

水深が時間的に変化する複断面開水路乱流 における組織渦の発生・発達現象

GENERATION AND DEVELOPMENT PROCESS OF COHERENT VORTICES IN DEPTH-VARYING UNSTEADY COMPOUND OPEN-CHANNEL FLOWS

瀬津家久¹・山上路生²・後藤健³

Iehisa NEZU, Michio SANJOU and Ken GOTO

¹フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 環境地球工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²学生員 京都大学大学院博士後期課程 環境地球工学専攻 (同上)

³学生員 京都大学大学院修士課程 環境地球工学専攻 (同上)

Database of unsteadiness characteristics of horizontal vortices in rectangular / compound open-channel flows is not yet available. Therefore, in this study, turbulence measurements were conducted in the time-dependent and depth-varying unsteady compound open-channel flows using a PIV system. The generation and the development processes of horizontal vortices were investigated, considering the inflectional instability analysis. It was found experimentally that single eddy structure is changed to twin eddies structure as the increase of time-dependent depth.

Key Words : Unsteady compound open-channel flows, Horizontal vortex, PIV, Coherent structure, Turbulence

1. はじめに

複断面開水路流れでは低水路と高水敷の境界部付近に鉛直軸をもつ大規模水平組織渦が発生する。水平渦の先駆的研究として、水平渦が流下方向に一定の間隔をもつことを明らかにした Sellin¹⁾のものがあげられる。最近では、計測技術の進展により水平渦の実験的研究が数多く行われている。石垣・今本²⁾は、水平渦と断面形状に支配される斜昇流特性に基づいて複断面流れの3次元構造を明らかにした。池田ら³⁾は水平渦の発生メカニズムに着目し、変曲点不安定性理論による安定性と非対称渦列の安定性から水平渦構造を考察した。複断面形状や水深と水平渦の関係に関する研究も行われている。池田・空閑⁴⁾は低水路幅が広く、高水敷高さに対して水深が浅い場合に安定した水平渦が発生することを示した。瀬津ら⁵⁾は高水敷高さに対する高水敷上のかぶり水深の比を系統的に変化させて乱流計測を行い、かぶり水深が浅い場合には境界部で1列の大規模水平渦が発生し、かぶり水深が大きくなると水平渦が2列に分離することを明らかにした。

このように従来の定常流研究によって、複断面開水路流れにおける水平渦構造が次第に解明されつつあるが、一方で時間的に水深が変化する非定常な複断面開水路流れや単断面から複断面への遷移過程を含む非定常流れに関する研究は少なく、水平渦の非定常的な発生、発達プロセスについては不明な点が多い。特に洪水時における土砂輸送や流れ抵抗

に与える水平渦の影響は大きいから、水工学や河川環境学上において水平渦の非定常特性や断面変化影響を解明することは大変重要である。そこで本研究では、水深の時間変化を有する非定常複断面流れと単断面から複断面への遷移過程をもつ非定常開水路流れにおける水平渦構造の時間変化プロセスをPIV(Particle Image Velocimetry)システムによる可視化実験によって解明する。

2. 実験装置と水理条件

(1) 計測方法

計測システムを図-1に示す。実験水路は、全長10m、全幅 $B=40\text{cm}$ の可変勾配型総ガラス製の直線水路である。水路の右岸側にアクリルボックスを用いて高さ $D=5\text{cm}$ の高水敷を全長にわたって設置し、複断面水路を作った。図中の B_m 、 B_f 、 D および H はそれぞれ低水路幅、高水敷幅、高水敷高さおよび低水路水深を表す。流体計測はPIVシステム(DANTEC社製)を用いた。光源のYAGレーザー(15mJ)より発信された厚さ2mmのレーザーライトシートが水路側壁より水面と水平に照射された。この時、照射された領域の一部をCCDカメラ(1008pixel×1008pixel)によって撮影し、3Hzごとに相関法で画像解析し、瞬時の流速場(200mm×200mm領域)が得られた。

時間変化する流量はコンピュータで自動制御し、流量ハイドログラフは、洪水流の本質的な特性を失わない三角波を用いた。なお、水深計測には、

表-1 水理条件

case	H_b (cm)	H_p (cm)	B_f/B	H_b/D	H_p/D	Q_b (l/s)	Q_p (l/s)	Um_b (cm/s)	Um_p (cm/s)	T_d (s)
HH60	6.8	9.6	0.5	1.4	1.9	1.8	15.0	10.4	52.8	60
TH60	4.0	8.3	0.5	0.8	1.7	2.3	13.8	28.8	59.4	60

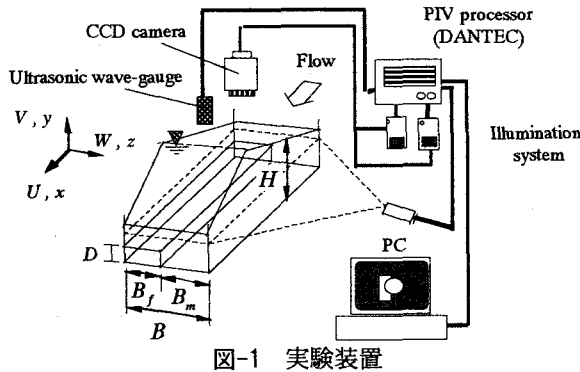


図-1 実験装置

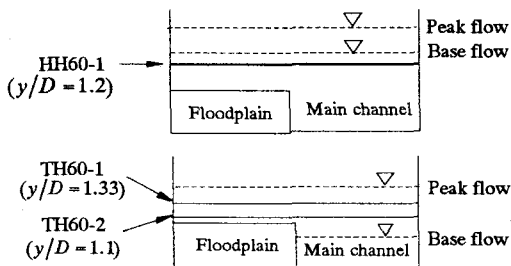


図-2 計測断面

超音波波高計(KEYENCE社製)を用いた。

(2) 計測ケース

表-1に実験条件を示す。本実験では2種類の流れ場を対象とした。ケースHHは水深が変化する複断面開水路流れであり、ケースTHは単断面から複断面に遷移する開水路流れである。ここで Um は断面平均主流速、 T_d は増水時間であり、本研究では $T_d = 60s$ と一定にした。添字 b および p はベース時とピーク時の値を表す。図-2に計測断面を示す。ケースHHでは水深方向距離 $y/D = 1.2$ 、ケースTHでは $y/D = 1.33$ および $y/D = 1.1$ の高さに計測断面を設定し、レーザーシートを照射した。以下、この計測断面名をそれぞれHH60-1, TH60-1, TH60-2とする。

3. 実験結果および考察

(1) 水深の時間変化

図-3に超音波波高計で計測した水深 $H(t)$ の時間変化を示す。両ケースともに水深が増水から減水へと時間的に変化する。そこで、この水深変化を増水時間 T_d による無次元時刻 $T = t/T_d$ を用いて区分する。すなわち $0 < T < 1$ は増水期、 $T = 1.0$ は水深ピーク時刻、 $1 < T < 2$ は減水期を表す。

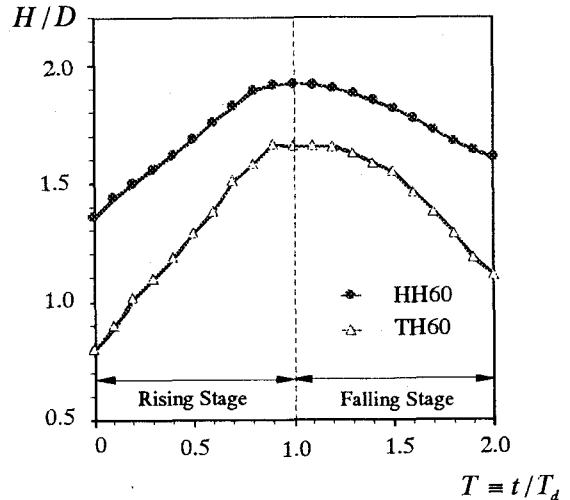


図-3 水深の時間変化

(2) 流速ベクトルと渦度

図-4(a)にHH60の計測断面HH60-1 ($y/D = 1.2$) におけるある瞬間の流速ベクトル及び渦度 ω_y の時系列を示す。瞬時流速ベクトルは断面平均流速の移動座標系で示している。渦度は式(1)で定義される。

$$\omega_y = \frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial x} \quad (1)$$

渦度の値は、増水時間 T_d を乗じて無次元化し、負の領域に斜線を施した。 $T = 0.0$ と $T = 0.5$ では、境界部を中心とした時計回りの渦が観察される。なお、ベースフロー時における水平渦約1.7秒の周期をもつ。一方、ピークフロー時の $T = 1.0$ では、低水路側の時計回りの渦と高水敷側の反時計回りの渦対が観察され、渦列は2列となることが大きな特徴である。また、それらの周期は低水路で約0.5秒、高水敷で約0.37秒であり、それぞれ異なる周期をもつ。渦度分布も水平渦の回転方向と対応して低水路側が正、高水敷が負となっている。 $T = 1.5$ では低水路側の時計回りの渦は明瞭であるが、高水敷上の反時計回りの渦は不安定な状態となる。 $T = 2.0$ では $T = 0.0$ と同じ1列の水平渦構造に戻る。

図-4(b)に単断面から複断面へと遷移するケースTH60の、計測断面TH60-1 ($y/D = 1.33$) における瞬間流速ベクトルを示す。遷移直後の $T = 0.5$ では、境界部付近に水平渦が観察されるが、領域全体において横断方向の乱れも大きい。 $T = 1.0$ では、渦が発生しつつあるが、明白な水平渦構造は認めにくい。 $T = 1.5$ になると、低水路側と高水敷側に2列の水平渦が観察される。 $T = 1.75$ では、境界部付近に中心

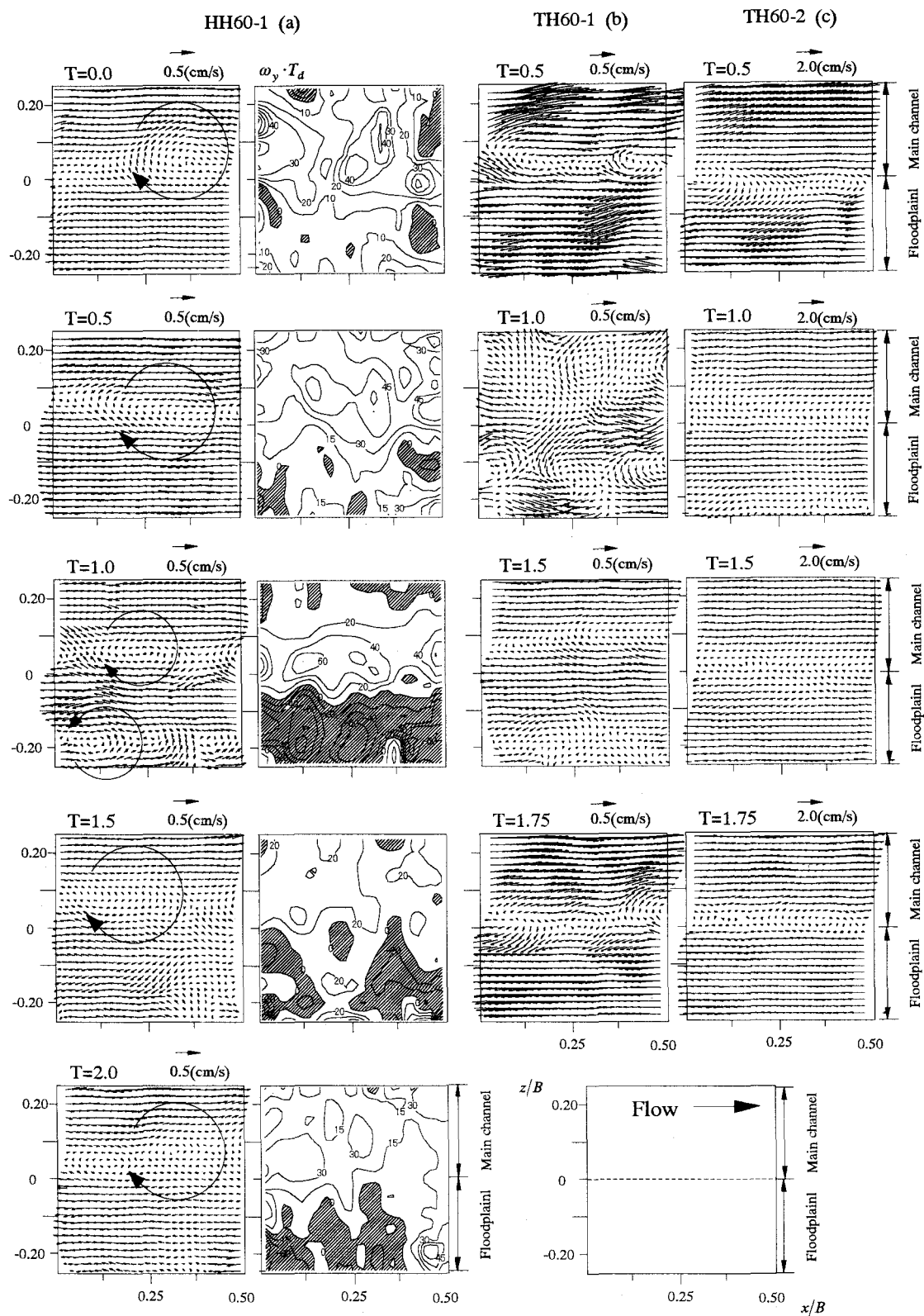


図-4 瞬間流速ベクトル（断面平均流速の移動座標系）と渦度分布

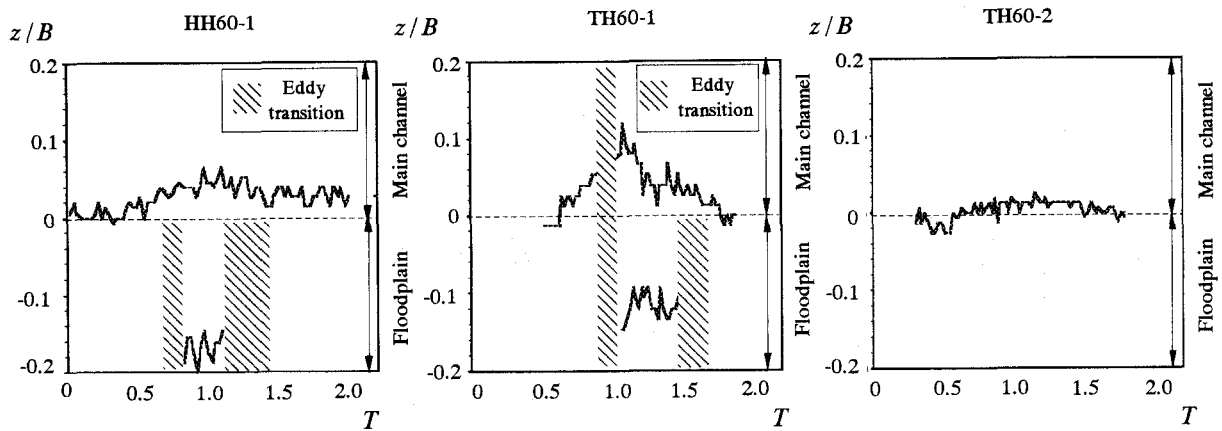


図-5 渦列中心の横断方向位置の時間変化

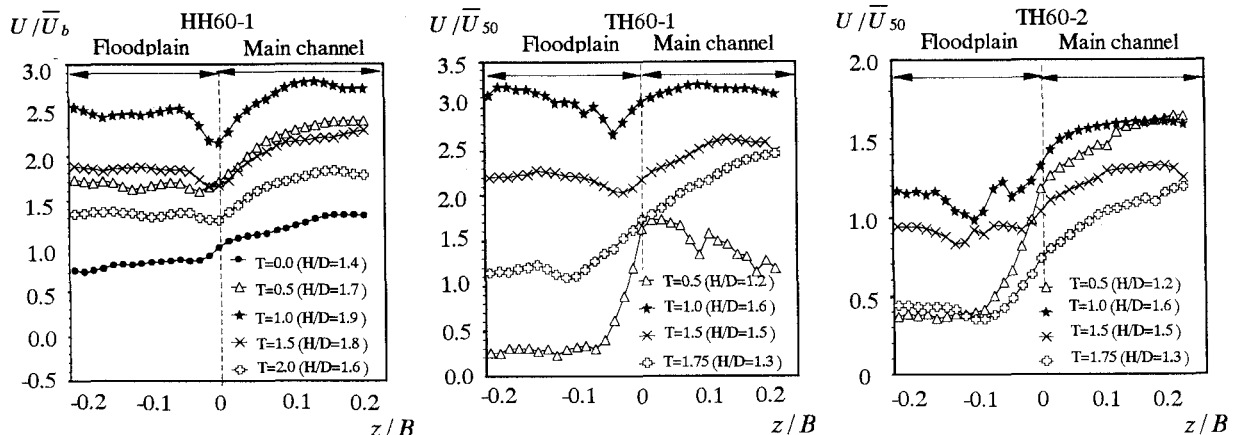


図-6 主流速の横断方向分布

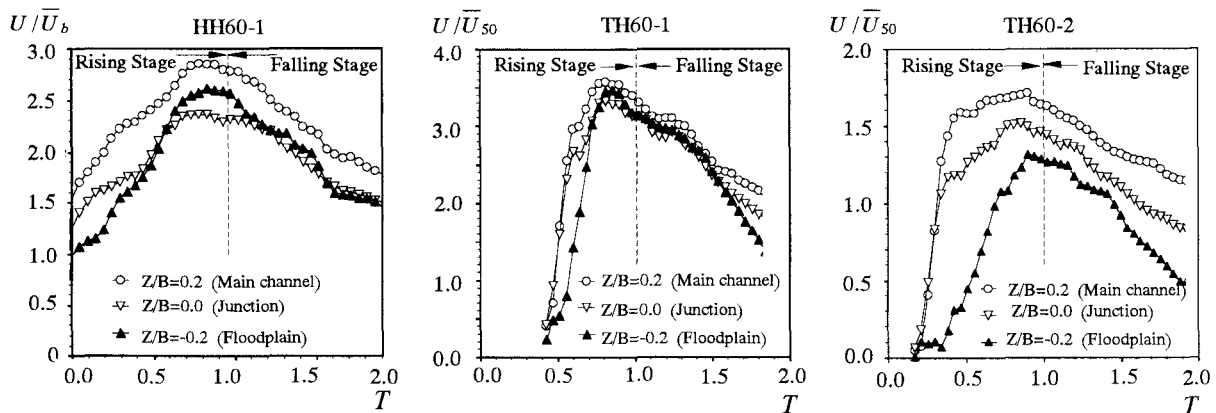


図-7 代表点の時系列主流速分布

をもつ水平渦が観測される。このようにケースTH60の増水期では、減水期に比べて渦構造が不安定となるが、これが氾濫による影響か、非定常性によるものかは現段階では特定することが難しく、今後計測ケースをふやして検討したい。

図-4(c)にケースTH60の高水敷底面近くでの計測断面TH60-2 ($y/D = 1.1$)における瞬間流速ベクトルを示す。 $T = 0.5$ では境界部付近に1列の水平渦構造がみられる。 $T = 1.0$ では、水平渦はやや低水路側に存在する。一方、高水敷側では、水平渦は完全には発達していない。減水期の $T = 1.5$ と $T = 1.75$ では、再

び境界部付近に1列の水平渦がみられる。

(3) 渦列の発生、発達過程

図-5に前節で観察された各ケースにおける渦列中心の横断方向位置の時間変化を示す。右回りの強い回転をもつ渦が存在する領域では正の渦度、左回りの強い回転をもつ渦が存在する領域では負の渦度の極大領域がそれぞれ分布する。連続撮影画像から解析された渦度分布・流速ベクトルをもとに渦列の中心位置を求めた。渦度分布と流速ベクトルの両者から判別が可能なものを「発達した渦」と定義した。また、水平渦構造が認めにくい時間ステージを

「遷移領域」と定義した。HH60-1ではベースフロア時において境界部付近でみられる単列水平渦は流量増加に伴い低水路側へと移動する。また、高水敷上ではベース時には水平渦がみられない。かぶり水深が増加すると遷移領域を経て、水平渦が完全に発達し、ピーク時 ($T=1.0$) には水平渦が2列構造になる。減水期には増水期と逆の挙動を示し、水深低下にともなう高水敷の水平渦が不明瞭となる。さらに低水路側の水平渦が境界部に移動し、単列構造に戻る。TH60-1の増水期では氾濫にともなう乱れが強く、明瞭な渦が観察されにくい。時間の経過に伴って流れが安定するとHH60-1と同様の傾向がみられる。TH60-2では水深ピーク時においても境界部付近に1つの渦列が存在していることがわかる。これは水深が増加しても河床抵抗のために主流速の横断方向構造がほとんど変化せず、単一のせん断不安定が生じるためだと考えられる。

以上を統合的に考察すると、かぶり水深が小さい時には単列水平渦が境界部付近に発生し、かぶり水深が増加すると、この水平渦は低水路側に移動する。同時に高水敷上にも新たに水平渦が発生し、組織渦は2列構造となる。また渦列の横断方向の移動は、渦同士の相互干渉によるものと考えられる。

(4) 主流速の横断方向分布と水平渦

図-6に主流速の横断方向分布を示す。HH60-1ではベース時の断面平均流速 $\bar{U}_b$ で、TH60-1とTH60-2では $T=0.5$ における断面平均流速 $\bar{U}_{0.5}$ でそれぞれ無次元化してある。HH60-1のベース時ではかぶり水深が浅いために高水敷・低水路間で大きな流速差がみられる。このとき主流速の横断分布の変曲点は境界部付近に1つ存在する。この変曲点不安定性が $T=0.0$ と $T=0.5$ において水平渦が境界付近で単列構造となる原因だと考えられる³⁾。一方、ピーク時 ($T=1.0$) には境界部付近で分布の落ち込みが存在する。これはかぶり水深の増加に伴い境界部付近に2次流の影響が大きくなるためである³⁾。このとき分布曲線の変曲点は低水路側と高水敷側の両方に存在するため、水平渦が2列になるものと考えられる。TH60-1でも、HH60-1と同様の傾向をもつことがわかる。TH60-2では、全時間ステージにおいて低水路と高水敷間の主流速に大きな差が見られる。すなわちHH60-1およびTH60-1と異なりピーク時においても変曲点は1つである。これは底面抵抗の影響が強く、ピーク時においても高水敷上の流速が上昇しないためである。この結果、TH60-2では全期間において水平渦は単列構造を保つ。図-7に高水敷中央部 ($z/B=-0.2$)、境界部 ($z/B=0.0$)、低水路中央部 ($z/B=0.2$) における無次元主流速の時系列変化を示す。すべての計測ケースにおいて、主流速のピークの後に水深のピークが現れており、主流速と水深の時間変化には位相差が存在することが確認できる。これは洪水流に特有の現象であり、実河川洪水流においてもループ特性として知られている。

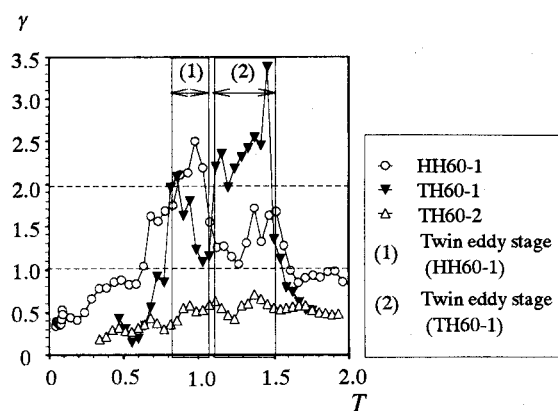


図-8 判別パラメータ γ 分布

HH60-1とTH60-1では、水深上昇に伴い高水敷上 ($z/B=-0.2$) の主流速が境界部の主流速を上回る。TH60-2では、このような主流速の逆転現象は起こらない。この主流速の時間変化特性からも主流速の横断方向分布における変曲点構造の変化が示唆される。

(5) 水平渦構造の判別

池田ら⁹⁾はReynolds方程式を用いた線形不安定解析を行い、主流速分布の変曲点不安定性によって水平渦が発生することを明らかにした。これと本研究のこれまでの結果から、水平渦の時間変化特性は主流速の横断分布によって支配されると考えられる。そこで、本節では低水路と高水敷の主流速差に着目し、時間変化する水平渦構造を判別するための指標を提案する。式(2)に渦構造判別パラメータを定義する。

$$\gamma = \frac{u_m - u_j}{u_m - u_f} = \frac{u_j - u_m}{u_f - u_m} \quad (2)$$

ここで u_m は低水路中央部の瞬間流速、 u_j は境界部上の瞬間流速、 u_f は高水敷中央部の瞬間流速である。 $\gamma < 1$ のとき、主流速分布は低水路から高水敷に向かって減少する。一方、 $\gamma \geq 1$ では、境界部で凹型の分布となる。すなわち境界部での落ち込みが顕著になるにしたがって γ の値が大きくなる。図-8は水平渦構造を判別パラメータで示したものである。なお図-5をもとに渦の発生領域も併示した。図-8から、 $\gamma > 2$ となる時間帯と水平渦が2列構造になる時間帯がおおむね一致することがわかる。また $\gamma < 1$ となる時間帯では、池田ら⁹⁾が示したせん断不安定による単列水平渦が境界部で発生する。

(6) レイノルズ応力分布

図-9はHH60-1の横断方向レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の分布を時系列に示す。これらはベース時の平均流速で無次元化してある。 $T=0.0$ では境界部付近で正の極大値をもつ。 $T=1.0$ では低水路側で正の極大値、高水敷側で負の極大値をそれぞれもつ。これらの特性は水平渦構造と対応している。すなわち、 $T=0.0$

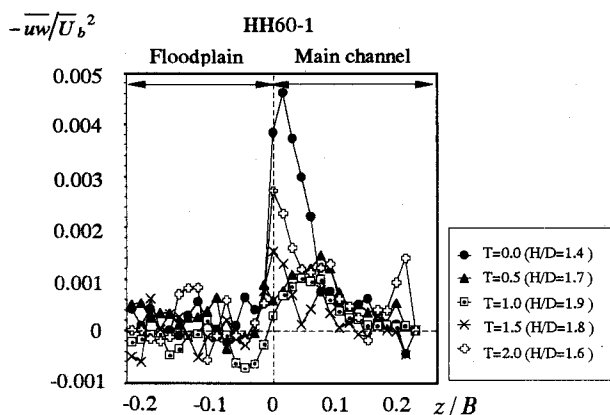


図-9 ケースHH60の横断方向レイノルズ応力分布

では境界部付近に単列水平渦が存在し、運動量輸送が活発であることがわかる。一方、 $T = 1.0$ では低水路側と高水敷側に逆向きの2列の水平渦が存在し、境界部ではレイノルズ応力が小さくなり運動量輸送特性はベース時($T = 0.0$)の構造から大きく時間変化する。

4. 非定常な複断面流れの水平渦モデル

図-10は本研究で得られた結果をもとに複断面開水路乱流にみられる水平組織渦の非定常変化特性を模式的に示したものである。ベース時には低水路と高水敷の主流速差が大きく、境界部に単列水平渦が発生する。高水敷への氾濫直後は乱れが強く、水平渦は不明瞭であるが、水深増加に伴って境界部付近の2次流が卓越し、主流速の横断方向分布は境界部付近で凹型にくぼむ。このため高水敷側では、新たな水平渦が発生し、水平渦は2列構造となる。この時、2つの渦列は干渉し、境界部にあった渦列は低水路側に移動する。減水期では、かぶり水深の低下とともに高水敷上の水平渦は消滅し、低水路側の渦列が境界部に移動するとともに、増水開始前のベース時の状態に戻る。

5. おわりに

本研究は、PIVを用いて流量が三角波的に増減する非定常な複断面開水路を乱流計測し、水平組織渦構造の時間変化特性を実験的に解明したものである。以下に本研究で得られた主要な結果を示す。

1)水深変化する非定常な複断面開水路流れでは、かぶり水深が浅いベース時には境界部付近に1つの大規模水平渦が存在する。水深の増加に伴い、水平渦は低水路側に移動する。同時に高水敷側では不規則な乱れが発生し、水平渦へと発達する。その結果、かぶり水深の大きなピーク時には2列の水平渦が観察される。

2)高水敷底面付近の計測面では、かぶり水深の大きなピークフロー時でも河床抵抗が強いいため、水平渦

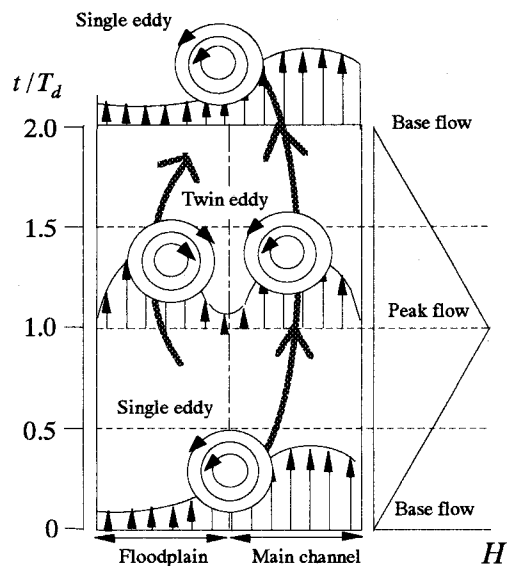


図-10 水平渦発生・発達の概要図

構造は1列である。

3)水平渦構造の判別パラメータ γ を提案し、主流速分布と水平渦の時間変化特性の関係を解明した。

4)ベース時の境界部には、1列の水平渦が存在し、低水路と高水敷間の運動量輸送が極大値をもつ。ピーク時には低水路および高水敷にそれぞれ逆回転をもつ水平渦が存在し、運動量輸送特性が変化する。これは横断方向レイノルズ応力の分布と対応する。

今後は、さらに計測断面を増やし、水平渦の発生周期や空間的配置に着目し、三次元特性を解明したい。

謝辞：本研究は笹川科学研究助成のもとで行われたものである。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) Sellin, R.H.J.: A Laboratory Investigation into the Flow in the Channel of a River and that Over Flood Plain, *La Houille Blanche*, No.7, pp.22-26, 1964.
- 2) 石垣泰輔, 今本博健: 可視化法により複断面開水路流れの3次元構造に関する研究, 土木学会論文集, No.515/II-31, pp.45-54, 1995.
- 3) 池田駿介, 村山宜義, 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, No.509/II-30, pp.131-142, 1995.
- 4) 池田駿介, 空閑健: 直線複断面開水路流れに発生する大規模水平渦列の安定性と運動量輸送に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.588/II-38, pp.91-102, 1997.
- 5) 橋津家久, 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.
- 6) 池田駿介, 太田賢一, 長谷川洋: 側岸部植生境界の周期渦の発生機構, 土木学会論文集, No.443/II-18, pp.47-54, 1992.

(2002. 9. 30受付)