

**PIVによる複断面開水路に発生する
周期渦の瞬間像の測定**
**Measurements of the instantenuous structures
of periodical vortices in a compound open-channel
by Particle-Image Velocimetry**

池田駿介* 戸田祐嗣** 空閑健**

By Syunsuke IKEDA, Yuji TODA and Takeshi KUGA

Instantenuous structures of periodical vortex in compound open-channel are obtained by using Particle-Image Velocimetry and Mass Consistent model. Positions of ascending and descending currents and structures of cross section in this flow are observed. Moreover, we examined the performance of the systems of Particle-Image Velocimetry and Mass Consistent model employed herein.

Keywords: compound open-channel flow, instantenuous structures of periodical vortices, Particle-Image Velocimetry, Mass Consistent model

1. はじめに

わが国における代表的な河川の多くは、中・下流域において横断面を複断面形状としているものが多く、河川環境の重要性が強く認識されるようになった現在、その水理特性を解析するニーズが高まっている。複断面開水路はその幾何学的形状が複雑であり、低水路と高水敷の両者の間で流れの相互干渉を起こして特有の流れ場を作り出すことが知られておりその流れに関する研究が精力的に行われている。

複断面開水路流れにおいては低水路と高水敷で水深が異なり、それにより横断方向に抵抗が変化するため大きな平均流速差が生じる。この流速差より低水路・高水敷の境界部（以下、単に境界部と記す）で大規模な周期渦が発生し、水平混合現象に大きな影響を与えることが知られている。例えば、福岡・藤田¹⁾は室内実験により境界部に発生する周期渦の可視化実験を行い、今本・石垣²⁾は、斜昇流と呼ばれる流下方向に軸を持つ水深スケールの2次流セルが発生することを室内実験から見出した。また木下ら³⁾は、湾曲水路ではあるが複断面形状を有する実河川において洪水時に現地観測を行い、航空写真を画像解析して得られる流速場のデータから実河川においても大規模渦が発生することを見出し、周期渦内部には強い上昇流、外縁部には下降流が存在しこれらの3次元性が土砂輸送と密接に関係していることを指摘している。同じく湾曲水路の

* 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

** 学生会員 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻

(〒152 東京都目黒区大岡山2丁目12-1)

実験として宇民・上野⁴⁾は画像解析による2次元瞬間データから、低水路側壁面に発達する剥離せん断渦と流れの上層部にあるせん断渦が結合して大規模な渦列が形成することを示唆した。また、池田ら⁵⁾は条件付抽出アンサンブル平均法により周期渦の3次元平均構造を捕え、周期渦の水平運動に伴って起こる流体の3次元的挙動を示し、周期渦内部の上昇流・下降流の構造の詳細を空間的に明らかにした。

以上のように、複断面開水路に発生する周期渦は境界部の運動量輸送や、乱流拡散への影響のみでなく、2次流や土砂輸送問題といった水工学的な問題とも密接に関連していると考えられ、複断面流れ場全般の特性を把握する上で、周期渦の構造を明らかにする必要がある。

そこで本論文では、これらの周期渦の構造に着目し画像解析による室内実験で瞬間構造を調べるとともに、同じ水理条件の下で得られた条件付抽出アンサンブル平均法による平均構造との比較を行い、個々の渦の構造・特性について調べる。

2. 瞬間構造の測定

2-1. 実験概要

本実験ではビデオ撮影によるPIV⁶⁾とMASCONモデル^{6)、7)}を用いたデータ処理により瞬間構造の測定を行った。複断面開水路にトレーサー粒子を投入し、高さの異なる3つの水平面に1/15秒の時間間隔でスリット光を照らし、それぞれの断面の粒子群の動きをビデオカメラで撮影した。得られた画像データをPIVにより2次元解析し、3つの断面の2次元データを用いMASCONモデルより3次元瞬間像を求めた。

2-2. 実験方法

図-1に水路横断面で見た実験状況図と座標系を示す。実験には東京工業大学水工学実験室の長さ14.0m、幅40.0cmの循環式可変勾配直線水路を用いた。高水敷は長さ10mにわたって、厚さ4cm、幅4cmの断面をもつアクリル板2本を足とし、その上に厚さ1cmで幅16cmのアルミ板を乗せて作成した。従って、高水敷の高さはすべて5cmである。なお、整流のため高水敷の上下流端には2次元的なベルマウス型の整流部をとりつけ、高水敷下には流水が通過しないようになっている。以上のように設置された複断面水路に水深6cm、河床勾配1/700の等流状態の流れをつくり、周期渦が十分に発達し、かつ下流端の影響を受けないよう高水敷設置開始点より7.5mの地点で測定を行った。トレーサー粒子として粒径約1.0mmの白色のポリスチレン・ビーズを煮沸処理することにより比重調節(比重1.04)したものを用い、開水路上流端から投入した。図-2に示すように、3つの水平面をステッピングモーターに取り付けた鏡で1/15秒毎に切り替えながら、開水路上方からビデオカメラで連続撮影した。撮影は図の上から下に向かって(断面1、2、3)行い、1断面につき1/30秒の時間差をもつフレーム画像を2枚取り出し、512×512画素、256階調の分解能を持つ画像処理装置(DITECT製)によってデジタル化した。

2-3. データ処理方法

得られた画像データにフィルター処理を行い、同一の断面において連続して得られた2枚の画像から平面相関法により瞬間2次元流速ベクトルを求め

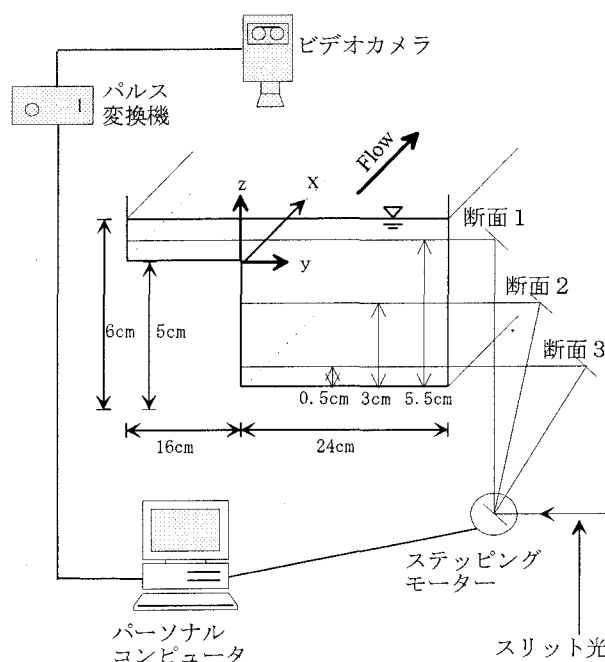


図-1 実験状況図及び座標系

た。平面相関法の基本的な考え方は、時刻 $t=t_0$ の画像中に検出対象とする部分画像（テンプレート）を設定し、時刻 $t=t_1$ の画像中の各部分画像のうちこれと最も類似度（相関値）の高い位置を検索するというものである。こうして得られた速度は想定した領域のトレーサー群の平均速度であると考えられるので、テンプレートの大きさ n を大きくすると相関解析の信頼性が向上する反面空間的分解能が低下する。本実験ではテンプレートは 19×19 画素、検索は 9×25 画素の範囲で行った。トレーサーの分布密度が低いなどの理由により、相関値の低い領域が生じることがある、ここでは0.6以上の相関値が得られない場合には欠測扱いとした。こうして求めた流速ベクトルから周囲と著しく異なるものを除去し、欠落しているデータを、既に得られているデータから距離の逆数の重み付けによって内挿する。

得られた3つの水平面における2次元流速ベクトルデータは断面間に1/15秒の時間差がある。ここで流速の変動が平面渦の移流速度によって運ばれていると考え、各段面の時間的差異を渦の移流速度を用いて空間的差異に変換し、格子点上にデータを得るためにスプライン補間を用い補間した。その際、断面間の遠近差によるスケールの差異も考慮しすべての断面間でのスケールの差異を取り除くように補間した。次に横断面内のデータを仮想荷重法⁷⁾により補間する。相関解析により直接求められるのは流速の2成分(u, v)のみであるから、ここではMASCONモデルにより3次元成分(w)を推定する。MASCONモデルは、mass consistentな場を表すモデルという意味であり、仮想荷重法で得られた u_0, v_0 から連続式を満たすように、付帯条件付き変分法によって w 成分を含めて流れ場を調整する方法である。これはSasakiによって提案された方法で、連続式を付帯条件として

$$\alpha_1^2(u-u_0)^2 + \alpha_1^2(v-v_0)^2 + \alpha_2^2(w-w_0)^2$$

を最小とするように u, v, w を決定しようとするものである。ここで u_0, v_0 は仮想荷重法で求めた粗い推定値で、本実験では w_0 成分は測定していないので、0とする。また α_1, α_2 は重みで、画像解析より得られる x, y 方向には $\alpha_1=3$ とし、 z 方向には $\alpha_2=1$ とした。Lagrange乗数 λ を導入すれば、問題は次式の汎関数 F の極小値を求めることに帰着する。

$$F = \int_V \left[\alpha_1^2(u-u_0)^2 + \alpha_1^2(v-v_0)^2 + \alpha_2^2(w-w_0)^2 + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] dV \quad (1)$$

式(1)の第一変分を0とするよう u, v, w を決定する。

以上の解析により複断面開水路に発生する周期渦の3次元瞬間流速ベクトルを得た。

3. 実験結果

図-2に渦の移流速度で動く移動座標系から見た水表面付近($z=0.7\text{cm}$)の瞬間流速ベクトル図を示す($\times$ はほぼ渦中心を示す)。図-3には同じ水理条件の下に得られた条件付抽出アンサンブル平均法による周期渦の平均像の流速ベクトル図(池田ら⁵⁾)を示す。両者ともに境界部付近よりやや低水路よりを中心として、流下方向に向かって高水敷側に前傾した渦が得られていることがわかる。また瞬間像には低水路内に多数の乱れが見られるが平均像にはほとんど現れていない。これは、条件付抽出アンサンブル平均法は十数個の渦の平均像であるため、周期渦に伴って起こる組織的な乱れの構造を示すが周期渦と無関係な乱れは平均化されることにより流速ベクトルデータに現れてこないためである。したがって、瞬間像で見られる低水路内の多くの乱れは、周期渦に伴う組織的なものではないことがわかる。以上のことより複断面開水路における水表面付近の流れは周期渦に伴った組織的な運動と、周期渦と無関係な乱れが混在していることがわかる。

図-4(a)、(b)はそれぞれ(a)水表面付近($z=0.7\text{cm}$)、(b)低水路底面付近($z=-4.5\text{cm}$)における2次元発散($\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$)のコンター図である。(a)の発散データに関して水表面での流速の鉛直成分が0であることを考慮すると発散が正の領域では上昇流、負の領域では下降流が生じている。周期渦の中心付近に上昇流が生じている。また周期渦の高水敷側の外縁付近には下降流が生じている。このことより周期渦に伴う水表面付近の流況を考察すると、周期渦中心より下流側の境界部において低水路内から流入した流体は高水敷上で減速し、

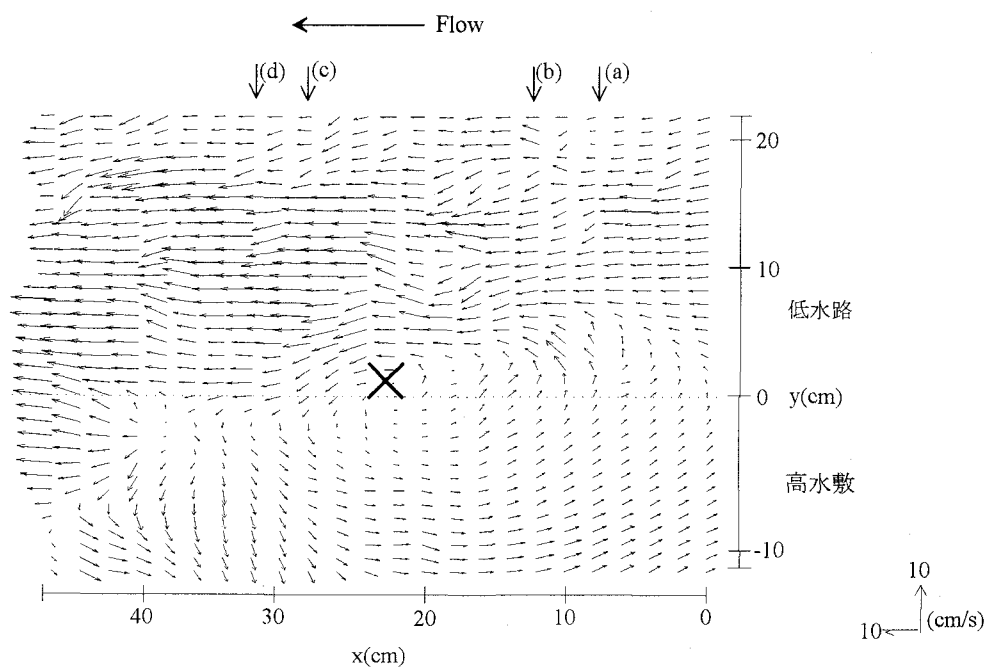


図-2 周期渦の移流速度で動く移動座標系から見た水表面付近の瞬間流速ベクトル ($z=0.7\text{cm}$)

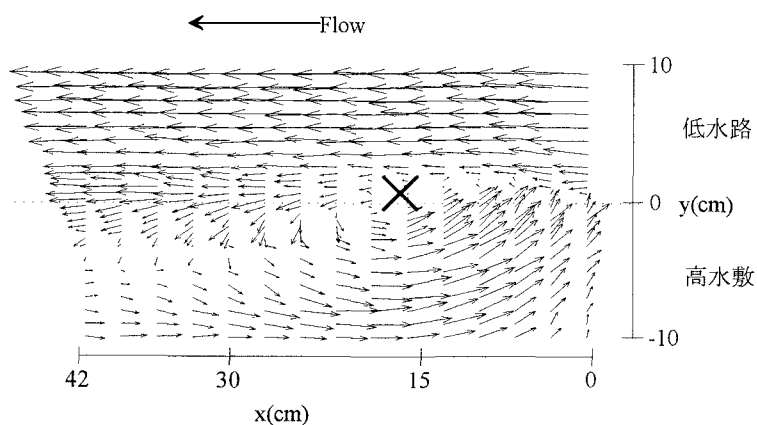


図-3 境界部の流速で動く移動座標系から見た水表面付近の流速ベクトル (条件付抽出アンサンブル平均法) ($z=0.7\text{cm}$)

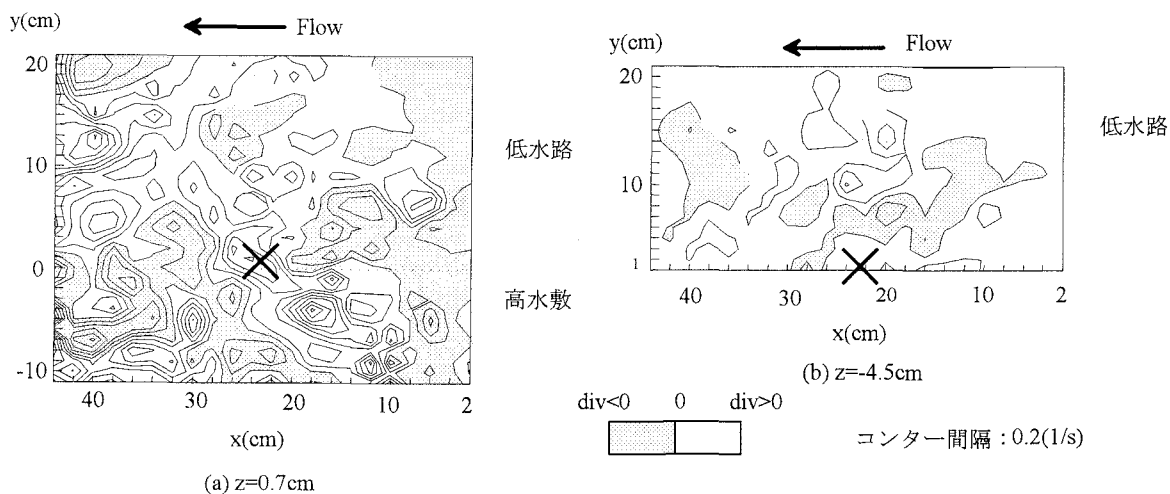
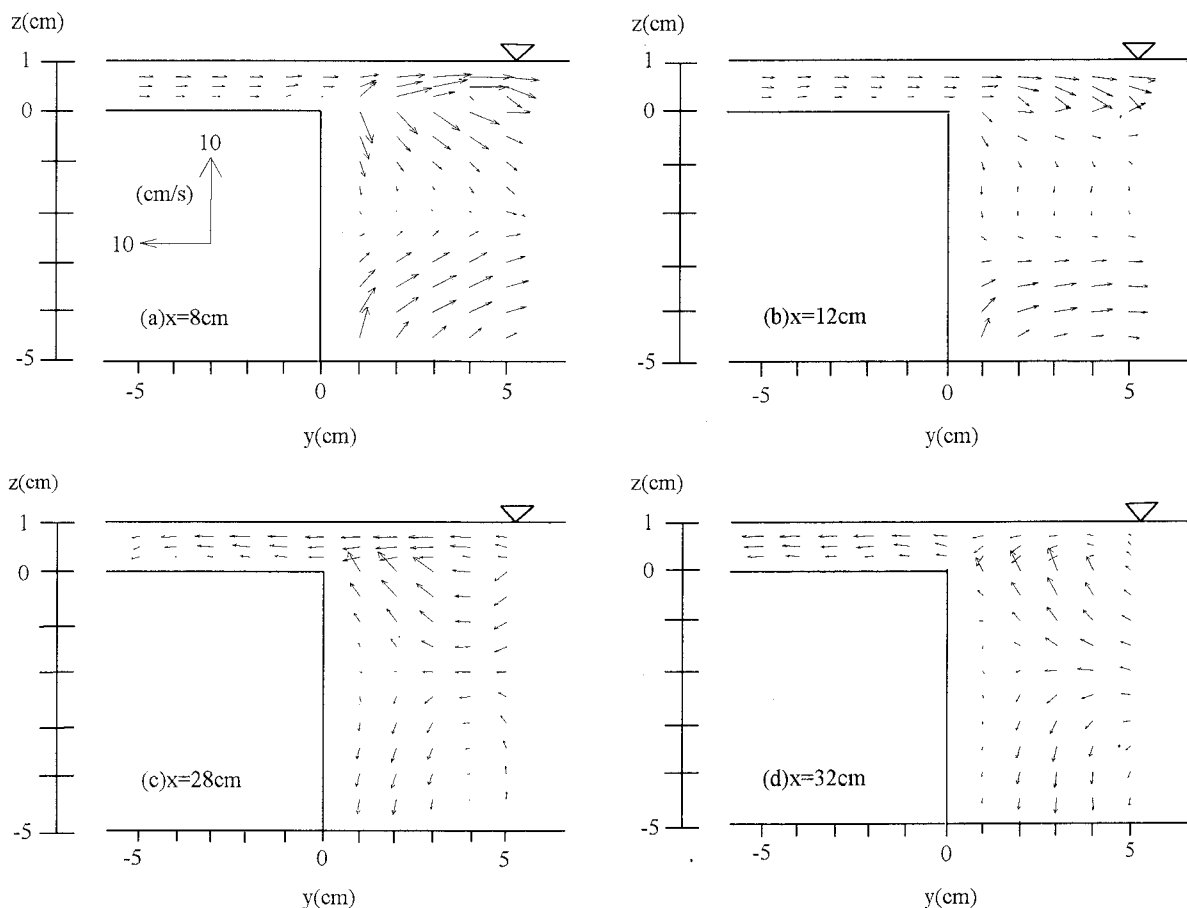


図-4 2次元発散のコンター図



図一 5 各横断面での流速ベクトル図(a)x=8cm, (b)x=12cm, (c)x=28cm, (d)x=32cm

その外縁部には下降流を伴って流れ、周期渦の中心より上流側の境界部付近の下降流によって低水路内に戻ると考えられる。また低水路内には周期渦と無関係な乱れによる上昇流・下降流が起こっている。(b)の発散データに関して低水路床での流速が0であることを考慮すると、発散が負の領域では上昇流が、正の領域では下降流が生じている。水表面付近の渦の中心より上流側の低水路中心よりに弱い上昇流が見られる。

図一 5 (a)、(b)、(c)、(d)は周期渦の各位置での横断面における流況で流下方向各横断面で異なるパターンをとることが示されている。周期渦の中心より下流側（図中(c)、(d)）の境界部付近では上昇流が、上流側（図中(a)、(b)）では下降流が生じていることがわかる。これは池田ら⁵⁾により報告された同じ水理条件の下での周期渦の横断面内の流況で指摘されている。よってMASCONモデルによる推定で周期渦に伴う流況の大まかな構造は捉えることができたと考えられる。しかし、 w 成分は断面間隔2.5cmの3つの水平面から得られた2次元データ（ u 、 v ）から求めたものであるため流れの詳細に関して議論できない。流れの詳細を捉えるためには密に断面間隔をとり、空間解像度、時間分解能の向上に努めることが必要であろう。

4. 実験方法に関する考察

本実験ではビデオカメラによるPIVと仮想荷重法及びMASCONモデルによる流況の推定を行った。PIVにより求めたデータは瞬間の流速値であるために精度を検討することが難しいが、多数の周期渦の瞬間像の平均

像と、同じ条件のもとで得られた条件付抽出アンサンブル平均法との比較を行うなどして測定法の精度を検討していかなければならない。また、ハードウェア（映像の空間解像度、時間分解能など）的な制約の多い測定法であるために、それらの機器の性能の向上に期待したい。また、PIVからMASCONモデルを用いて精度よく流れの詳細を捉えるためにより強力なスリット光（レーザー光など）や、振動減衰の速いステッピング・モーターを使用することにより断面間隔の縮小を行う必要がある。

5. 結論

本研究は複断面開水路に発生する周期渦の瞬間構造を室内実験によるPIVとMASCONモデルを用いて測定し、その特性を考察したものである。実験対象となった周期渦に対して得られた主たる結果として以下のようことがあげられる。

1) 複断面開水路に発生する周期渦に伴って起こる水平面内での上昇流・下降流の相対的な位置関係を調べた結果、水表面付近では周期渦の中心付近で上昇流が、高水敷上の周期渦外縁付近では下降流が発生していることが示された。

2) 本実験条件の下では境界部や高水敷上において周期渦に伴う組織的な運動が支配的であるが、低水路内には周期渦に伴わない乱れが起こり、それらの混在している流れ場であることが示された。

3) 周期渦は3次元的な構造を有し、流下方向各横断面内の流況は周期渦に対する位置に関係して異なったパターンをとることが示された。今後、それらの詳細を捉えていく必要がある。

参考文献

- 1) 福岡捷二、藤田光一：複断面河道の抵抗予想と河道計画への応用、土木学会論文集、429号、pp.27-36、1991.
- 2) 今本博健、石垣泰輔：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研究、土木学会水工学論文集、第36巻、pp.139-144、1992.
- 3) 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.
- 4) 宇民正、上野鉄男：洪水時に河岸に発生する巨大渦について、第21回乱流シンポジウム講演論文集、pp.38-43、1986.
- 5) 池田駿介、村山宣義、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、509号、pp.131-142、1995.
- 6) 池田駿介、金沢稔：可撓性を有する沈水性植生内外の流れ及び植生境界で発生する組織渦の3次元構造について、土木学会水工学論文集、第38巻、pp.345-350、1994.
- 7) 日野幹雄、孟岩、村山雅昭：疎らな流速計測データから非定常流れ場全体の瞬間像を推定する試み、東京工業大学土木工学科研究報告、No.41、1989.