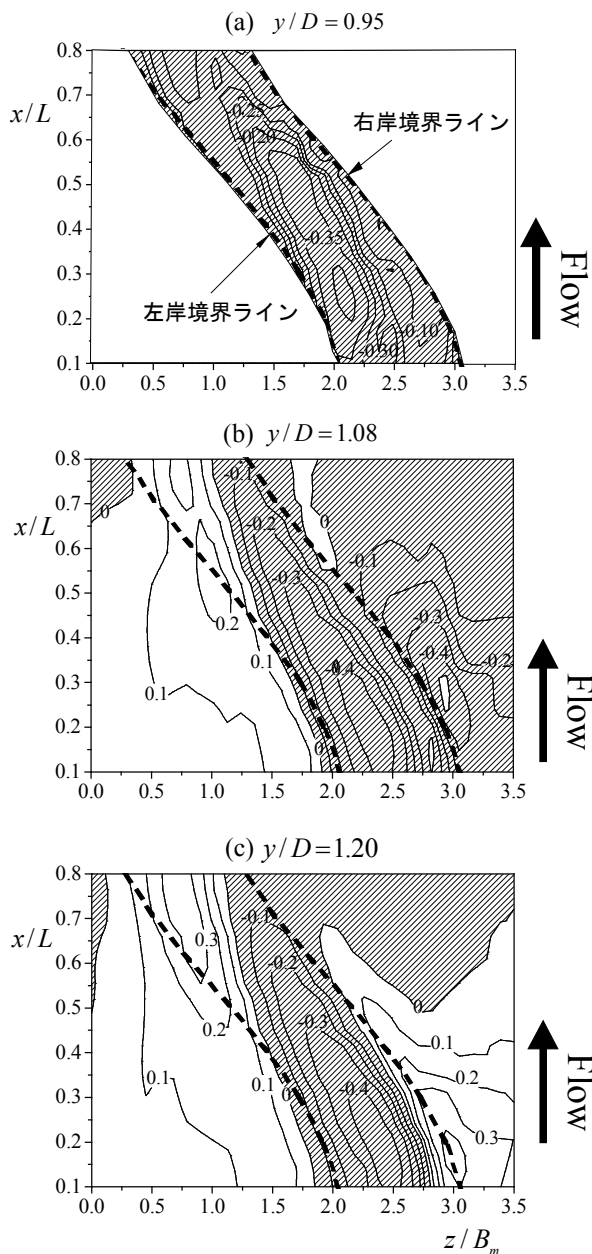


図-5 時間平均横断流速成分 W コンター

路内部の下層面 ($y/D=0.95$) では全体的にコンターラインが低水路形状から少し直下流方向に向き走ることがわかる。また高水敷上の $y/D=1.08$ および 1.20 では低水路流れの影響を受けてコンターラインは湾曲する。

次に図-5の横断流速成分 W については計測層によって明確な違いがみられる。下層面 ($y/D=0.95$) では流れが低水路形状の影響で全て負となっている。中層面 ($y/D=1.08$) では低水路から右岸高水敷にかけて負となり、左岸高水敷では正となる。特に左岸境界ライン付近でのコンター変化が大きく、この領域で上流からの直下流と蛇行流れが激しく衝突することがわかる。上層面 ($y/D=1.20$) では中層の結果とは異なり、右岸高水敷に正の分布が、低水路では負の分布がそれぞれみられる。このことは蛇行流れと直下流れの分離を意味している。一方で左

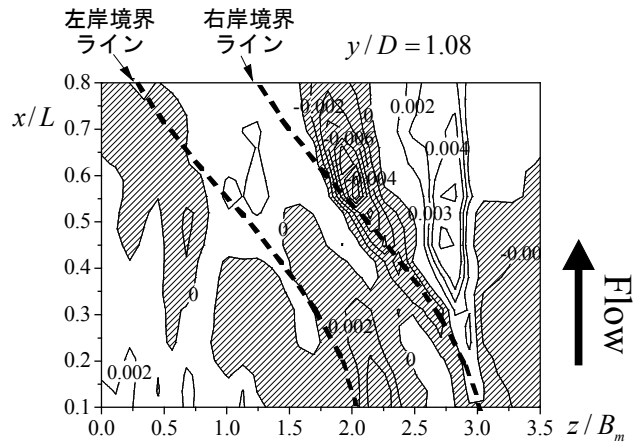


図-6 横断方向レイノルズ応力 $-\overline{uw}/U_m^2$ のコンター (中層面 $y/D=1.08$)

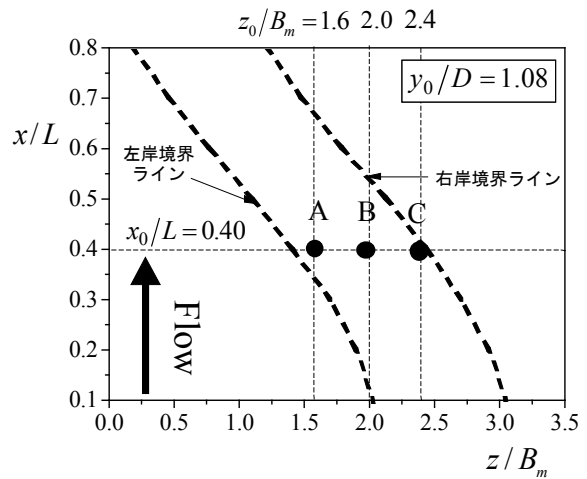


図-7 時空間相関解析の基準点位置

岸高水敷では正の分布となっている。これは中層面 ($y/D=1.08$) の結果と同様に、上流からの直下流と低水路上部の蛇行流の衝突を意味している。

(3) レイノルズ応力分布

前節で考察したように蛇行複断面開水路流れの時間平均流速成分は流れの衝突・分離といった複雑な水理現象を有するから、乱れもその影響を受けるものと思われる。そこで本節では横断方向のレイノルズ応力分布 $-\overline{uw}$ について考察する。図-6は撮影面 II の中層面 ($y/D=1.08$) における $-\overline{uw}$ のコンターを示す。また図-4と同様に負の領域には斜線を引いた。低水路内から右岸高水敷および左岸高水敷に向かって、それぞれ正と負の分布が存在する。ここで、図-4(b)の主流速コンターに注目すると、 $x/L=0.5$ 付近の右岸境界ラインから右岸高水敷において分布の変化が大きなシア領域が存在する。またレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ はほぼ同じ領域で負の極大領域をもち、主流速の横断勾配の変化に対応した分布特性が観察され、流れのクロス領域では平均流シアと乱れの分布には大きな関係性があるといえる。

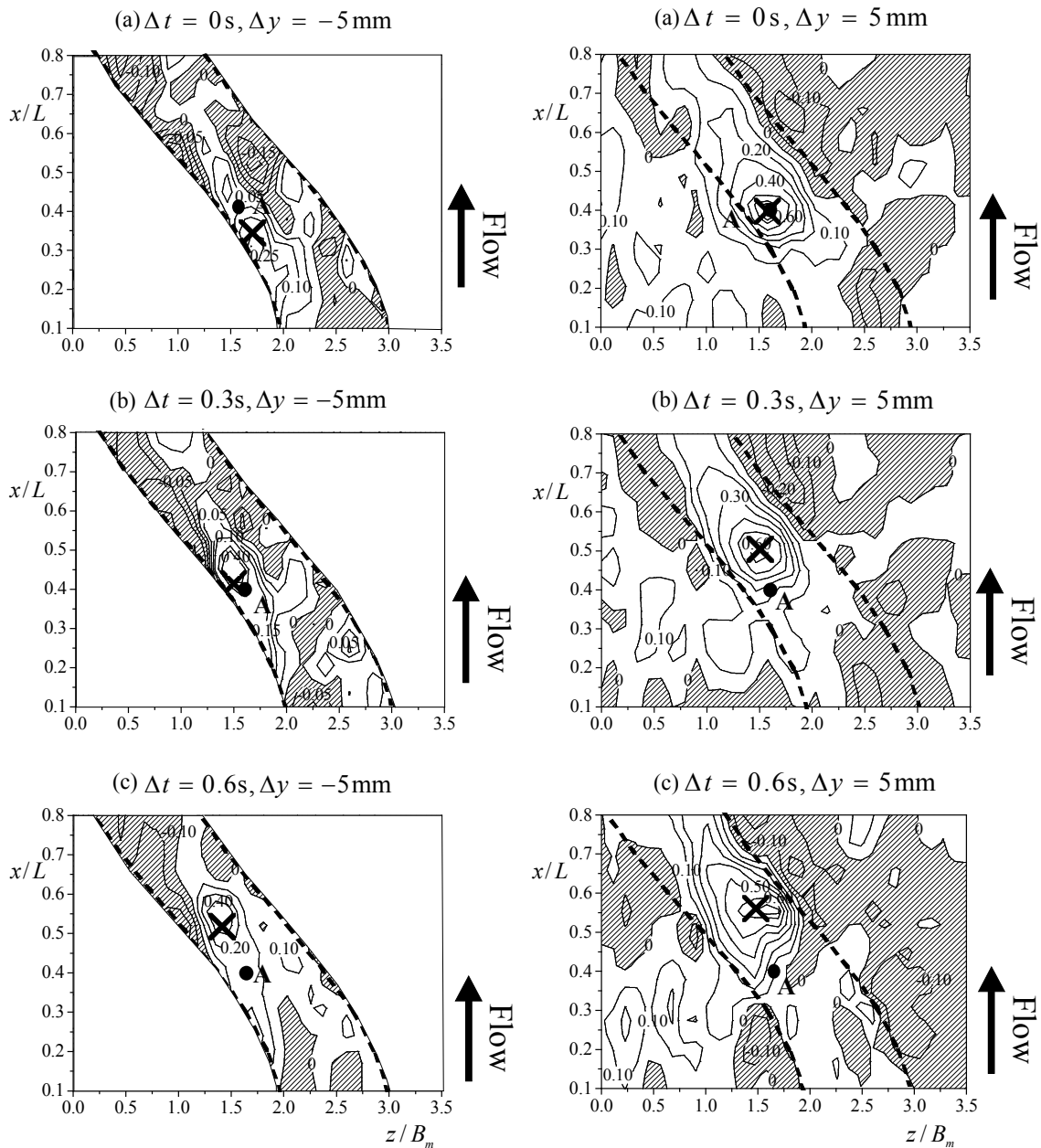


図-8 時空間相関 C_{ww} のコンター (左：中層面と下層面の相関，右：中層面と上層面の相関)

(4) 時空間相関解析

ここでは鉛直位置の異なる計測面間における流速成分の時空間相関解析を行う。特に直下高水敷流れと蛇行低水路流れが衝突する領域では横断方向流速の変動 w が大きいから、 w の相関特性を調べる。さて横断方向流速 w に関する時空間相関係数 C_{ww} は次のように定義される。

$$C_{ww} = \frac{w_o \times w_{o+\Delta}}{w_o' \times w_{o+\Delta}'} \quad (1)$$

ここで添字 o は時刻 t における基準点 (x_o, y_o, z_o) の瞬間値を表し、 $o+\Delta$ は基準点から $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ だけずれた位置の時刻 $t+\Delta t$ における瞬間値を意味する。すなわち、分子において $w_o \equiv w(x_o, y_o, z_o, t)$ および $w_{o+\Delta} \equiv w(x_o + \Delta x, y_o + \Delta y, z_o + \Delta z, t + \Delta t)$ である。分母は規格化のための乱れ強度であり、それぞれ、次の

ように定義される。

$$w_o' \equiv \sqrt{w_o^2}, \quad w_{o+\Delta}' \equiv \sqrt{w_{o+\Delta}^2} \quad (2)$$

本研究では図-7に示すように中層面 ($y_o/D = 1.08$) において左岸境界ライン上から低水路側に向かってA, BおよびCの合計3点の基準点を与えた。これら3点の流下方向位置は $x_o/L = 0.4$ であり、A~Cのそれぞれの横断位置は $z_o/B_m = 1.6, 2.0$ および 2.4 である。

後述するように時空間相関は左岸境界に近い基準点ほど顕著にみられたので、図-8に左岸境界ライン近傍の基準点A ($x_o/L = 0.4, z_o/B_m = 1.6$) と $\Delta y = -5 \text{ mm}$ の下層面および $\Delta y = 5 \text{ mm}$ の上層面との時空間相関係数 C_{ww} を示す。●印は基準点位置を、×印はピーク相関位置を示す。なお $t = 0 \text{ s}$ を基準時

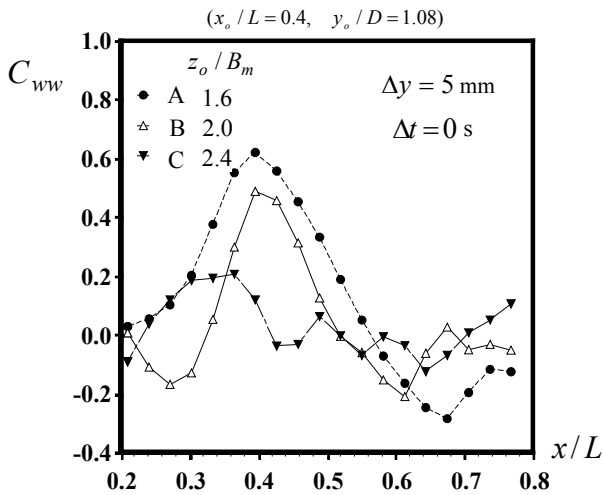


図-9 基準点の位置による C_{ww} 分布の比較

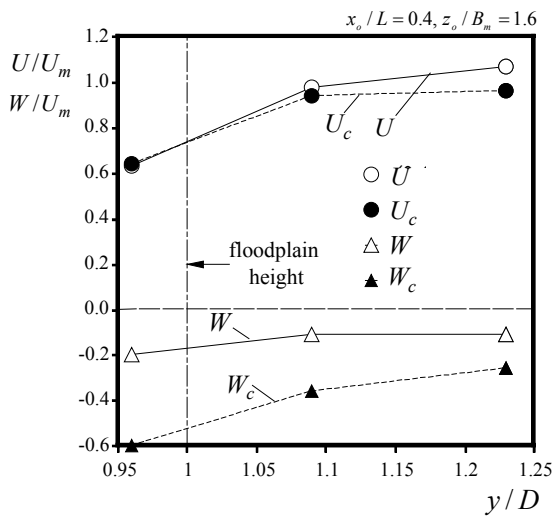


図-10 流速と組織乱流構造の輸送速度の比較

刻として $\Delta t = 0.3s$ の時間間隔で表示した。いずれの面においても、時間とともにピーク相関位置は低水路の蛇行ラインに沿って流下することがわかる。また下層面および上層面におけるこれらのピーク相関の平面位置はいずれの時刻においてもほぼ同じである。このことから低水路内部と高水敷上には同一の組織乱流構造が存在し、瞬間流速は鉛直方向にも大きな相関をもつといえる。すなわち蛇行複断面流れにおいては低水路内から高水敷上にかけて立体的な組織構造が発生し輸送されることがわかる。また同様の特性が主流速成分および渦度の相関についても確認できた。

図-9は時間差 $\Delta t = 0 s$ における3つの基準点の上層面 ($y/D = 1.20$) との C_{ww} について、基準点を含む x 方向の分布変化をプロットしたものである。点Aおよび点Bに関しては明確なピーク相関が現れているが、点Cに関しては点Aや点Bほど高い相関値をもち、また空間的な変化も小さい。このことから組織乱流構造は左岸境界近傍で発生することが示唆される。そこで図-10に基準点Aにおける組織構造の輸送速度と流れの計測値を鉛直方向に対してプロ

ットした。組織構造の輸送速度は図-8の $\Delta t = 0$ および $0.3s$ における2時刻の相関ピーク間の距離から主流方向 U_c と横断方向 W_c の2成分について求めた。まず主流速については水面に近づくほど、流れおよび組織構造ともに増加し、両者には対応関係があることが理解できる。また流れの方が組織構造よりも速い。横断方向については主流速に比べて成分が小さいが、いずれの高さにおいても負値をもち蛇行流れによって組織構造も直流下しないことがわかる。

4. 結論

本研究では、蛇行複断面蛇行流れを対象に多断面PIV計測を行い、その水理特性と時空間相関特性を考察した。以下にここで得られた主な結果をまとめて示す。

- 1) 透明部材による高水敷を用いることで低水路内部の瞬間流速構造も可視化計測できた。
- 2) 複断面蛇行流れでは直下流と蛇行流の衝突や分離が顕著にみられ、特有の流速分布をもつことが確認できた。
- 3) 主流速分布の横断勾配の分布とレイノルズ応力分布は対応し、低水路と高水敷の境界付近では大きな乱れが発生することがわかった。
- 4) 時空間相関解析から、鉛直方向に大きな相関をもつ組織構造が低水路形状に沿って蛇行しながら輸送されることがわかった。

謝辞：本研究は服部報公会工学研究奨励援助のもとで遂行されたことを記し、これに感謝する。

参考文献

- 1) 福岡捷二・小俣篤・加村大輔・平生昭二：複断面蛇行流路における洪水流の水理，土木学会論文集，No.579/II-41，pp.83-92，1997。
- 2) 福岡捷二・高橋宏尚・加村大輔：複断面蛇行河道の洪水流に現れる複断面的蛇行流れと単断面的蛇行流れ—洪水航空写真を用いた分析，水工学論文集，第41巻，pp.971-976，1997。
- 3) Shiono, K., and Muto, Y.: Complex flow mechanisms in compound meandering channels with overbank flow, *J. Fluid Mech.*, vol.376, pp. 221-261, 1998.
- 4) 石垣泰輔・武藤祐則：複断面蛇行開水路流れの構造と底面せん断力分布について，水工学論文集，第42巻，pp.901-906，1998。
- 5) 渡邊明英・福岡捷二・坂本博紀：複断面蛇行水路における底面せん断力分布，水工学論文集，第48巻，pp.553-558，2004。
- 6) 禰津家久・山上路生・若元洋樹・土井智礼：低水路が蛇行した直線状高水敷流における乱流構造と水平渦に関する実験的研究，No.789/II-71，pp.37-46，2005。
- 7) 禰津家久・山上路生・神谷敦史：多断面スキニングPIVの開発と複断面開水路流れの3次元可視化計測，水工学論文集，第49巻，pp.541-546，2005。

(2005.9.30受付)