

複断面開水路流の直線から蛇行への遷移領域における組織水平渦に関する計算力学的研究

LARGE EDDY SIMULATION ON COHERENT HORIZONTAL VORTICES IN TRANSITION REGION BETWEEN STRAIGHT AND MEANDERING FLOODPLAIN FLOWS

山上路生¹, 禰津家久²
Michio Sanjou 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(〒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)

Coherent horizontal vortices are often observed in compound open-channel flows. The hydrodynamic properties of horizontal eddies were intensively studied by a lot of researchers, because these eddies have significant relations with momentum exchanges between a main-channel and floodplains. However, there is almost no detailed information about the meandering properties of the horizontal eddies developed in a straight open-channel.

Therefore, in the present study, a large eddy simulation was conducted in the transition region between the straight and meandering floodplain flows. As the results, coherent eddy structure and correlation properties were investigated numerically in such a complex open-channel flow.

Key Words : compound meandering open-channel, coherent horizontal vortex, LES

1. はじめに

一般に自然河川は直線部と湾曲部が複合しており, 流れの構造が流下方向に大きく変化する. これまでも湾曲流や蛇行流に関する研究は数多く発表されているが, 蛇行低水路と直線状高水敷から構成される蛇行複断面開水路流れの水理特性に関する研究成果も報告されている.

例えば, Shiono & Muto(1998)¹⁾はレーザー流速計(LDA)を用いて複断面蛇行流れにおける乱流計測を行っている. また福岡ら(1999)²⁾は複断面蛇行流れにおける土砂輸送に注目して河床変動特性を実験的に解明している. さらに, 著者ら(2005)³⁾は直線から蛇行に遷移する複断面蛇行流を電磁流速計(EMV)で3成分計測するとともに画像解析を適用して, 断面遷移領域の水理構造を明らかにしている.

一方で数値解析的なアプローチも試みられている. 福岡・渡辺(1998)⁴⁾は, 一般座標系で記述された基礎方程式をスペクトル法で解析する3次元数値モデルを開発し, 洪水蛇行流れの平面流速分布, 2次流分布および水位と流量の関係等を再現している. しかしながらほとんどの既往研究では空間的に発達した連続蛇行流れを対象としており, 直線部から蛇行部へ移行する洪水流れの乱流特性については不明な点が多い. 特に直線複断面流れでは低水路と高水敷の運動量交換を支配する水平組織渦が発生するが, こ

れが蛇行部に流入した際の構造特性については, 高精度な可視化解析が必要であるため未解明である.

したがって本研究では, 数値計算手法によって水平組織渦の蛇行特性の解明を試みる. 本計算ではこのような大規模な乱流渦を再現するためにはLESを用いる. 最近ではLESを用いた複雑地形上の気流計算⁵⁾や, 水面変動効果を取り入れたシミュレーションモデルの開発⁶⁾が行われている. また開水路わんどう流における組織渦を再現した計算⁷⁾も行われており, 水工学においてもLESの実用性が高まっている. そこで本研究でもLESを適用して複断面開水路流れの直線/蛇行の遷移区間を対象に乱流計算を行い, 前半部では平均流速を中心に既往の実験データと比較・検証する. 次に後半部ではほとんど解明が進んでいない水平組織渦の蛇行挙動や流れの時空間相関特性を数値的に解明する.

2. 基礎式と計算方法

本計算は著者らが昨年度に報告した実験ケースと同じ水理条件で行った. 図-1にその流れ場の座標系とスケールを示す. 図に示すように直線複断面流れから蛇行複断面流れへの遷移領域を計算対象にした. まず, 計算領域の横断幅は幅1mであり, 水路上に上流側からみて左側に幅 $B_{fl} = 20\text{cm}$ の左岸高水敷, 右側に幅 $B_{fr} = 60\text{cm}$ の右岸高水敷を設置した. またこ

表-1 計算ケース

D (cm)	B_m (cm)	B_{fl} (cm)	B_{fr} (cm)	H (cm)	H/D	Q (l/s)	U_m (cm/s)	s
5.0	20.0	20.0	60.0	7.0	1.4	7.47	24.9	1.09

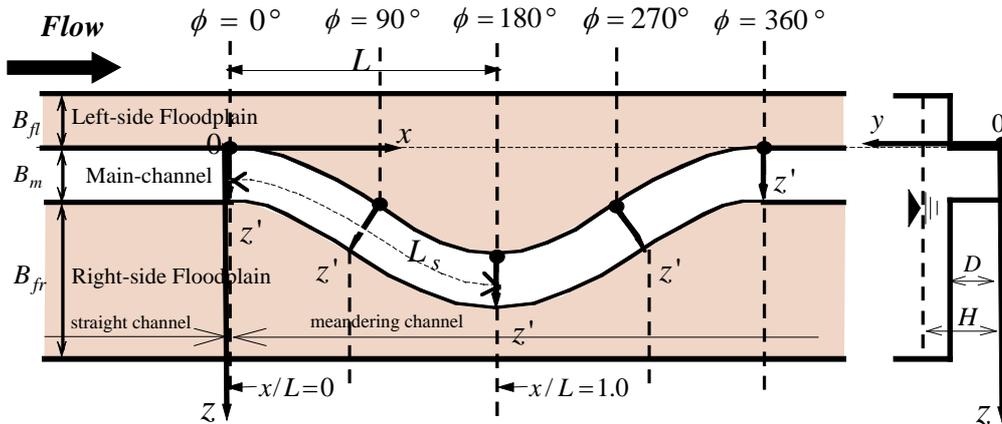


図-1 蛇行複断面流れにおける座標系

これらの高水敷の高さは $D = 5\text{cm}$ である。 H は直線部の低水路河床からの水深で、 $H = 7\text{cm}$ である。蛇行部の低水路形状はサインカーブに従っている。図中の L は蛇行部の主流方向長さの半分で、 $L = 1\text{m}$ である。 L_s は蛇行低水路に沿う曲線長さである。蛇行度 s ($=$ 蛇行長さ / 波長 $= L_s / L$) は 1.09 である。座標軸は、蛇行部入口の左岸高水敷の側壁を原点として流下方向に x 軸および横断方向に z 軸をとる。また低水路底面から鉛直方向上向きに y 軸をとる。 x , y および z 軸のそれぞれに対応する時間平均流速を U , V および W , 瞬間流速をそれぞれ \hat{u} , \hat{v} および \hat{w} とする。また乱れ成分を u , v および w とする。低水路内ではサインカーブに対して直交する面を横断面として、低水路内の左岸側壁を原点にとり、低水路内の右岸側に向かう z' 軸を定義した。すなわち z' 軸の方向は直線部では z 軸の方向と一致するが蛇行低水路内ではそれに交差するから、横断面ごとに異なる交差角をもつ。次節で考察する 5 つのテスト断面の表示としては蛇行低水路のサイン形状の位相角で表し、上流側から $\phi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 360^\circ$ とする位相表示を用いた。既往の水理実験³⁾ではこれらのセクションにおける横断面をメッシュ状に電磁流速計(EMV)で点計測した。

表-1に計算ケースの水理条件を示す。 Q は流量である。また、 $U_m = Q/A$ (A は $\phi = 0^\circ$ における流水断面積) は $\phi = 0^\circ$ における断面平均主流速である。図-2に計算グリッドの一部を示す。計算は境界適合格子を使用して行った。低水路内のメッシュは低水路カーブに直交するように分割した。ここで計算領域の全格子数は流下方向に400、鉛直方向に20、横断方向に80である。

ここでLESを適用するための空間粗視化された連続式と運動方程式は次のようになる。

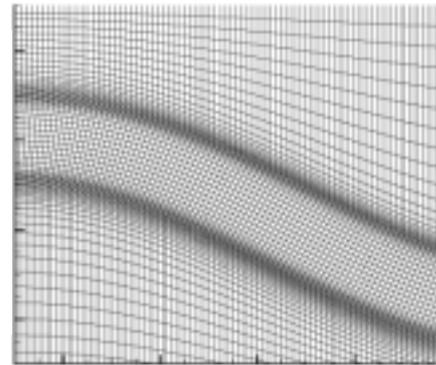


図-2 計算グリッド (計算領域の一部)

(連続式)

$$\frac{\partial \langle \hat{u}_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

(運動方程式)

$$\frac{\partial \langle \hat{u}_i \rangle}{\partial t} + \langle \hat{u}_j \rangle \frac{\partial \langle \hat{u}_i \rangle}{\partial x_j} = F_i - \frac{\partial \langle \hat{p} \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\tau_{ij} + 2\nu \langle \hat{D}_{ij} \rangle) \quad (2)$$

ここに $\langle \rangle$ は空間平均操作を示す。 F_i は外力項、 p は圧力、 D_{ij} は歪速度テンソルで、

$$D_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

と定義される。また τ_{ij} は粗視化にともなう残余応力で、本研究では標準スマゴリンスキーモデル⁸⁾で計算した。計算領域は蛇行領域を含むため、境界適合格子を用いて上述の基礎式を座標変換して、MAC法で解いた。移流項スキームは3次精度風上差分、時

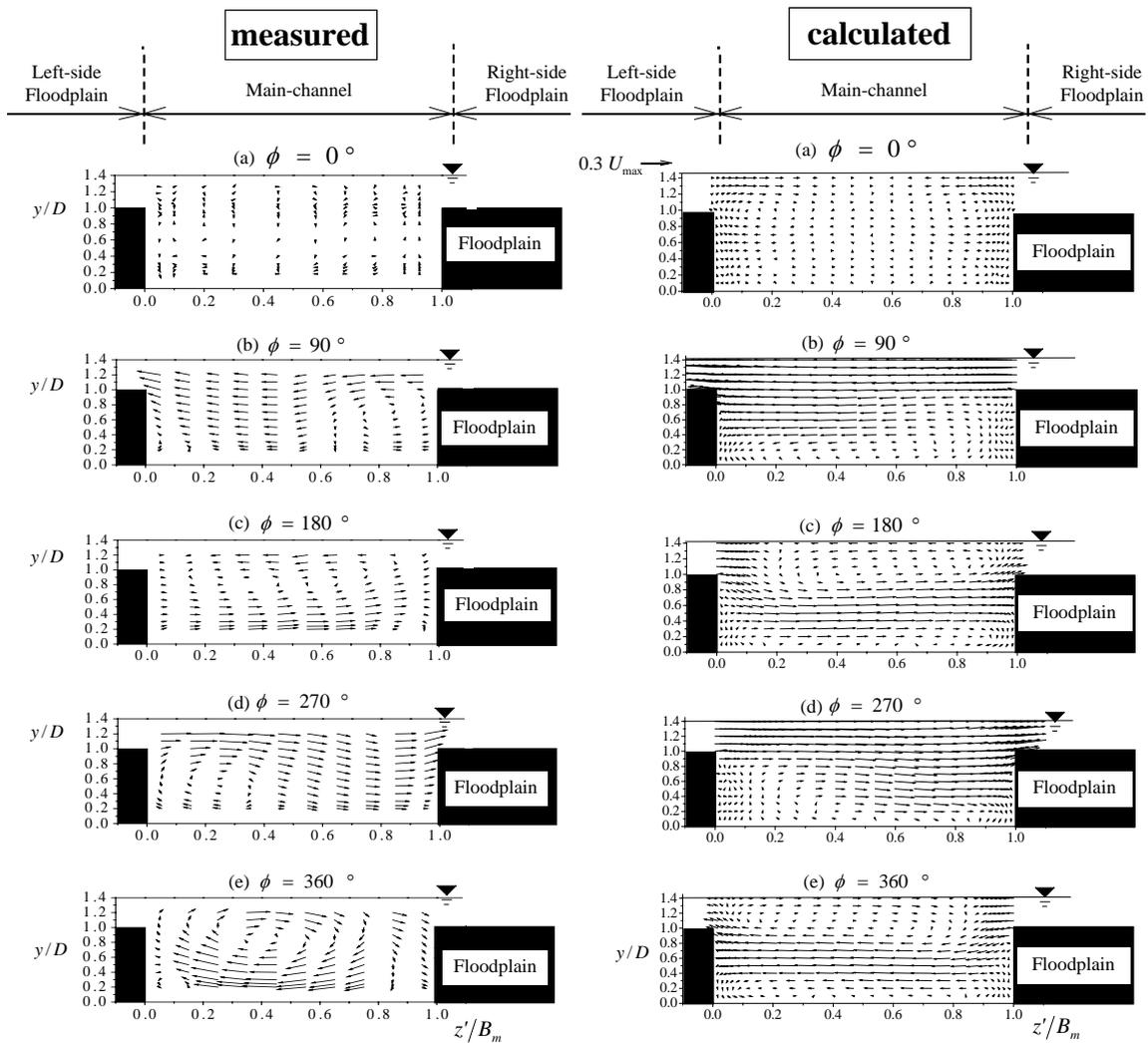


図-3 2次流ベクトルの計算値と実験値の比較

間微分項には2次精度アダムスーバシュフォース法を用いた。

壁面には流速の3成分ともにNo-Slip条件を、自由水面にはFree-Slip条件を与えた。流出部は自由流出とした。また組織渦を発達させるために、別に蛇行部の主流長さと同じ長さ $2L$ をもつドライバ部を設け、主流方向に周期条件下で計算されたドライバ部の瞬間流速値を本計算領域の流入部に与えた。

3. 計算結果と考察

(1) 2次流と主流速分布

図-3に各断面の2次流分布を実験値と比較した。直線部では計算値では複断面開水路に特有の斜昇流ベクトルやそれに伴う水面からの下降流がみられる。EMVでは計測精度の制約から斜昇流は捉えていないが、低水路中央部の水面付近からの下降流は計測できている。これらはいずれも最大主流速の数%のオーダーである。蛇行流と直下流のクロス部 $\phi = 90^\circ$ では、実験値において、高水敷上のかぶり流れが右

岸高水敷から蛇行低水路内に流入し、ステップ流に似たせん断剥離渦がみられる。計算でも実験値と比べて再付着点位置にずれがあるものの、同様の傾向を再現できている。蛇行頂点部の $\phi = 180^\circ$ ではクロス部の剥離渦が低水路全域まで発達している。逆クロス部の $\phi = 270^\circ$ では $\phi = 90^\circ$ とは逆回転の渦が観察される。また低水路内の流れが右岸高水敷に乗り上がる様子が計算値および実験値の両者にみられる。蛇行頂点部の $\phi = 360^\circ$ では逆クロス部の渦が低水路内全域まで発達する。計算結果では低水路底部で2次的な小スケールの渦が観察されるが、実験結果ではみられない。EMVは底面付近の計測に制約があるため、この相違については現時点では説明できないが、大規模渦の回転方向や大きさの変化は定性的に再現している。

図-4は図-3と同様に横断面の平均主流速コンターを実験値と比較したものである。結果は直線部の断面最大流速 U_{max} で無次元化した。複断面蛇行流では上述の2次渦によって主流速コンターが流下方向に沿って大きく変化する。特に $\phi = 90^\circ$ では右岸境界部

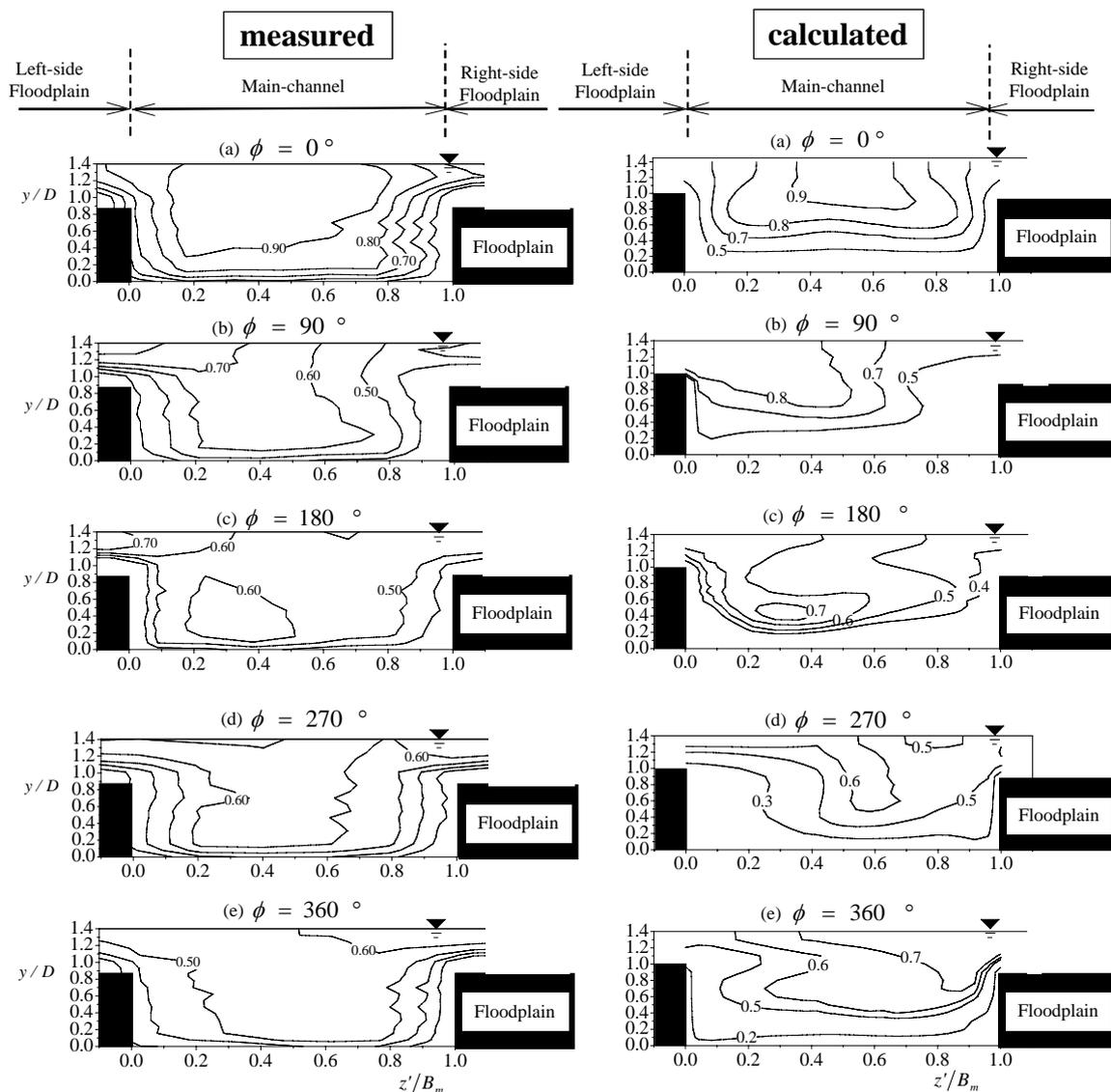


図-4 時間平均主流速の計算値と実験値の比較 (U/U_{max})

から低水路内に分布が張り出しており、 $\phi = 180^\circ$ では底面付近に最大領域が認められる。これらは直線部の $\phi = 0^\circ$ でみられる左右対称的な分布とは異なっており、計算結果でもこの特性を再現できている。 $\phi = 270^\circ$ では $\phi = 90^\circ$ と反対に左岸側に分布の張出しがみられ、 $\phi = 360^\circ$ では両者ともに右岸側に最大領域が存在する。これらの結果から本計算は複断面蛇行流の水利特性を比較的良好に再現できるといえる。

(2) 水平渦ベクトル

ここからは水理実験ではほとんど解明が進んでいない水平渦の蛇行特性を本計算結果によって考察する。図-5はある瞬間における直線から蛇行への遷移領域での水平面ベクトルを例示したものである。なお結果は水面 ($y = H$) のものであり、直線部における断面平均流速を差し引いた移動座標系で示してある。この図から直線部の左右岸の高水敷と低水路の境界部において、それぞれ逆方向に回転している2

つの渦が観察される。これらは多くの既往研究で研究されている直線複断面開水路流で観察される水平渦であり、本計算モデルの上流ドライバ部で十分発達した水平渦が再現できることがわかる。図-6は直線部の $\phi = 0^\circ$ における横断方向レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の横断分布をプロットしたものである。右岸境界部および左岸境界部付近にそれぞれ正負のピーク値が現れており、低水路と高水敷での運動量交換が活発なことがわかる。またこれは図-5に示した逆回転する2つの水平渦の存在を意味している。

次にこの水平渦が蛇行領域に流入してからの変化過程について考察する。図-7は図-5の結果から0.45sおよび0.75sにおける瞬間流速ベクトルを示したものである。0.45sでは両サイドの渦が蛇行入口に観察される一方、0.75sでは左岸水平渦は直流下しているが、右岸水平渦が不明瞭になっており、水平渦の構造が直線部のものから大きく変化することが予想される。次節ではこの変化特性について相関解析に

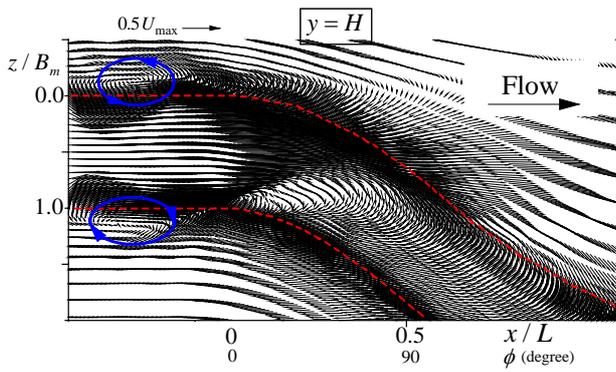


図-5 水平渦ベクトル図

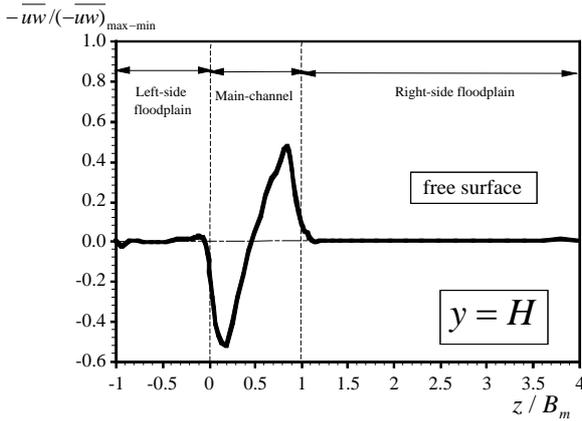


図-6 レイノルズ応力分布

より説明する。

(3) 時空間相関解析

上述のように水平組織渦を可視化するためには流速分布を移動座標系で表す必要があるが、蛇行流のように主流方向に流れが大きく変化する場合、渦の見え方が、差し引く基準速度に依存する。したがってベクトル図から渦や渦中心の時間的あるいは空間的な変化を正確に評価することは難しい。そこで本節では時空間相関解析を導入して水平渦の蛇行特性を考察する。水平渦が存在する領域では主流方向と横断方向の乱れ成分の時間変化には相関特性がみられるから、新たにそれらの積で定義される $\omega \equiv u \times w$ を考える。ここで時刻 t での基準点における $\omega(x_o, y_o, z_o, t)$ と、そこから $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ だけ離れた時刻 $t + \Delta t$ での $\omega(x_o + \Delta x, y_o + \Delta y, z_o + \Delta z, t + \Delta t)$ との時空間相関係数は次式で示される。

$$C_{\omega\omega} \equiv \frac{\overline{\omega_o \cdot (\omega_{o+\Delta})}}{\overline{\omega_o' \cdot \omega_{o+\Delta}'}} \quad (4)$$

式(4)において、 $\omega_o \equiv \omega(x_o, y_o, z_o, t)$ 、および $\omega_{o+\Delta} \equiv \omega(x_o + \Delta x, y_o + \Delta y, z_o + \Delta z, t + \Delta t)$ である。また分母の乱れ強度 ω' は $\omega' \equiv \sqrt{\omega^2}$ である。なお上付きバーは時間平均操作を表す。

図-8は、 $C_{\omega\omega}$ のコンターを $\Delta t = 1$ sの時間間隔で示す。基準点は蛇行入口部に2つ設けた。また左岸および右岸水平渦の存在位置を考慮し、これら2つの

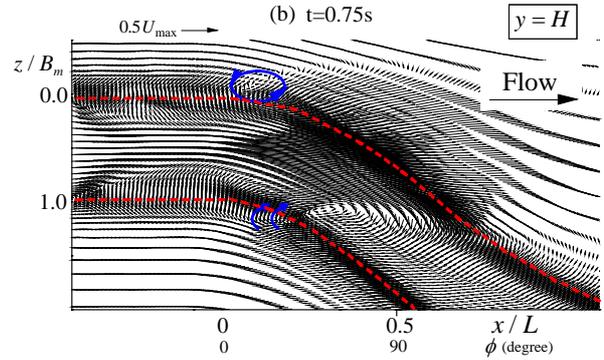
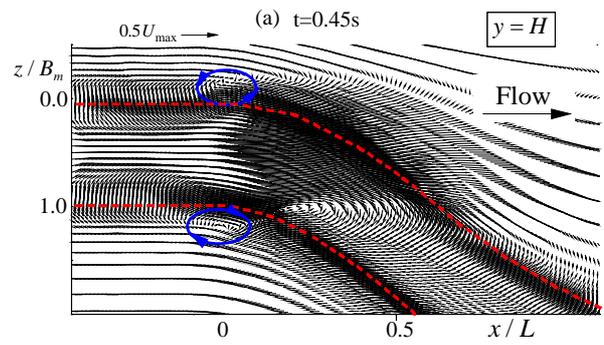


図-7 蛇行領域における水平渦

基準点の横断座標はそれぞれ $z'/B_m = 0.15$ および 0.8 とした。また基準点および対象面の高さはどちらも $y/D = 1.1$ である。まず左岸渦については時間とともに高相関領域が直流下する。ただし、流下とともに横断シアーが小さくなるから、渦強度は小さくなると思われる。一方で、右岸渦は低水路を横切るとともに、低水路に沿って流下し、蛇行頂点 ($x/L = 1.0$) 付近では左岸境界側に移動することがわかる。

(4) 水平渦の蛇行特性に関する考察

上述のように右岸水平渦の移動は複雑である。ここでは $C_{\omega\omega}$ の最大領域を結ぶことで右岸水平渦の軌道を作成した。図-9は基準点を前節と同じ位置 ($y/D = 1.1$) に固定して、高さの異なる対象面との時空間相関を計算することで、鉛直高さごとの右岸水平渦のトレースラインを1sごとにプロットしたものである。この結果からいずれの高さにおいても低水路を横断する様子がわかるが、水面に近いほど低水路形状の影響が小さく直線的な動きに近くなることが理解できる。したがって右岸水平渦は、その渦軸が主流方向にも横断方向にも傾いた複雑な立体構造をもつことが数値予測された。

4. 結論

本研究では、直線部から蛇行部へ遷移する複断面開水路流れを対象に境界適合格子を用いた3次元LESを行った。実験値と比較して本モデルを検証するとともに、組織渦の蛇行特性について考察した。特に時空間相関解析により水平渦の蛇行軌道を計算し、鉛直位置による軌道の特性変化を明らかにした。

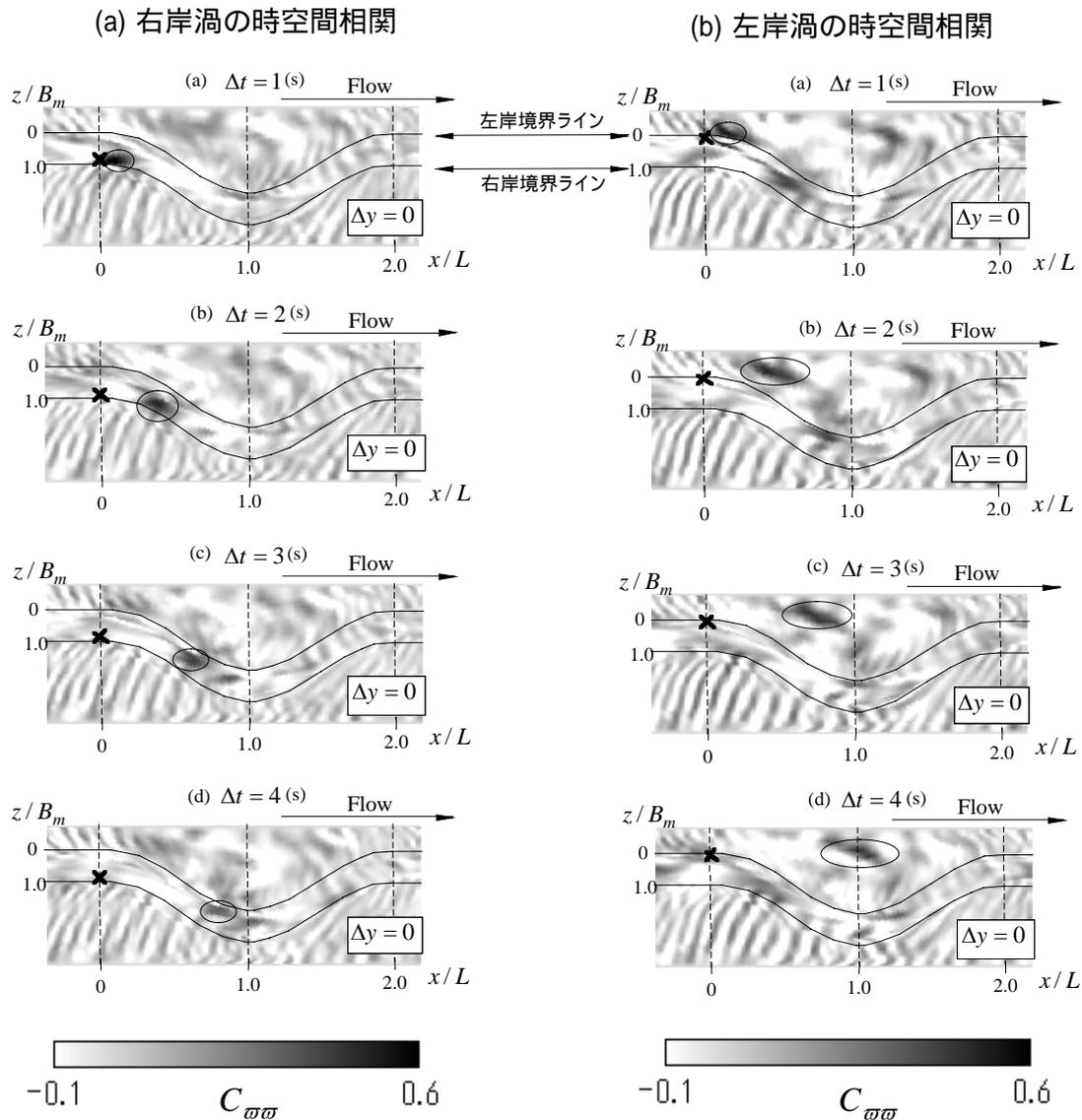


図-8 時空間相関コンター (×印は基準点位置を示す)

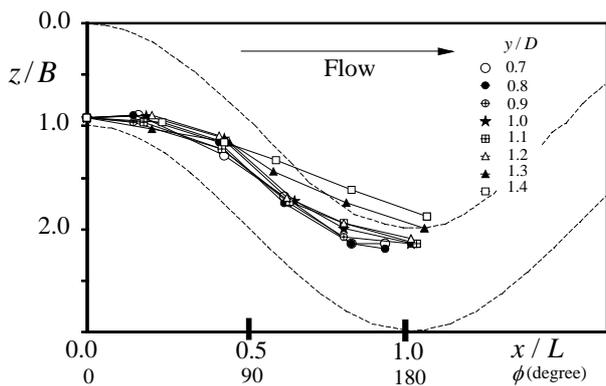


図-9 右岸水平渦のトレーサーライン

参考文献

1) Shiono, K., and Muto, Y.: Complex flow mechanisms in compound meandering channels with overbank flow, *J. Fluid Mech.*, vol.376, pp. 221-261, 1998.
 2) 福岡捷二・小俣篤・加村大輔・平生昭二・岡田将治:

複断面蛇行河道における洪水流と河床変動, 土木学会論文集, No.621/ -47, pp.11-22, 1999 .
 3) 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, 土木学会論文集, No.789/ -71, pp.37-46, 2005 .
 4) 福岡捷二・渡辺明英: 複断面蛇行水路における流れ場の3次元解析, 土木学会論文集, No.586/ -42, pp.39-50, 1998 .
 5) 中山昭彦・岸修士郎: LESによる安定成層条件下の気流の再現計算, 水工学論文集, 第46巻, pp.73-78, 2002 .
 6) 横嶋哲・中山昭彦: 開水路乱流のLESにおける水面変動のフィルタリング効果, 水工学論文集, 第46巻, pp.379-384, 2002 .
 7) 禰津家久・鬼束幸樹・矢野勝士: 側壁に凹部を有する開水路流れのLES解析, 水工学論文集, 第46巻, pp.403-408, 2002 .
 8) 梶島岳夫: 乱流の数値シミュレーション, 養賢堂, 1999 .
 (2005.9.30受付)