PIV計測による連続かぶり蛇行流れにおける 組織乱流構造の実験的解明

COHERENT STRUCTURE IN CONTINOUS OVERBANK MEANDERING CHANNEL FLOW BY USING PIV MEASUREMENTS

山上路生¹, Hoang Quang², 禰津家久³ Michio Sanjou, Hoang Quang, and Iehisa Nezu

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(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂) ²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(〒615-8540京都市西京区京都大学桂) ³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(〒615-8540京都市西京区京都大学桂)

It is very important to reveal the coherent structure in meandering compound open-channel flows for predicting the transport properties of suspended sediments in rivers in flood. However, flow-visualization techniques such as PIV and PTV, have not sufficiently been applied to such flows in previous studies, and thus, there is almost no detailed information on coherent turbulence in meandering compound open-channel flows. Therefore, in this study, we conducted some PIV measurements with high-speed CMOS camera. As the results, the time-averaged velocity properties and coherent turbulence structure were investigated and discussed.

Key Words : meandering compound open-channel flows, turbulence, coherent motion and PIV measurements

1. はじめに

蛇行河川流は遠心力に起因する2次流によって局 所的な河床洗掘や土砂堆積がみられるため、その水 理構造は大変興味深い.また洪水時の高水敷かぶり 流がみられる複断面蛇行流れは、単断面蛇行流れと 比較して2次流の回転方向が逆になるなど、流れ特 性が大きく異なるため、水防災工学においてもその 水理乱流特性の解明は重要な課題の一つである.

複断面蛇行流れの研究は水理計測を中心にいくつ かの研究グループによって行われてきた.例えば, Sellinら(1993)¹⁾は複断面蛇行開水路流れにおいて, 河床粗度,低水路の曲がり角および流量などの水理 条件の変化が,平均流速分布や水位分布に与える影 響を調べた.武藤・塩野ら(1995)²⁾およびShiono & Muto(1998)³⁾はレーザー流速計(LDA)を用いた乱流 計測を行った.彼らは単断面および複断面における2 次流分布の比較,2次流セルの流下方向の発達特性, かぶり水深の変化が乱流構造や運動量交換特性にお よぼす影響について考察した.

一方で,福岡・大串(1997)⁴は実河川を想定した高 水敷粗度をもつ大型実験水路を用いて,電磁流速計 による流速計測を行った.彼らは時間平均量の特性 を中心にかぶり水深と流速分布の関係性,2次流セ ルの空間的な発達・減衰プロセスなどを明らかにし た.特に2次流構造が高水敷高さと低水路幅のスケ ール比や高水敷粗度に依存することを指摘している. また土砂輸送や河床洗掘を支配する底面せん断力特 性の研究も進んでおり,LDA計測による底面せん断 力の評価報告もされている⁵⁾.最近,著者ら⁶⁰のグル ープは複断面開水路流れにおける直線部から蛇行部 への遷移領域に注目して,直線部で発達した水平渦 の蛇行遷移特性を可視化計測によって考察した.

しかしながら連続蛇行部を有する複断面開水路流 れにおける組織的な乱流構造については国内外にお いてほとんど解明が進んでいないのが現状である. 組織的な乱流構造は,2次流と連動して低水路内部 と高水敷領域の運動量や物質交換に大きな影響をも つものと考えられる.特に洪水河川において低水路 内部から河川敷上への土砂輸送と堆積過程は組織乱 流渦による影響が大きいと思われる.そこで本研究 では高速度カメラによるPIVシステムによって,連続 複断面蛇行流れの低水路内部から水面までの全水深 領域を対象にした可視化乱流計測を行い,その基礎 水理特性や組織構造の解明を試みる.

2. 実験装置と計測方法

(1)実験水路と座標系

図-1(a)および(b)に計測装置および実験水路を示





図-1(a) PIV計測装置



す.実験は全長10m,全幅 B =40cmの可変勾配型総ガ ラス製の水路で行われた.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.水 路上流端から波長50cmの蛇行模型を合計10波長分 設置した.低水路形状はサインカーブであり,蛇行 度s (=蛇行長さ/波長)は1.22とした.低水路幅 B_m は8cmであり,高水敷高さDは半値の4cmとした. 水路側方から2Wの連続YAGレーザーライトシート (LLS)を照射し,水路上方に設置した高速度CMOSカ メラで撮影した.

計測対象は上流から8番目に位置する蛇行領域の 上流側の半波長領域とした(図-1(b)).計測領域は 40cm×40cmの長方形領域である.計測部の蛇行模型 の側壁は透明アクリル部材で制作し,低水路内部に も十分なLLSが照射できるように工夫した.これに より低水路内部も含めた全水深領域における水平面 のPIV計測が可能となった.また図に示すように,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.計測領域の上流側に対応する



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瞬間流速を \tilde{u} , \tilde{v} およ び \tilde{w} ,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.

(2)高速度PIVシステム

高速度カメラと連続レーザー光源を用いたシンプ ルな高速度PIVでは、データのサンプリング時間間隔 $\Delta t \ge PIV$ の相関解析に用いる2画像間の時刻差 $\Delta \delta$ が同値になる.したがってカメラのフレームレート が上がれば同時にサンプリング間隔 Δt が細かくな るが、高速流を比較的長いサンプリング時間で計測 する場合には膨大なメモリ容量が必要となる.一方 でダブルパルスレーザー型のPIVでは $\Delta t \ge \Delta \delta$ は独 立して設定できる. Δt はLLSの繰り返し発生周波数 となるが、レーザー光源のエネルギーチャージに要 する時間制約のために、 $\Delta t = 1/30 \sim 1/15(s)$ のものが一 般的である.

そこで本研究では、パルスジェネレータと高速度 CMOSカメラを組み合わせて、 $\Delta\delta$ と Δt の独立制御 が可能で、Δtの設定自由度がダブルパルスPIVより も大きな高速度PIVシステムを構築した. 図-1(a)に 示した高速度CMOSカメラDitect製のタイプHAS-500 (1K×1Kのフル解像度で500Hzのフレームレート設 定が可能)を用いた.カメラには4GBの専用メモリ が搭載されている.これを高速PCで制御する.この 制御PCにはパルスジェネレータ(Kenwood製)が接 続されている. パルスジェネレータからは設定サン プリングレート(1/Δt Hz)のトリガー信号がPCを 介してカメラに送られ、カメラの設定フレームレー ト $(1/\Delta\delta \text{ Hz})$ で2枚の画像が撮影される(図-2). また一度のトリガー毎の連続撮影コマ数も自由に設 定でき、4時刻PTVなどの高速度計測も可能である. 本実験ではフレームレートは500Hz, サンプリング レートは30Hzに設定した.

(3)水理条件

表-1は水理条件を示す.本実験では1ケースの流 れを対象に,低水路内部も含む合計11の水平面を可 視化計測した.図中のUmは蛇行頂点部における断面 平均主流速,Hは低水路底面までの水深,yLはLLS の照射高さである.水路上方からの撮影のために本



(時間平均主流速の横断方向分布の比較)

実験ケースは水面波が生じない水理条件とした.直線の片側複断面流れではかぶり水深がH/D < 1.5の条件で単列の水平組織渦が発生することがわかっており⁷,本研究でもそれを参考に水深を決定した.

3. 実験結果と考察

PIVの精度検証

計測結果の考察の前に本高速度PIVシステムの検 証を行う.比較データはレーザー流速計(LDA)によ るものを用いる.図-3は高水敷上高さのy/D=1.25の時間平均主流速Uの横断方向分布である.主流方 向位置は2ヶ所の蛇行頂点を含むx/L=0,0.5およ び1.0を選定した.PIVおよびLDAともに類似した分 布の凹凸傾向をもち,定量的によく一致している. またx/L=0と1.0のデータは横断方向に反転させる とよく一致することから,上流側の蛇行頂点と下流 側の蛇行頂点のU(z)はほぼ同一の分布であること が確認できた.したがって本PIVおよび連続蛇行流の 実験水路の精度については大きな問題はないといえ る.

(2) 時間平均流速の水平面分布

図-4はy/D=1.25における時間平均流速U, W および時間平均渦度 $\Omega \equiv \partial U / \partial z - \partial W / \partial x$ の水平面コンターを示す.

Uについては高水敷上に高速分布がみられるが, これは低水路領域に比べて形状抵抗が小さいためで ある.また蛇行低水路流と直進高水敷流のクロス部



図-4 時間平均流速と渦度の水平面コンター

(x/L=0.5)において低水路領域は低速域となり,蛇行形状の影響が現れることがわかる.

低水路領域のWについては蛇行の形状変化に対応して上流側 (0 < x/L < 0.5)で負,下流側 (0 < x/L < 0.5)で負,下流側 (0.5 < x/L < 1.0)で正となる.注目すべき点はクロス部 (x/L = 0.5)で正負の分布が観察されることである.本結果からこの領域では流れが低水路形状に沿うものと右岸高水敷に乗り上げるものに分岐することがわかる.

また頂点部からクロス領域の右岸境界ライン付近 で正値の高渦度分布がみられる.この流速せん断に より後述する反時計周りの水平組織渦の生成が促進 されるものと思われる.

(3) 横断面の2次流分布

本実験における各水平面のPIVは同時計測ではないが,時間平均流速に関しては式(1)の連続式から鉛 直流速成分Vが評価できる.

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

図-5は水面 y = H でV = 0 との境界条件で、式(1)よ り求めた時間平均 2 次流成分(V,W)の横断面ベクト ルを流下方向位置ごとに示したものである.表示断 面位置は x/L = 0,0.25,0.5および0.75の4つを選定し



図-5 2次流ベクトル(V,W)

た.頂点部のx/L=0では低水路内部に反時計周り の2次流セルが観察される.この渦はかぶり高水敷 と低水内流れの流速せん断によって生じるもので蛇 行複断面流れ特有の渦^{3),4)}である.また蛇行頂点部の x/L=0において低水路の底面では既往研究^{3),4)}と同 様にカーブの内側 $(z/B_m=3)$ で主流速の高速分布が みられたが、これは2次流によって水面側から低水 路内部に運動量が輸送されるためである.さらにク ロス領域のx/L=0.25および0.50では湾曲形状の向 きが反転する影響で、明確な渦は観察されないが、 下流側のx/L=0.75ではx/L=0とは逆回転の時計 周りの渦が発生することがわかる.運動量輸送や河 床洗掘において重要な役割をもつ2次流セルを近接 水平面のPIV計測から評価できたことは今後の研究 進展につながると見られる.

(4) 平均流速の鉛直分布の流下方向変化

図-6は低水路のセンターラインにおける時間平均 流速の全3成分(U,V,W)の鉛直分布に注目してそ れらの流下方向の変化を示したものである.上流側 頂点部(x/L=0)では主流速Uは単調変化ではなく



図-6 平均流速分布の流下方向変化

底面近傍のv/D=0.25でピークをもつ. 一方, Wも y/D = 0.25 で正のピークをもつことから, 蛇行カー ブの内岸側(z/B_m=3)の高速流体が低水路中央部 (z/B_m = 3.5)に向かって輸送されるために底面付近 にUのピークが現れるものと推測される. x/L=0.25では底面付近のUのピークがさらに顕著 となり,底面近傍のWは湾曲の向きの変化によって 正から負に遷移する. x/L=0.5ではUの分布は2次 流の影響をほとんど受けず,底面付近の2次的なピ ークは観察されない. W は全水深領域で負値となり, x/L=0の分布と大きく異なる. 下流頂点付近の x/L=0.75では右岸境界側の高速流体が負の横断流 速(W < 0)によって輸送され, y/D=0.25付近にU ピークが現れる. またVに関してはx/L=0の頂点 部にくらべて x/L=0.25~0.75のクロス領域で下降 流(V < 0)の影響が大きく, overbank層(y/D>1)の運 動量がinbank層 (y/D < 1) へ輸送されることがわかる.

(5) スペクトル解析による組織構造の予測

前節までは時間平均流速成分に注目して基礎水理 特性について考察して既往の研究結果と対応するこ とを確認した.本節では連続かぶり蛇行流のスペク



図-7 連続かぶり蛇行流におけるスペクトル特性(y/D=1.25)

トル特性について考察する.図-7はスペクトル解析 を行う計測点位置とそれらの点における ŵに関する スペクトルを示したものである.計測点高さはいず れも y/D=1.25 である.点al~a3は上流側の蛇行頂 点付近,点b1~b3はクロス部付近,点c1は下流側の 蛇行頂点にそれぞれ位置する.低水路センターライ ン上に位置する点a2,b2およびc1には1Hz以下の卓 越周波数がみられる.したがってこれらの位置では 周期的な組織変動が存在することが推察される.こ の低周波の組織変動を抽出するために次節でウェー ブレット解析を適用する.

(6) ウェーブレットを用いた低周波変動解析

ウェーブレット解析⁸⁾では時系列の計測データを 周波数帯ごとに分離できる.ウェーブレット解析の 詳細は参考書に譲るが,スペクトル解析と異なり, 時間情報が失われずに周波数分離できる点が大きな 長所である.このため水理分野でも乱流の瞬間構造 の評価によく用いられる⁹⁾.本研究ではマザーウェー ブレットにDaubechies-12を使用して1.9Hz以下の流 速変動 \tilde{u}_l および \tilde{w}_l を抽出した.抽出した低周波信号 を用いてレイノルズ応力とスキューネスの水平面分 布を評価し,組織構造の発生特性を考察する.

図-8は低周波変動のレイノルズ応力 $-u_{lwl}/U_{m}^{2}$ のy/D=1.25における水平面分布を示す.x/L=0.4付近のクロス領域の右岸境界ラインを境に正負の卓越領域が観察される.正値分布域においては反時計回りの,負値分布域においては時計回りの渦がそれぞれ発生することがわかる.これらの渦構造は流速シアによって発生するものと考えられるが,直線複断面水路で観察される水平渦とは異なり,流下方向への持続性が小さく,発生・移流・消滅のサイクルが局所的に存在する.

図 -9_は 横 断 流 速 \tilde{w}_l の ス キ ュ ー ネ ス $Skw \equiv w_l^3 / w_l'^2$ の y/D = 0.75 および1.25における水 平面分布を示す. ここで w_l' は乱れ強度である.双 方の高さにおいて $x/L = 0.2 \sim 0.5$ のクロス領域の低 水路センターライン付近を中心に大きなスキューネ スの分布が観察される.本結果からもこの領域では ランダム変動とは異なる組織的な変動の存在が認め られる. さらに y/D=1.25 の overbank 層 $e^{y/D}=0.75$ のinbank層における分布は類似傾向がみられるが, y/D=0.75 の分布はやや左岸境界側にシフトしている. これは図-5で考察した2次流により, overbank層においてせん断不安定によって発生した組織変動が低水路内部の左岸境界側に輸送されることに対応する.

次に組織渦が存在する領域において時空間相関解 析を行いその移流特性を考察する.ここでは式(2)で 定義される横断流速に関する時空間相関関数*C_{ww}を* 考える.

$$C_{ww} = \frac{w(x_0, z_0, t_0)w(x_0 + \Delta x, z_0 + \Delta z, t_0 + \tau)}{w'(x_0, z_0, t_0)w'(x_0 + \Delta x, z_0 + \Delta z, t_0 + \tau)}$$
(2)

ここで, (x_0, z_0, t_0) はある時刻 t_0 における固定点の 座標, $(x_0 + \Delta x, z_0 + \Delta z, t_0 + \tau)$ は遅れ時間 τ における 移動点の座標, Δx および Δz は遅れ距離を表す.

図-10は、図-8で示したレイノルズ応力の分布において、正値のピーク位置を固定基準点とした時空間 相関関数のコンターを $\tau=0$ および0.33sについて示したものである. C_{ww} のピーク位置は時間経過とと もに流下方向に輸送される. これは図-8で考察した 反時計回りの水平渦の輸送を意味しており、水平渦 は横断流速の影響を受けて直流下せずに、蛇行形状 に沿うように移流することがわかる.

(7) 蛇行流の組織渦モデル

以上の結果から得られる連続かぶり蛇行流におけ る組織構造の現象モデルを図-11に示す.直線複断面 流れと同様に流速シアーによるせん断不安定渦が頂 点部からクロス領域を中心に現れる.またクロス領 域の流れの分岐によってこれらの渦構造は逆回転の 渦対となる.流速シアーの分布は流下方向に変化す るために,これらの組織水平渦は局所的に発生する とともに移流・消滅のライフサイクルをもつ.頂点 の外岸側では2次流によって低水路底部の土砂など のスカラー物質が水面側に巻き上げられ,その一部 が高水敷上の直流下流によって高水敷領域に輸送さ れることが予想されるが,その輸送特性や堆積特性 は組織渦と強い関係があると思われる.今後は固液 混相条件での実験を試み,この点を明らかにしたい.



図-8 レイノルズ応力の水平面分布



図-9 スキューネスの水平面分布

4. 結論

本研究は連続かぶり蛇行流を対象に高速度PIV計 測を行い、その基礎水理特性と組織乱流構造の実験 的解明を試みたものである.以下に主要な結果を箇 条書きにしてまとめる.

- 時間平均流分布を各高さで整理して既往研究と 対応する結果を得た.また連続式によって鉛直 流速成分を評価して2次流ベクトルの流下方向 変化を明らかにした.
- スペクトル解析から組織変動による卓越周波数 の存在を明らかにした.
- 低周波の組織変動をウェーブレット解析によって抽出して、そのレイノルズ応力やスキューネス分布を解明した.
- 4) かぶり蛇行流には、頂点部からクロス部にかけて逆回転の2種類の水平組織渦が発生し、流下とともに消滅することがわかった。

参考文献

- Sellin, H.J., Ervine, D.A. and Willetts, B.B:Behavior of meandering two-stage channels, Proc. Institution of Civil Engineers, Vol.101, pp. 99-101, 1993.
- 武藤裕則・塩野耕二・今本博健・石垣泰輔: 複断面蛇 行開水路流れの水理特性について,京都大学防災研





究所年報, 第38号B-2, pp.561-580, 1995.

- 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) 福岡捷二・大串弘哉・ 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.
- 5) 渡邊明英・福岡捷二・坂本博紀: 複断面蛇行水路にお ける底面せん断応力分布,水工学論文集,第48巻, pp.553-558, 2004.
- 6) 山上路生・禰津家久・土井智礼・Hoang Quang:多断 層スキャニング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,水工学論文集,第50 巻, pp.661-666, 2006.
- 7) 禰津家久・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.
- 新誠一・中野和司:図説ウェーブレット変換ハンドブ ック,朝倉書店,2005.
- 宮本仁志・神田徹・大江和正・下山顕治:水面・流速の同時画像計測法の開発と水面変動を伴う開水路凹部流れの解析,土木学会論文集,No.726/II-62, pp.41-53, 2003.

(2006.9.30受付)

謝辞:本研究は前田記念工学振興財団の研究助成により行われた.ここに謝意を表する.