C 2 0 2

多断層スキニング PIV の開発と 蛇行複断面流れの 3 次元構造の解明

山上路生[○] (京都大学), 瀬津家久 (京都大学), Hoang Quang (京都大学), 土井智礼 (福知山市)

Development of Multi-layer Scanning PIV System and Experimental Study on 3-D Structure in Meandering Compound Open-channel Flow

Michio SANJOU, Ichisa NEZU, Hoang QUANG and Tomonori DOI

ABSTRACT

It is very important to reveal coherent horizontal vortices 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 sufficiently been applied to such flows, and thus, there is almost no detailed information on coherent turbulence in meandering compound open-channel flows.

Therefore, we conducted innovative flow-visualization measurements by using a multi-layer scanning PIV system, and analyzed instantaneous velocity vectors on horizontal planes at several different elevations simultaneously. As the results, the time-space correlations between the different elevations, the vortex-core motion and instantaneous velocity properties were revealed in the meandering compound open-channel flows.

Keywords: Multi-layer PIV, Meandering compound open-channel flow, Horizontal Vortex

1. 緒 論

低水路と高水敷から構成される複断面開水路流れには強いせん断不安定性に起因する周期的かつ組織的な水平渦が発生する。このような組織水平渦は流水抵抗や物質拡散を大きく支配するから既往の水理研究でも注目され様々な成果が得られている。しかしながら、それらのほとんどが直線水路を対象としたものである。実際の河川流には多くの湾曲・蛇行領域が存在するから、水平渦の蛇行挙動を解明することは蛇行河川における低水路と高水敷間の質量や運動量の交換特性や浮遊土砂輸送を予測する上で重要である。

そこで本研究ではレーザーシートをスキニング照射する多断層 PIV システムを用いて、直線から蛇行に遷移する複断面開水路流れを対象に、流れ場の 3 次元領域を同時に画像計測した。それらの結果から、時間平均流特性や乱流構造を考察するとともに高さの異なる層間の時空間相関特性や固有直交展開によるモード解析を行い、直線から蛇行への断面遷移領域での水平渦の挙動変化や蛇行複断面流れに特有のせん断組織渦の発生特性を実験的に明らかにした。

2. 実験方法と水理条件

実験水路と座標系を Fig.1 に示す。実験水路の全長は 10m, 全幅は $B=40\text{cm}$ であり総ガラス製である。この水路に湾曲させたアクリル BOX を設置して蛇行複断面水

路を作成した。蛇行部は 2 波長分設置した。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) s は従来の研究¹⁾を参考にして $s=1.09$ と 1.22 の 2 通りを採用した。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、アスペクト比 $B_m/D=2$ と設定した。また蛇行の半波長を L とすると、 $s=1.09$ および 1.22 についてそれぞれ $L=50$ および 25cm である。 H は水深で本実験ケースでは $H=5.8\text{cm}$ である。本研究では直線部で発達した水平渦の蛇行流入部における遷移過程と蛇行複断面流れに特有の組織渦構造、またこれらと横断面 2 次流との関連性を解明するために、2 つの蛇行領域のうち上流側に位置する 1 波長分を対象にして 3 次元の多断層スキニング PIV を試みた。なお計測領域は撮影サイズを考えてこの領域を全て計測できるように、Fig.1 に示した I~VI の 6 つの空間面を、水路上方に設置した高速 CCD カメラ (Dalsa, 500×500 ピクセル, フレームレート 250Hz) で撮影した。またそれぞれの撮影面サイズは $20\text{cm}\times 20\text{cm}$ 四方である。

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 軸である。直線部と蛇行部の境界位置に x 軸の原点を、低水路底面に 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。それぞれの座標軸に対応する瞬間流速成分を $\tilde{u}$, $\tilde{v}$ および $\tilde{w}$, 時間平均流速を U , V および W とし、乱れ成分を u , v および w とする。

Fig.2 は多断層 PIV システム²⁾とレーザーライトシート

Table 1 Hydraulic Condition

U_m (cm/s)	D (cm)	H (cm)	H/D	B (cm)	B_m (cm)	s
7.8	4.0	5.8	1.45	40	8.0	1.09
						1.22

Fig.1 Experimental flume and coordinate system

Fig.2 Multi-layer scanning PIV and projected laser light sheets

(LLS)の照射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2Wの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光線シート (LLS) をほぼ同時に照射できる。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。同一高さにセットした2つのアームを1組として LLS 上の瞬間ベクトルを PIV 法で算出する。本実験は3層同時計測のため合計6本のアームを 60° の等間隔でシャフトに取付けた。シャフトの回転数は10Hzとしたので、 $\tau=1/(10 \times 6)$ secの時刻差の2画像を PIV 解析した。

本実験では高水数 BOX の側壁を1mm厚の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、3層の LLS を同時照射した。この3層同時計測を Fig.2 (b) に示すようにパターン A~C の3通りの照射面の組み合わせで行った。パターン A は3層とも高水数上の計測、B は上中層が高水数上で下層は低水路内の計測、C は3層とも低水路内の計測である。

Table 1 に水理条件を示す。水理ケースは蛇行度を変えた2ケースとした。表中の U_m は直線部における断面平

Fig.3 Correlation distributions of spanwise velocity between the different elevations (X is the base point)

均主流速である。蛇行度以外の条件は一定とした。 $Re \equiv U_m H / \nu$ および $Fr \equiv U_m / \sqrt{gH}$ はそれぞれレイノルズ数およびフルード数である。

3. 結果の一例

Fig.3(a)および(b)は $s=1.22$ の $y/D=1.28$ に基準固定点を設定したときの層の $y/D=1.40$ との時空間相関関数 C_{wv} の分布をクロス部の領域 II と逆クロス部の領域 V について示したものである。時間遅れ τ のきざみ幅は0.3sとした。固定点位置は低水路センターライン上に設定し、その座標は領域 II については、 $(x_o/L, z_o/B_m) = (0.42, 1.22)$ で、領域 V については $(x_o/L, z_o/B_m) = (1.50, 1.37)$ である。領域 II では $\tau=0$ でピーク相関がみられる。これらは時間とともに低水路上を流下することがわかる。領域 V においても、 $\tau=0$ でピーク相関位置と固定点位置がほとんど一致しており、時間遅れとともにピーク相関領域が流下することから、鉛直方向に高い相関特性が存在し渦管構造を有することがわかる。またセンターラインの高相関領域は低水路形状の影響によって若干カーブする様子が観察される。これらの結果から流れの構造が複雑なクロス領域および逆クロス領域においても、自由水面近くの2層間の流速変動は大きな相関をもつことがわかった。

(謝辞) 関西大学・植村知正教授には計測装置の開発に関して貴重なご意見を頂いた。ここに謝意を表する。

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(1997)，pp. 83-92.
- 2) 柳津家久・山上路生・神谷敦史：多断面シートスキニング PIV の開発と3次元流体可視化計測に関する研究，応用力学論文集，Vol. 8(2005)，pp. 893-900.