

II-288

PTV法による複断面開水路乱流の時空間相関計測

京都大学大学院 学生員 ○中山忠暢

京都大学工学部 正員 棚津家久

竹中土木 正員 阿部 崇

1.はじめに 複断面開水路では低水路と高水敷の境界で形成されるせん断層による流れの不安定性が原因となって斜昇流に代表される組織構造が発生する。この組織構造は各種の輸送現象に重要な影響を及ぼすため、この解明は合理的な水工設計を行う上で不可欠である。本研究は従来のような抵抗特性のみに注目するのではなく、近年の画像解析の急激な進展の中で生まれたPTV法(Particle-Tracking-Velocimetry)を用いて組織渦の時空間相関解析や条件付きサンプリング手法により複断面開水路の時空間的な現象の解明を行おうとするものである。

2.実験および画像解析方法 本実験は、図-1に示すように全長8(m)、幅30(cm)、深さ25(cm)の可変勾配型循環式水路内に高さ5(cm)の高水敷を右岸側に設置して行った。実験は法面勾配が90度のケースCと26.7度のケースFの2通りで行った。表-1に水理条件を示す。直径約100(μ m)、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樣に混入し、厚さ約2(mm)のレーザライトシート(LLS)をx-z平面に平行に照射して、20×20(cm)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を用いて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。以上の方法により空間内の瞬時の多点速度情報が得られる。

3.実験結果および考察 PTV法によって得られる流速変動には画像解析や補間の際に生じるノイズ成分が含まれている。このため、まずこの高周波のノイズ成分をフーリエ級数分離を用いた数値フィルターによって取り除いた。図-2は流速 $\vec{u}$, $\vec{w}$ の乱れ成分 u , w の時系列である。これより高水敷側のJunction近傍では4つの象限にほぼ等しく分布するのに対して、低水路側では第二象限と第四象限に偏る傾向が見られ、Junctionから低水路側にかけて正のレイノルズ応力の領域が広がる従来の結果と良く一致する。

流下方向に距離 Δx 離れた点の主流速のフーリエ変動成分の同時空間相関係数 $C_{uu}(\Delta x, \tau=0)$ 、平均渦径 L_x は次のように与えられる。

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

$$L_x = \int_0 C_{uu}(\Delta x) d(\Delta x)$$

図-3は固定点 $\times$ に対する横断方向乱れ成分の時空間相関係数 C_{ww} の分布であり、時間とともに高相関領域のピークが低くなるとともに主に主流方向に伸びていく様子が読みとれる。点線は負の値を表す。表-2はケースCに対する渦の移流速度と平均流速との関係を示しており、主流方向に対しては移流速度は平均流速の約9割となり従来の結果とはほぼ一致するが、横断方向に対してはスケールが小さく補間が適当でなかったため値にばらつきが見られる。図-4は横断方向・流下方向の平均渦径の比(偏平率 $\Gamma = L_z/L_x$)の分布である。高水敷高さ付近($y/H=0.58$)においては、境界部から離れたところ(基点C)では時間とともに偏平率が単調減少するのに対して、境界部(基点A, B)では偏平率がいったん減少するがある時刻を境に増加していく。水面付近($y/H=0.85$)においてはそれほど顕著ではない。

表-1 水理条件

CASE	1/b	H (cm)	B ₁ /B	D/B ₁	H/D	Fr ₁ (x10 ³)	Fr
C	1/10000	10.0	0.333	1.0	2.0	2.715	0.065
F	1/10000	10.0	0.333	1.2	2.0	6.599	0.132

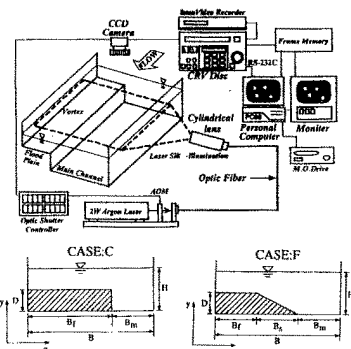


図-1 実験および画像解析装置

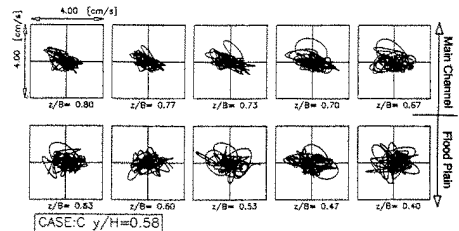


図-2 乱れ成分の変動軌跡

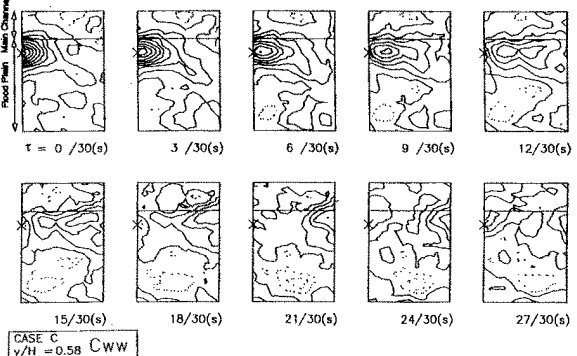
図-3 時空間相関係数 C_{ww}

表-2 移流速度と平均流速

y/H	fixed point	$\bar{U}_c$ (cm/s)	$\bar{W}_c$ (cm/s)	$\bar{U}$ (cm/s)	$\bar{W}$ (cm/s)	$\bar{U}_c/\bar{U}$	$\bar{W}_c/\bar{W}$
0.85	B	17.800	0.000	18.405	0.253	0.967	0.000
0.85	A	18.790	-0.165	19.013	-0.273	0.988	0.604
0.58	A	18.900	1.100	19.068	0.337	0.991	3.264

無条件時空間相関解析では時空間的に流速の時系列全てを平均化してしまい、間欠性の組織渦の構造・位相パターンや輸送現象などの特徴が打ち消されてしまう恐れがある。そこで条件付きサンプリング手法の1つである四象限区分法²⁾を用いて組織渦構造の特徴をとらえた。図-5はフーリエ変動成分による全レイノルズ応力- $\bar{u}w$ の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示したものである。これよりケースCの接合部近傍における低水路側の固定点($z/B=0.73$)においては第二象限($RS2:u<0,w>0$)の寄与の方が大きいに対し、ケースFの高水敷側の固定点($z/B=0.40$)において

は第四象限($RS4:u>0,w<0$)の寄与の方が大きいことがわかる。これは低速流体(組織渦)が高水敷側から低水路側へ、それを補う高速流体(補完流)が低水路側から高水敷側へ移流していることを示している。またケースCでは第一・三象限の寄与が小さくなっているが、このことは高水敷端部より発生する斜昇流の大きさ・角度との関連が大きき³⁾、ケースFの方が低水路の流れが高水敷に及ぼす影響が大きいことがうかがえる。

条件付きサンプリングを行った組織渦成分の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 として次のように与えられる。

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

図-6は $\langle \hat{u}_i \rangle = \langle u_i \rangle / u_i'$ のように固定点の乱れ強度で無次元化して表示したものであり、第二象限のみを抽出した場合であって、若干ではあるが低水路方向へ移動する傾向が見られる。

4. おわりに 本研究は従来よりよく行われてきた抵抗特性に注目するのではなく、時空間的な現象に注目して時空間相関解析および四象限区分法を用いて複断面開水路の特性を考察したものである。

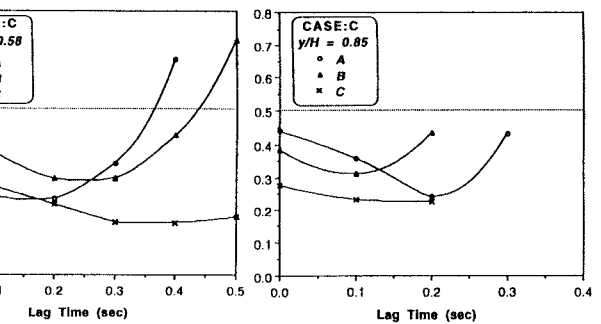
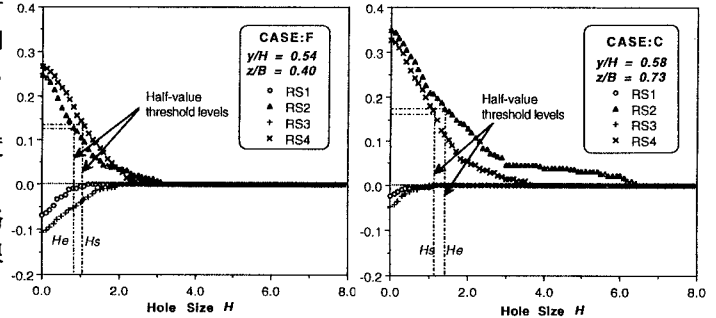


図-4 渦の偏平率の時間変化


図-5 レイノルズ応力- $\bar{u}w$ の各象限への寄与率

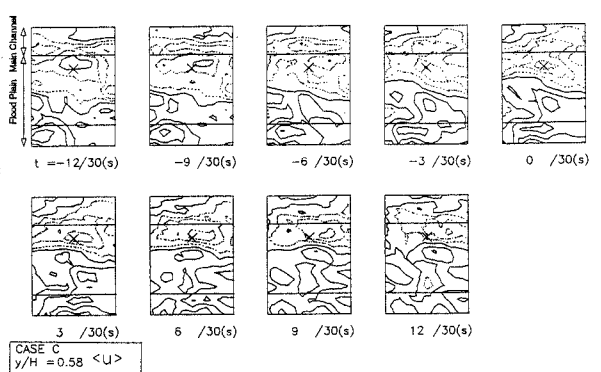
は第四象限($RS4:u>0,w<0$)の寄与の方が大きいことがわかる。これは低速流体(組織渦)が高水敷側から低水路側へ、それを補う高速流体(補完流)が低水路側から高水敷側へ移流していることを示している。またケースCでは第一・三象限の寄与が小さくなっているが、このことは高水敷端部より発生する斜昇流の大きさ・角度との関連が大きき³⁾、ケースFの方が低水路の流れが高水敷に及ぼす影響が大きいことがうかがえる。

条件付きサンプリングを行った組織渦成分の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 として次のように与えられる。

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

図-6は $\langle \hat{u}_i \rangle = \langle u_i \rangle / u_i'$ のように固定点の乱れ強度で無次元化して表示したものであり、第二象限のみを抽出した場合であって、若干ではあるが低水路方向へ移動する傾向が見られる。

4. おわりに 本研究は従来よりよく行われてきた抵抗特性に注目するのではなく、時空間的な現象に注目して時空間相関解析および四象限区分法を用いて複断面開水路の特性を考察したものである。


図-6 条件付き時空間相関係数 $\langle \hat{u} \rangle$

＜参考文献＞

- 1) Nezu, I et al., Proc. of Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements, ASCE, pp.406-415, 1994.
- 2) Nezu, I and Nakagawa, H. : Turbulence in Open Channel Flow, IAHR Monograph, Balkema, 1993.
- 3) 今本博健・石垣泰輔・木下聖司：複断面開水路流れの水利特性について(2)，京都大学防災研年報，第27号B-2，1984.