

PTV手法による高水敷・低水路間で発生する組織渦の解析

Analyses of Coherent Vortices between Main-channel and Flood-Plains by means of PTV

榑津家久*・志村拓也**・中山忠暢***

By Iehisa NEZU, Takuya SHIMURA and Tadanobu Nakayama

In compound open-channel flows, horizontal vortices are generated near the junction due to high shear layer of primary flow when the flood-plain depth is shallower. In this study, simultaneous velocity components were obtained at all grid points of arbitrary section by using the PTV. This PTV is very suitable to measure the shallow flows such as compound open-channel flows with shallow flood-plains. The aim of this paper is to analyze and clarify the instantaneous and space-time interaction mechanism between the flood-plain and main-channel due to horizontal vortices.

Key Words : PTV, Compound Open-channel Flows, Coherent Vortex,
Space-Time Correlation

1. はじめに

複断面開水路に形成される組織構造は、鉛直軸を有する大規模平面渦と高水敷端部から間欠的に発生する斜昇流の2種類に大まかに分類できる。前者は、低水路と高水敷間での流速差によって形成されるせん断層によるものであり、後者は境界部での乱れの非等方性が原因となって発生するものである。福岡・藤田(1989)¹⁾は両者の発生条件として水路幅や水深等を基準として選んでいる。斜昇流については、Tominaga& Nezu(1991)²⁾、Naotら(1993a,b)^{3),4)}のように実験および数値計算の面から平均的な特性について多くの研究が行われてきている。一方、平面渦については、低水路と高水敷の運動量交換に注目してせん断応力を評価し抵抗則を導いている玉井・河原(1981)⁵⁾の研究や、水平渦の発生を変曲点不安定性和非対称渦列の安定性により説明し、さらに2台の点計測を同時に行い条件付きアンサンブル平均法を用いて水平渦の3次元平均像を捉えた池田ら(1995)⁶⁾の研究がある。

以上の研究においては、ホットフィルム流速計やレーザ流速計による点計測法が一般的であり、特に後者の流速計は高精度に流速成分を計測することができる。しかし、組織構造の瞬間的な特性を検証するには、瞬間的な広域流れ場の情報が得られる可視化手法も重要である。本研究で用いるPTV(Particle-Tracking-Velocimetry)法^{7),8)}は近年の画像解析の急激な進展の中で生まれた可視化手法であり、空間内の瞬時の多点速度情報を得ることができる。今回は、複断面開水路流れにおいて平面渦の卓越しやすいような高水敷水深の浅い場合を対象として、平面渦の瞬間的・時空間的な特性を低水路と高水敷の相互作用のメカニズムの観点から検討を行う。

2. 実験および解析方法

本実験で使用した水路は、全長10m、幅40cmの可変勾配型循環式直線水路である。水路長10mのうち上流部と

* 正会員 工博 京都大学工学部助教授 環境地球工学教室

(〒606 京都市左京区吉田本町)

** 学生員 京都大学大学院 環境地球工学専攻修士課程

*** 学生員 京都大学大学院 環境地球工学専攻修士課程

下流部それぞれ50cmの区間に遷移部を設け、残り9mの区間に高さ5cmの複断面水路形状の亚克力製ボックスを設置した。表-1に複断面形状と水理条件を示す。流下・鉛直・横断方向をそれぞれ x, y, z とした。 H は水深、 D は高水敷高さ、 B は水路幅($B=Bfl+Bm+Bfr$)である。実験は、高水敷幅が15cmの片側高水敷(ケースBL, BH), 両側対称高水敷(ケースDL), 両側非対称高水敷(ケースFL)の場合について行った。計測地点は流れが十分に発達している水路上流端から6mとした。直径約100 μm 、比重1.02のナイロン12粒子をトレーサ粒子として水中に一様に混入し、厚さ約2mmのレーザライトシート(LLS)を水路側壁に垂直に照射して、約30cm $\times$ 30cmの範囲を上方からCCDカメラで撮影した。撮影された画像は光ディスクに記録されフレームメモリーボードを介してコンピュータで処理された。この際、4時刻の連続した画像からカルマンフィルター推定理論を用いた追跡アルゴリズムにより流速ベクトルを算出し、重み付け平均によって格子点でのベクトルに補間した。以上の方法によりLLS平面内の瞬時の多点速度情報を得た⁸⁾。

表-1 水理条件

Type	One-Side Flood-Plan		Both-Side Flood-Plans	
Case	BL	BH	DL	FL
fb	1/1000		1/1000	
H (cm)	6.0		6.0	
H/D	1.2		1.2	
Bfl Bm Bfr	0.167 1	0.167 1	1.2 1	0.67 1.1
Q (l/s)	3.8		3.2	2.6
Re	8985	12059	7827	6447
Fr	0.382	0.513	0.405	0.439

3. 実験結果および考察

3.1 片側高水敷における平面渦

図-1はケースBLの平均主流速分布、図-2は横断方向のレイノルズ応力分布である。両者から、今回のような高水敷水深の浅い場合には斜昇流に比べて平面渦が卓越しやすく、高水敷水深が深い場合よりは渦動粘性モデルの妥当性が大きいと言える。また、Nezuら(1995)⁹⁾が述べている、高水敷水深の深い場合に見られるような境界部を挟んだ高水敷側ではレイノルズ応力が負、低水路側では正というようなレイノルズ応力の逆転現象は今回のような高水敷水深が浅い場合には見られず、高水敷上でのレイノルズ応力のピークは以下で述べる大規模な水平渦の効果と考えられる。

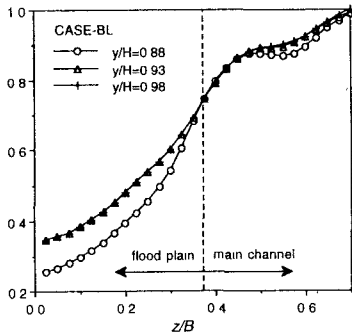


図-1 平均主流速分布

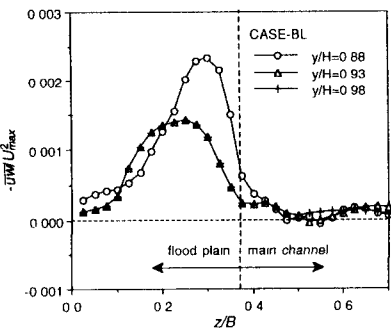


図-2 レイノルズ応力分布

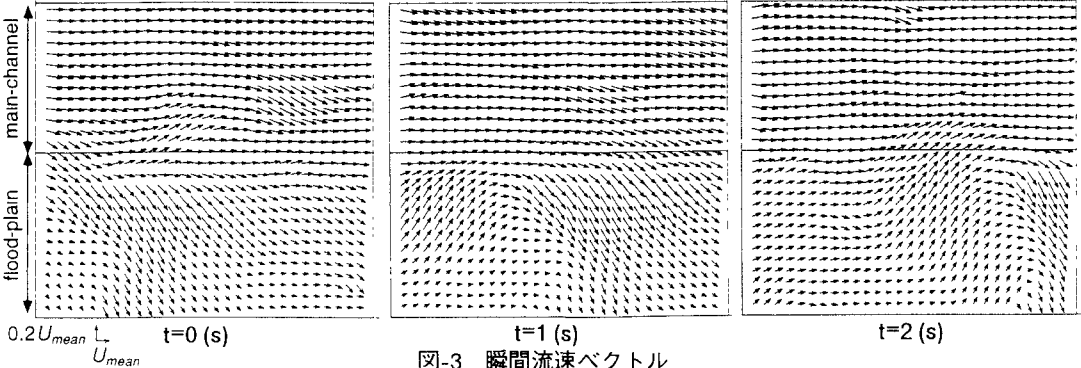


図-3 瞬間流速ベクトル

図-3は解析範囲29cm $\times$ 29cmに対するケースBLの瞬間流速ベクトル、図-4、5はそれに対応する渦度および発散のコンターである。 U_{mean} は平均主流速を断面平均したものであり、渦度は時計回りを正とした。これより、高水敷上で発生した低速流体が境界部へ向かい、巻き上げられて高速流体となって高水敷上へ再び流れ込む様子が見られる。高速流体と低速流体に挟まれたところでは渦

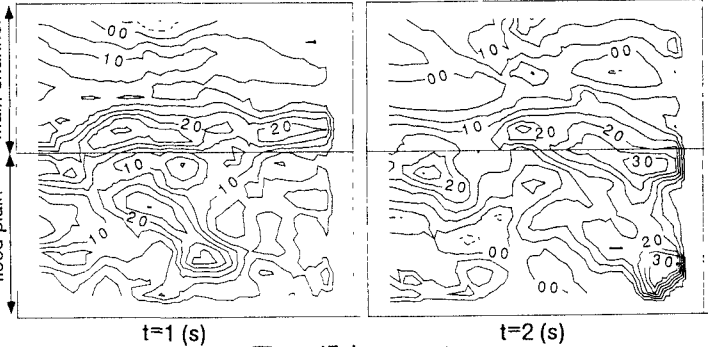


図-4 渦度のコンター

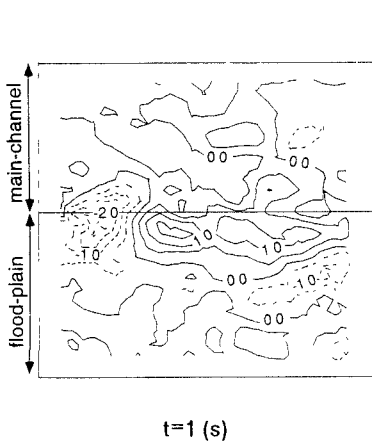


図-5 発散のコンター

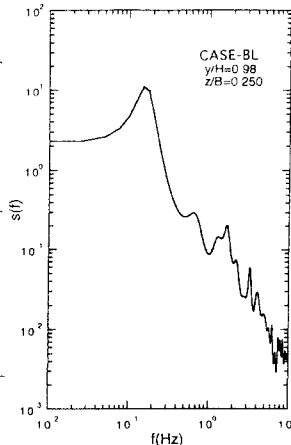


図-6 スペクトル分布

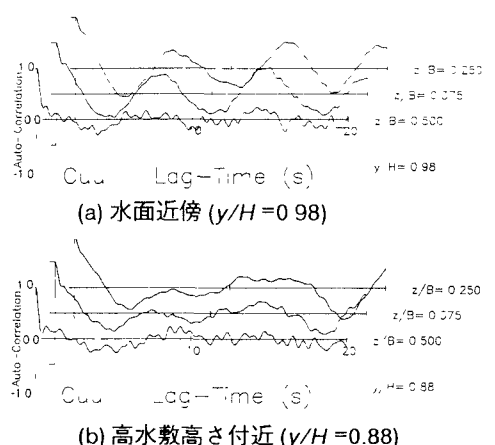


図-7 自己相関係数

度が大きくなっている。さらに、渦後部では下降流、渦中心部や先端部では上昇流が見られ、高水敷上での強い2次元性、境界部での3次元性が平面渦を構成している。渦中心部の上昇流は渦度の大きい底面付近と渦度の小さい水面付近の渦度勾配によって生じるようである¹⁰⁾。

図-6はケースBLにおける高水敷上での主流速 $u(t)$ のスペクトル分布の一例であり、可視化観測で得られた平面渦の周期(周波数)とほぼ一致する $f=0.2\text{Hz}$ あたりでピークが見られる。図-7(a), (b)はそれぞれ高水敷高さ付近および水面付近の u -変動成分の自己相関係数である。図より明らかに、水面近傍の高水敷上では平面渦の発生によって規則的な分布が見られ、平面渦の周期とほぼ一致する。高水敷高さ付近では、水面近傍に比べると若干不規則性が見られるが、これは高水敷上の摩擦によって発生した高周波の乱れエネルギーが原因である。

3. 2 時空間相関解析による平面渦の特性

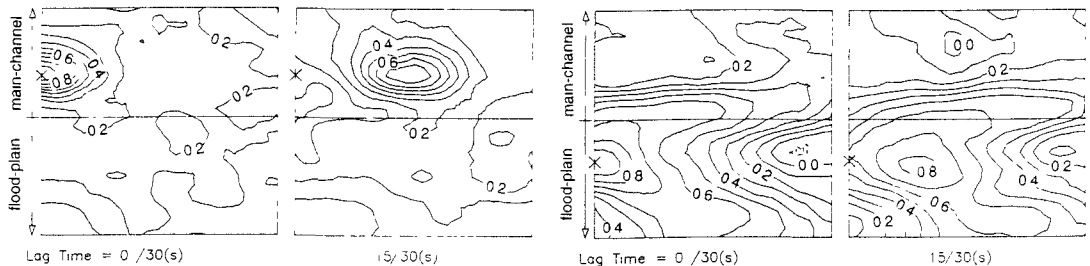
PTV法では平面内の多点同時計測が可能であり、従来のようにTaylorの凍結乱流の仮説を用いて時間相関から空間相関を求める必要がなく、平面内ではあるが時空間相関特性を求めることによって、複断面開水路流れにおける高水敷と低水路間の相互作用で発生する大規模な組織渦を解析できる点が特長である。

流下方向に距離 Δx 離れた点の u -変動成分の無条件時空間相関係数 $C_{uu}(\Delta x, \tau=0)$ 、平均渦径 L_x は次式で表される。

$$C_{uu}(\Delta x, \tau=0) = \frac{\overline{u(x_0, t)u(x_0 + \Delta x, t)}}{\overline{u'(x_0, t)u'(x_0 + \Delta x, t)}} \quad (1)$$

$$L_x = \int_0^\infty C_{uu}(\Delta x) d(\Delta x) \quad (2)$$

図-8(a), (b)はケースBLにおける境界部近傍の2固定点に対する時空間相関係数 C_{uu} の移流過程である。これより、低水路上の固定点に対する相関は高水敷に及びにくいのに対して、高水敷上の固定点に対する相関は低水路方向と高水敷の境界部からさらに離れる方向の2方向に及びやすい特徴的な分布を示す。この高水敷上の相



(a) 低水路側固定点 ($z/B=0.500$)

(b) 高水敷側固定点 ($z/B=0.250$)

図-8 無条件時空間相関係数 C_{uu}

関の分布は、図-3における平面渦の高速流体と低速流体によるものである。図-9は図-8に対する横断方向および流下方向の平均渦径の比(偏平率 $\Gamma=Lz/Lx$)の分布である。ここで、 $Lz(+)$ は正の横断方向への渦径、 $Lz(-)$ は負の横断方向への渦径、 Lz はそれらの平均である。境界部では高水数側への相関の延びに対応して偏平率が極端に大きくなっている。

図-10は C_{uu} のピークを含む流下方向の縦断面での時間的な移流過程である。図-11(a), (b)はそれぞれ水深方向・横断方向に対する C_{uu} のピーク値の減衰過程を示したものであり、曲線のようにほ

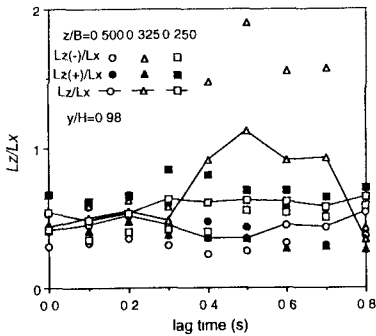


図-9 偏平率の分布

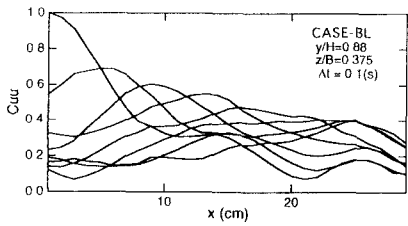
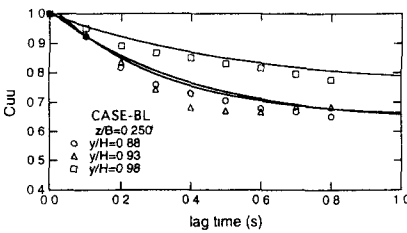
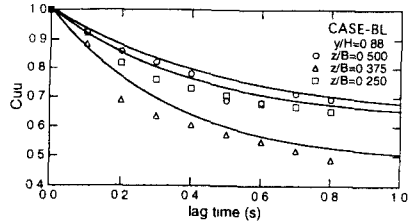


図-10 相関係数のピークの移流過程



(a) 水深方向の変化



(b) 横断方向の変化

図-11 相関係数のピークの減衰過程

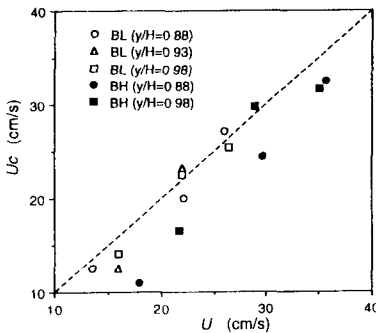
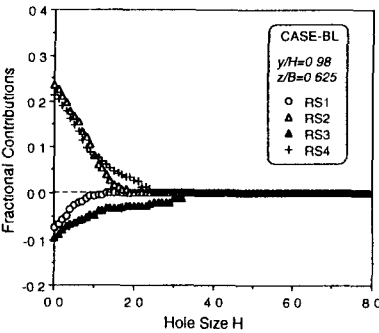
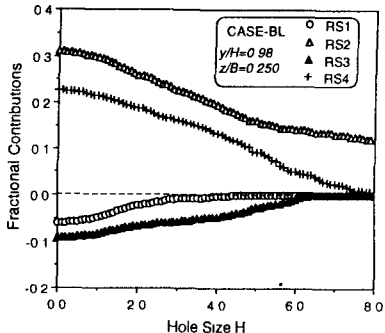


図-12 移流速度と平均流速の関係



(a) 低水路内



(b) 高水数上

図-13 レイノルズ応力の各象限への寄与率

は指数関数的に減衰することがわかる。これより水面では乱れの減衰のために相関が保持されやすく、境界部では乱れの発生のために相関が減衰しやすいことがわかる。図-12は図-10から求めた移流速度と局所平均主流速の関係であり、移流速度は平均主流速よりも若干小さい傾向が見られる。

図-13(a), (b)は横断方向のレイノルズ応力 $\overline{uw}$ に対してしきい値 H を設定し、 $u-w$ 平面内における各象限への寄与率を乱れ強度 u', w' の積で無次元化して表したものである。これより、高水数上のレイノルズ応力が極大をとる付近では第二象限・四象限の寄与率が大きくなっていることがわかる。条件付き時空間相関係数は判別関数を I 、遅れ時間を τ 、検出時間を T 、検出数を M として次式のように与えられる。本研究では、しきい値としてレイノルズ応力への寄与の半値しきい値を用いた¹¹⁾。

$$\langle u_i(x_0, z_0, t; \Delta x, \Delta z, \tau) \rangle = \frac{\int_T u_i(x_0 + \Delta x, z_0 + \Delta z, t + \tau) \cdot I(x_0, z_0, t) dt}{\int_T I(x_0, z_0, t) dt} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M u_i(x_0 + \Delta x, z_0 + \Delta z, t_k + \tau) \quad (3)$$

ここでは平面渦に関連しているとみなしうるレイノルズ応力が正の領域、すなわち第二象限と第四象限のみを

解析対象として、その際にしきい値の条件を満たせば判別関数 $I=1$ 、条件を満たさなければ $I=0$ となるようにした。図-14はケースBLにおいて第二象限のみを抽出し($I_2=1$)、 $\langle u_i \rangle = \mu_i / u_i'$ のように各点での乱れ強度で規格化して表示したものである。点線は負の値を示す。高水敷から低水路へ渦が移流していく様子が見られ、図-3の低速流体に対応している。

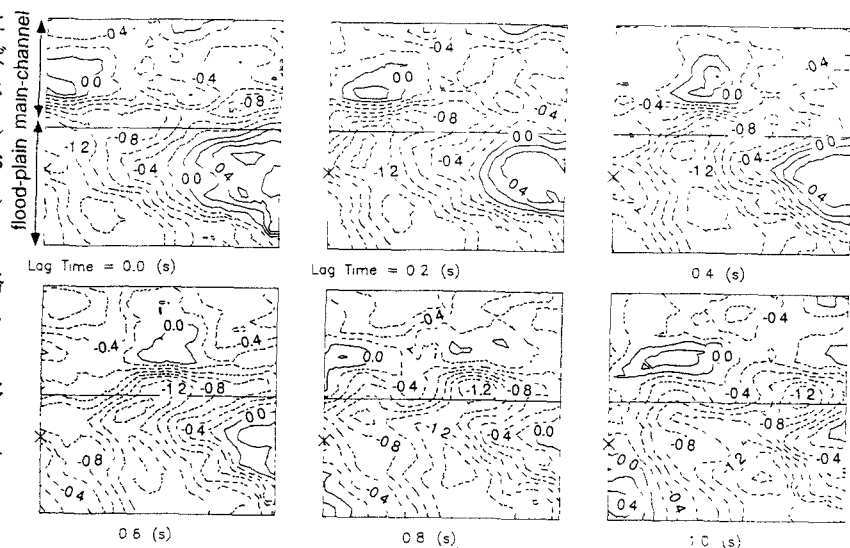


図-14 条件付き時空間相関係数 $\langle u \rangle$ ($y/H=0.98$)

3. 3 両側高水敷における平面渦

図-15は両側非対称のケースFLの横断方向のレイノルズ応力分布である。両側高水敷の場合には、片側の場合よりもレイノルズ応力のピーク位置が低水路側よりであり、2列の渦列の干渉効果が生じている。図-16(a), (b)は平面渦に関連していると思われる低周波成分のみを取り出した場合における、両側高水敷上での横断方向瞬間流速の時系列である。時刻30(sec)あたりでは両側において変動成分が増幅されており、2列の渦列の干渉が不安定要因となる。図-17はその際の瞬間流速ベクトルであり、高水敷上から発生する低速流体の一部が低水路内へ流れ込み、互いに影響しあっている。図-18は渦度のコンターであり、高水敷幅の大きい側から発生する平面渦がより支配的となっている。

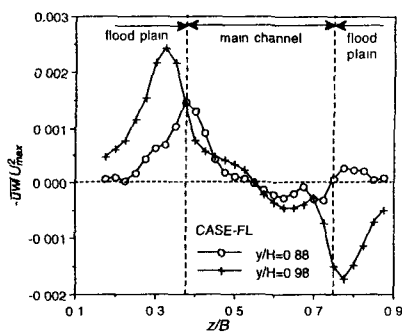
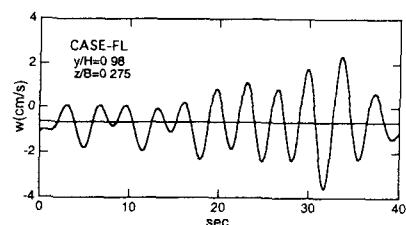
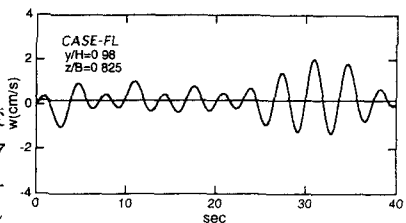


図-15 レイノルズ応力分布



(a) 幅15cmの高水敷上



(b) 幅10cmの高水敷上

図-16 横断方向瞬間流速の時系列

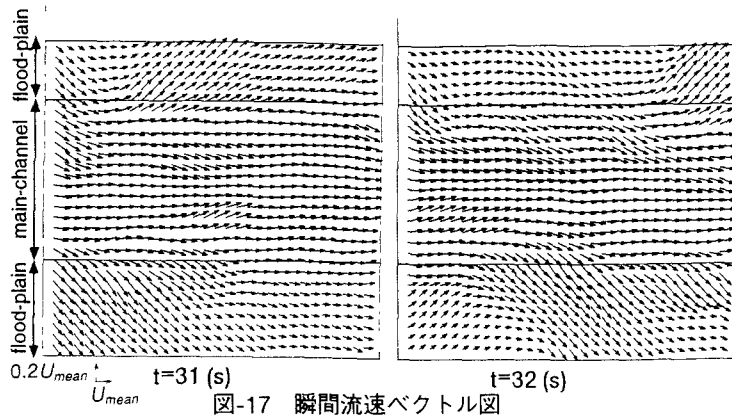


図-17 瞬間流速ベクトル図

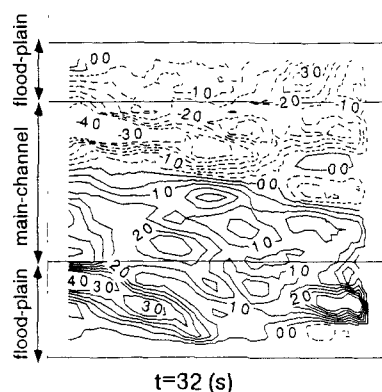


図-18 渦度のコンター

図-19(a), (b)は両側対称のケースDLにおける時空間相関係数の分布である。図-19(a)は C_{ww} の移流過程であり、固定点のある高水敷側には正負のピークが規則的に存在し、境界部を挟んでの周期的な相互作用が見られる。一方、反対側の境界部付近にもピークが存在し、2列の渦列が交互に発生することを示している。図-19(b)は C_{uw} のコンターであり、 C_{ww} と同様に規則的な正負のピークが存在することより平面渦がレイノルズ応力の第二象限と第四象限の相関によって構成されることが示されているが、2列の渦列間の相関は見られない。

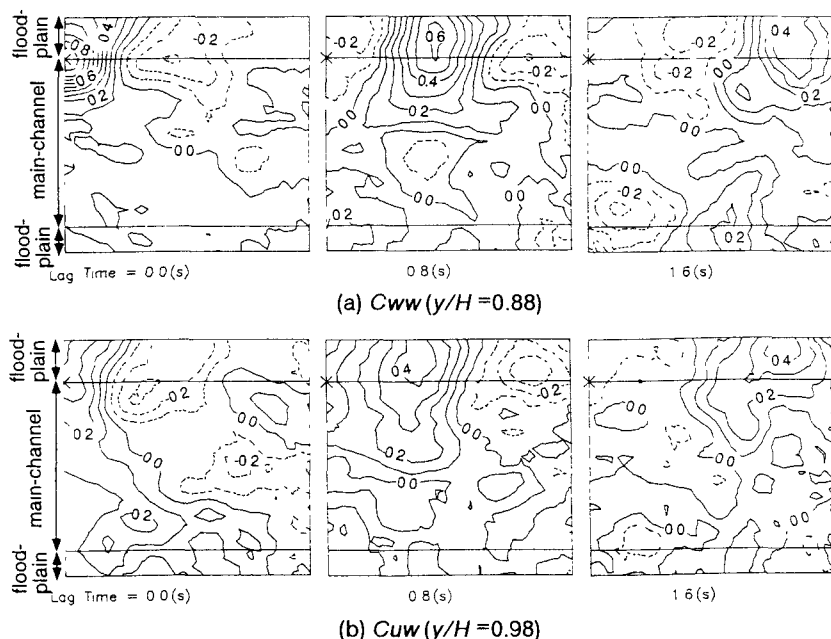


図-19 無条件時空間相関係数

4. おわりに

本研究は、高水敷水深の浅い複断面開水路流れを対象として、そこで発生する平面渦の乱流構造について、主に低水路と高水敷間での相互作用に焦点を絞り、PTV法を用いて実験的に解析したものである。このPTV法を用いることによってLLS平面内の多点同時ベクトルを求め、時空間相関解析や条件付きサンプリング手法によって複断面開水路内の時空間的な現象の解明を行った。従って、本研究で用いたPTV法は、レーザ流速計も含めた従来の計測機器では解析できない、高水敷水深の浅い複断面開水路流れのような浅水流の計測には非常に有効であり、応用範囲は非常に広いものと思われる。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 藤田光一(1989): 土木学会論文集, 第411号/II-12.
- 2) Tominaga, A. & Nezu, I. (1991): J. Hydraulic Eng., ASCE, 117(1), pp.21-41.
- 3) Naot, D., Nezu, I. & Nakagawa, H. (1993a): J. Hydraulic Eng., ASCE, 119(3), pp.390-408.
- 4) Naot, D., Nezu, I. & Nakagawa, H. (1993b): J. Hydraulic Eng., ASCE, 119(12), pp.1418-1426.
- 5) 玉井信行, 河原能久(1981): 第25回水理講演会論文集, pp.113-118.
- 6) 池田駿介, 村山宜義, 空閑健(1995): 土木学会論文集, 第509号/II-30.
- 7) 津田宜久, 小林敏雄, 佐賀徹雄(1991): 第6回流れの計測大阪シンポジウム論文集, pp.47-52.
- 8) Nezu, I., Nakagawa, H. & Sasaki, K. (1994): Proc. of Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation, ASCE, pp.406-415.
- 9) Nezu, I., Nakagawa, H. & Abe, T. (1995): 26th IAHR Congress, London, vol.1, pp.45-50.
- 10) 玉井信行, 浅枝隆, 池田裕一(1986): 土木学会第41回年講, pp.313-314.
- 11) Nezu, I. & Nakagawa, H. (1993): Turbulence in Open-Channel Flows, IAHR-Monograph, Balkema.