

水深変化する非定常な複断面開水路流れの 3次元乱流構造に関する研究

襦津家久¹・山上路生²・坂根由季子³

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 修士(工) 京都大学大学院 環境地球工学専攻 博士後期課程 (同上)

³正会員 修士(工) (株)野村総合研究所

水深が時間的に変化する非定常な複断面開水路流れは水工学・河川工学上で最も重要な流れの一つであり、その乱流構造を解明することは不可欠である。従来多くの研究によって非定常な単断面開水路乱流の鉛直2次元特性が明らかにされて来た。しかしながら非定常な複断面開水路乱流の3次元特性に関しては未だに不明な点が多い。我が国の河川の多くが複断面形状を有していることを考えると、非定常な複断面流れの水理特性を3次元的に解明することは治水および河川環境上できわめて重要である。そこで本研究では、非定常な複断面開水路流れをレーザー流速計で乱流計測して、その3次元構造を解明し、内部構造の現象モデルを提案する。

Key Words : unsteadiness, compound open-channel, LDA, secondary currents, turbulence

1. はじめに

我が国の自然河川の特徴として、ベース時およびピーク時における流量の差が著しいことすなわち河況係数が大きいことが挙げられる。そこで近年における河川断面形状には、治水機能を十分に有しながら、生態系環境や河川敷の利用に有利な形状が求められている。このため、複断面形状が注目されており、多くの河川に適用され、また複断面河道の抵抗則も検討されている¹⁾。

複断面開水路流れに関する研究は、低水路および高水敷における境界付近の乱流構造や2次流構造が実験的に研究された^{2),3)}。池田ら⁴⁾は、水平渦の安定性と2次流の関係を実験的に研究した。数値計算的研究では、平面2次元のLESモデル⁵⁾や平面二層モデル⁶⁾の開発によって大規模な水平渦構造の再現が可能となり、また代数応力モデル(ASM)^{7),8)}やLES⁹⁾を用いた3次元乱流計算で2次流の再現とその生成機構が予測されている。さらに浮遊砂輸送の検討も行われている¹⁰⁾。最近、池田ら¹¹⁾は、SDS-2DHモデル⁵⁾を用いた数値計算と水理実験の双方から、浮遊砂濃度と組織渦構造の関係や浮遊砂の横断方向の輸送メカニズムについて考察している。

以上のように従来の研究により複断面開水路流

れに関する多くの貴重な知見が得られている。しかしながらこれらのほとんどは定常流を対象とした研究である。流量が時間および空間的に変化する実河川を想定する場合には、定常単断面開水路流れにはみられない、時間的・空間的に変化する水深や流量の非定常効果や流水断面変化効果を十分に解明しておく必要がある。最近では、複断面河道のハイドログラフの非定常効果を検討した例がある¹²⁾。一方2次元(2-D)の非定常開水路乱流の研究も行われ、その非定常効果が実験的に解明され¹³⁾、またこの数値計算的検討もされている¹⁴⁾。

以上のことを鑑みて、著者らは上述の2次元の非定常開水路乱流の次のステップとして、3次元(3-D)の非定常な複断面開水路流れの乱流計測を試みた¹⁵⁾。複断面ベース流から複断面ピーク流に変化する比較的遷移の小さな流れ場を対象とするにとどまり、また2次流構造にも言及していない。これは非定常の3次元乱流計測がかなり困難で、計測技術の向上が必要であったからである。その後、レーザー流速計(LDA)による3-D計測技術をマスターして、本研究では単断面から複断面へと水深が時間的に変化する複雑な開水路の乱流計測を行い、その3次元乱流構造を解明するものである。

表-1 実験ケース

case	H_b (cm)	H_p (cm)	B_f/B	H_b/D	Q_b (l/s)	Q_p (l/s)	Um_b (cm/s)	Um_p (cm/s)	T_d (s)	$\alpha(\times 10^{-3})$
HH60	7.5	10.5	0.5	1.5	2.1	14.4	10.5	45.0	60	1.80
HH120	7.5	9.5	0.5	1.5	2.1	7.3	10.5	26.0	120	0.91
TH60	4.0	8.3	0.5	0.8	2.3	13.8	28.8	59.4	60	1.62
TH120	4.0	8.0	0.5	0.8	2.3	13.8	28.8	62.7	120	0.72

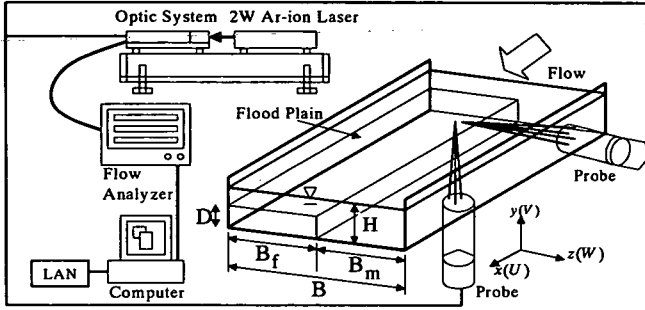


図-1 実験装置

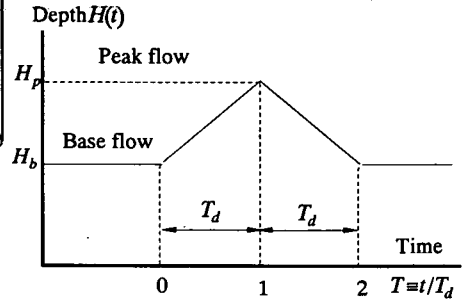


図-2 水深の時間変化

2. 実験装置と測定ケース

(1) 実験装置と計測方法

図-1 に本研究の実験装置を示す。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。この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。3次元座標系の x 軸、 y 軸および z 軸は、それぞれ流下方向、鉛直方向および横断方向である。また、 x 軸、 y 軸および z 軸のアンサンブル平均流速をそれぞれ U 、 V および W とし、これらの平均値からの変動成分をそれぞれ $u(t)$ 、 $v(t)$ および $w(t)$ と定義する。流量 Q はコンピュータ制御システムで与えられ¹³⁾、今回は三角波を与えた。乱流計測には、4ビーム2成分アルゴンイオンレーザー流速計(LDA)を組み合わせて使用した。上端から約 6m 下流の横断面内を不等間隔に計 250~360 点で計測した。時間変化する水深の測定には超音波波高計 3 台と容量式波高計 1 台の計 4 台を用い、LDA と同時計測した¹⁵⁾。

本研究で用いたアンサンブル平均成分と乱れ成分の分離方法は、2次元流解析と同様の周波数領域法を適用した¹³⁾。

(2) 測定ケース

表-1 に水理条件を示す。図-2 は水深 $H(t)$ の時間変化の模式図である。ベース時からピーク時までの増水時間を T_d と定義する。なお、 Um は断面平均流速、添字 b および p はそれぞれベース時、ピーク時を示す。非定常効果を示すパラメータとして、次の α を採用する¹³⁾。

$$\alpha = \frac{1}{U_c} \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{U_c} \frac{H_p - H_b}{T_d} \quad U_c = \frac{Um_b + Um_p}{2} \quad (1)$$

本研究では非定常効果を明白にするため、実河川で観測される洪水流よりも十分大きな α とした(洪水河川の 100 倍のオーダー)。この非定常効果を検討するため、 T_d は従来の鉛直 2 次元の計測ケース¹³⁾ で用いた 60 秒と 120 秒の 2 通りを設定した。各ケースともベース時の水深 H_b に基づいて下流端ゲートを微調節した。後述するように水深の時間変化に及ぼすゲートの影響は完全には無視できないが、測定位置は下流ゲートから 4 m 以上も離れており、流れの構造に及ぼすゲートの影響は小さいと思われる。

表-1 のケース HH は複断面から複断面へと遷移する流れ、一方、ケース TH は単断面から複断面に遷移する最も注目すべき流れである。両ケースの比較から断面変化効果が解明されると期待できる。

3. 実験結果とその考察

(1) 流速と水深の時間変化

図-3 に以下の考察で用いる測点を示す。図-4 は高水敷中央(図-3 のラインA)と低水路中央(ラインD)における水深の時間変化を比較したものである。ピーク水深 H_p はラインDでの値である。水深変化 $\Delta H(t)$ をその ΔH_p で無次元化した。横軸の時間軸は増水時間 T_d による無次元時刻 $T = t/T_d$ をとっている。 $T = 0.0$ は水位増加が始まる時刻、 $T = 0.5$ は水位増加の時間的変化が最大になる増水期の代表的時刻、 $T = 1.0$ は水深がピーク水位の時刻、 $T = 1.5$ は減水期の代表的な時刻および $T = 2.0$ は流量 Q が再びベースフローに戻る時刻である。HH60 では高水敷と低水路の水深の時間変化はほぼ一致しており、横断方向(z 軸)の水位差は確認されなかった。一方、単断面から複断面へ遷移するケース TH60 では低水路と高水敷水位の間にはピーク時刻の位相差はないが、複断面に遷移直後の $T = 0.2$ から $T = 0.6$ にかけて低水路の方が高水敷よりも水位が大きい。逆に減水期では高水敷水位の方が大きいことがわかる。これは、増水期で低水路から高水敷に向う横断流れが、逆に減水期では高水敷から低水路に向う流れが存在することを示唆し、注目に値する現象である。同様の現象が、大型実験水路や円山川でも観測されている¹²⁾。なお、 $T = 2.0$ で ΔH がゼロに戻らないのは下流端のゲートの影響とも考えられ、10m 水路が有限長のためであろう。

図-5 にケース HH60 の低水路における点 d の主流速 U 、水深 H および水面勾配 dH/dx の時間変化を示す。まず最初に dH/dx のピークが現れ、次に U のピーク、最後に H のピークが現れ、これらの水理量の間には位相差が存在する。

図-6(a)および(b)にそれぞれケース HH と TH における高水敷と低水路の水深変化 ΔH と流速 U の関係を示す。a 点は高水敷中央部 ($z/B = 0.25$) で d 点は低水路中央部 ($z/B = 0.76$) の測点である(図-3 参照)。両ケースとも計測位置および非定常性に関係なく反時計回りのループを描く。このループ特性は、図-5 に示したように主流速と水深の変化の位相差に起因する。また非定常性が大きいケースの方が小さいケースよりもループ面積が大きい。増水期(Rising-stage)では非定常性によらず類似した形であるが、減水期(Falling-stage)では非定常性の大きいケースの方がより大きなループになる。単断面から複断面へと遷移するケース TH ではループが閉じていないのが注目される。これはループの計測点が水深

増加領域にあり、増水期と減水期の同一水深時では流速値が異なり、これらの水理量が増水期と減水期では非対称に時間変化することを意味するからである。また、低水路と高水敷では若干ループの大きさが異なるが、あまり大きな差異ではなく、基本的には 2-D 非定常開水路乱流のループ特性¹³⁾と同様であると考えられる。

(2) 2次流分布(V, W)の時間変化特性

図-7 は、ケース HH60 および TH60 の 2 次流 (V, W) をベクトル表示したものである。これらは各ステージの断面最大主流速 U_{max} で無次元化してある。図中に記入した基準のベクトル長は U_{max} の 2% であり、図-7 の 2 次流の速度は定常複断面流れの 2 次流³⁾と同程度であり、レーザー流速計によって初めて計測可能な微流速といえる。ケース HH60 では、全期間において複断面開水路に特有な境界部エッジから低水路の水面側に向かう斜昇流が観察される。この斜昇流の角度に着目すると、HH60 の増水時 ($T = 0.5$) には水面上昇 ($dH/dt > 0$) の影響を受けて斜昇流の傾きが増加し、その後水深の時間変化に応じて斜昇流の傾きは定常ベース時の状態に戻ることがわかる。一方、ケース TH60 ではベース時 ($T = 0.0$) では単断面の高水敷側壁の水面付近に水面渦が観察され、この特性は単断面の 2 次流¹⁹⁾に一致する。 ($T = 0.5$) の増水時には境界部付近で斜昇流が発生するとともに、境界部から高水敷側に横断方向の流れ ($W < 0$) が生じている。ピーク時 ($T = 1.0$) の斜昇流の構造は増水時 ($T = 0.5$) と同様であるが、高水敷上の流れは増水時に比べて小さくなっている。一方減水時 ($T = 1.5$) では高水敷から低水路への流れ ($W > 0$) が発生し、増水時とは逆の特性がみられ、このことは図-4 より推測された特性と一致する。

図-8 左図はケース HH60 および HH120 において、右図で色つけした領域内の斜昇流の傾きの空間平均値を時間 T に対して図示したものである。HH60 では水深変化の増加が最も大きい $T = 0.5$ で斜昇流の傾き θ が最も大きくなり約 70° になる。逆に減水期 ($1.0 < T < 2.0$) ではベース時 ($T = 0.0$) の傾きよりも小さくなる。一方、非定常性の小さな HH120 ではこの傾向が弱く、ほぼ単調に漸減している。このように、斜昇流は非定常効果を受けることがわかった。この斜昇流の方向特性から増水期には低水路から高水敷側への運動量や土砂輸送が活発になり、反対に減水期には高水敷側から低水路への乱流輸送が活発になることが推測される。

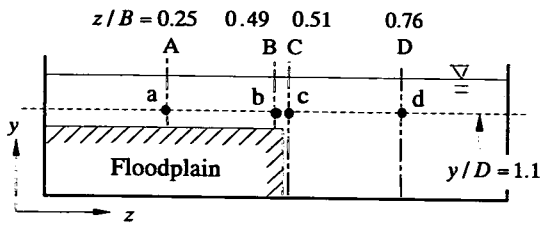


図-3 考察の測点

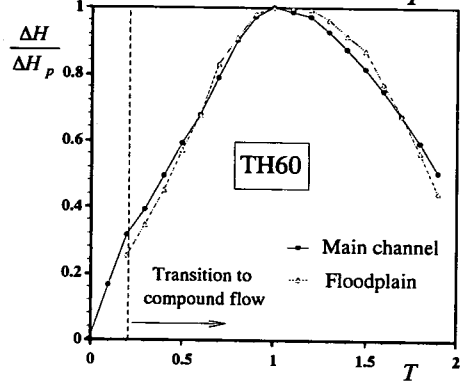
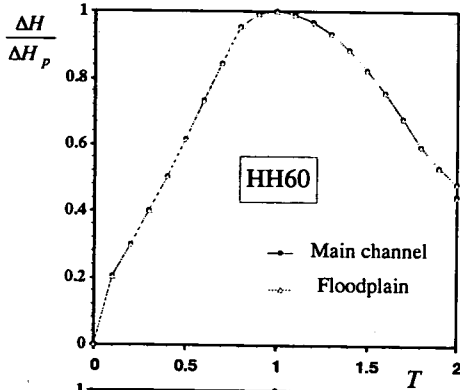


図-4 低水路および高水敷における水深変化の比較

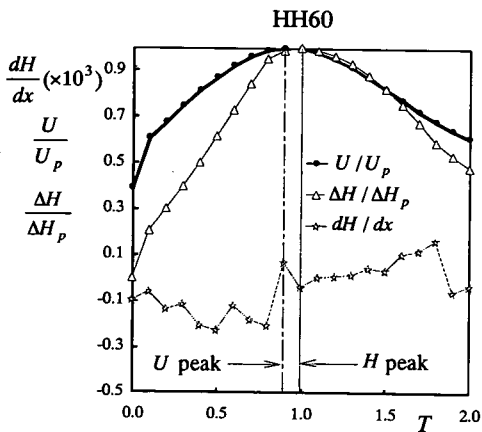


図-5 主流速, 水深および水面勾配の時間変化

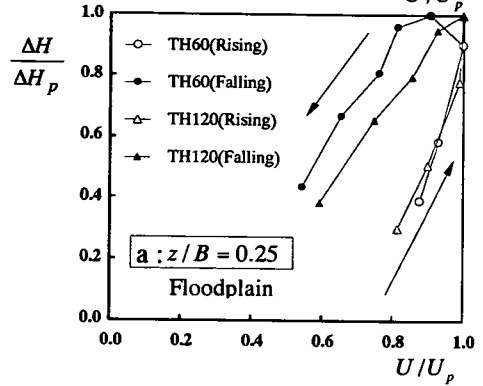
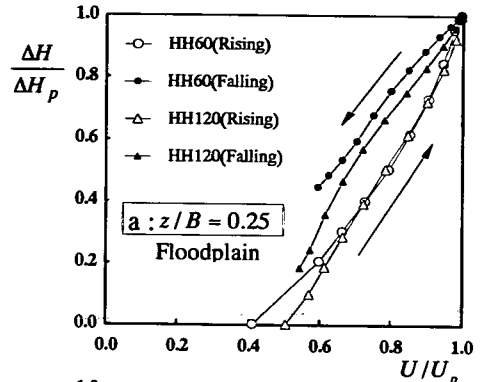


図-6(a) 高水敷上の主流速 U と水深 H のループ特性

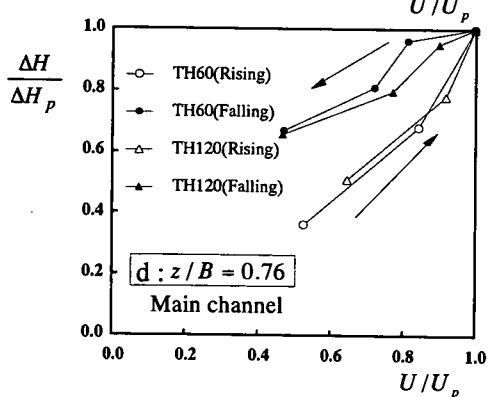
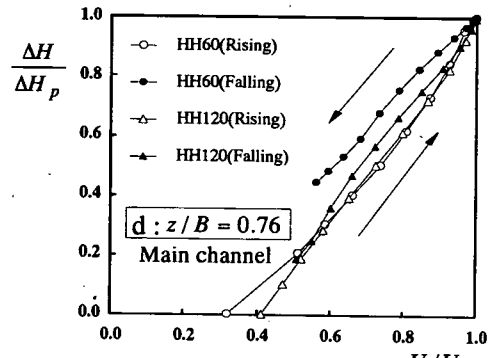


図-6(b) 低水路の主流速 U と水深 H のループ特性

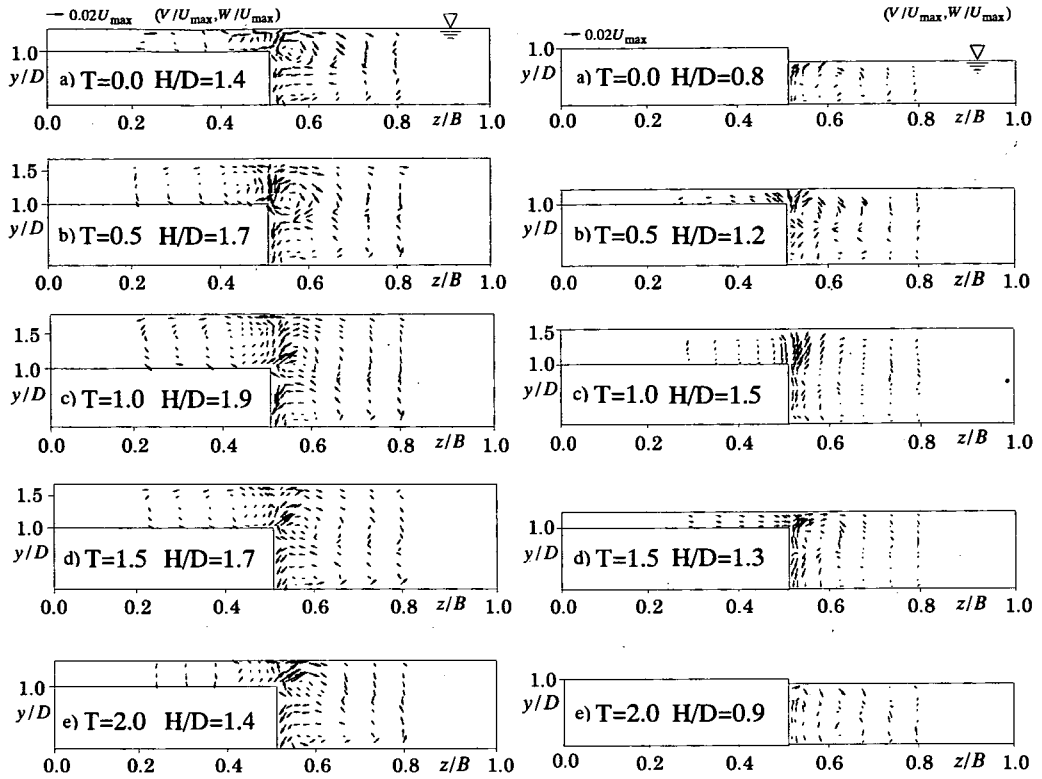


図-7 2次流分布 (左図は HH60 で複断面から複断面への変化, 右図は TH60 で単断面から複断面への変化)

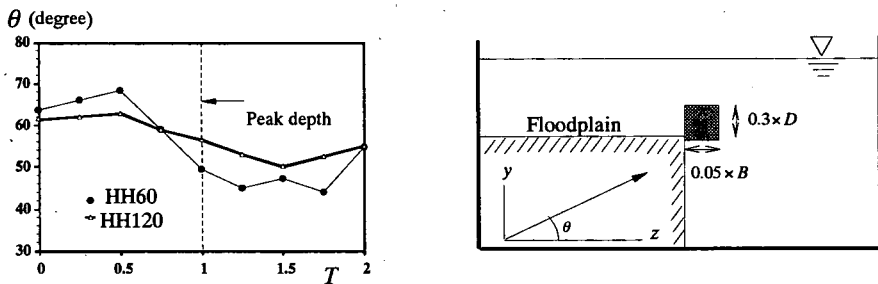


図-8 斜昇流の傾きの変化

(3) 主流速分布の時間変化特性

図-9 は、ケース HH60 および TH60 の各時刻における最大主流速 U_{max} による無次元主流速 U/U_{max} の等値線を示す。これらは図-7 の2次流分布に対応する。HH60 では、ベース時 ($T=0.0$) で高水敷に比べ低水路側がより高速であるが、水深増加に伴いその差が小さくなり、また高水敷と低水路の境界部で主流速分布が斜昇流の影響により低水路側に張り出している。さらに $T=0.0$ 時に低水路中央にある最大主流速点 (図中に \times 印で示す) が増水時 ($T=0.5$) から水深ピーク時 ($T=1.0$) にかけて高水敷方向かつ水

面に移動し、減水時 ($T=1.5$) から $T=2.0$ において再び低水路中央部に戻ることがわかる。一方、TH60 においても $T=1.0$ で境界付近に斜昇流の影響と考えられる張り出し分布が確認される。また $T=2.0$ には最大主流速点の降下が顕著となるが、これは減水期において高水敷上の2次流によって高水敷から低水路に低速流体が輸送されることに起因するものと思われる。図-10 は TH60 の $y/D=1.1$ における U の時空間変化を示す。なお $T=0.5$ の横断平均値 $\bar{U}_{0.5}$ で無次元化してある。複断面流れに遷移して直後の $T=0.5$ では高水敷と低水路では U に大きな差があるが、流

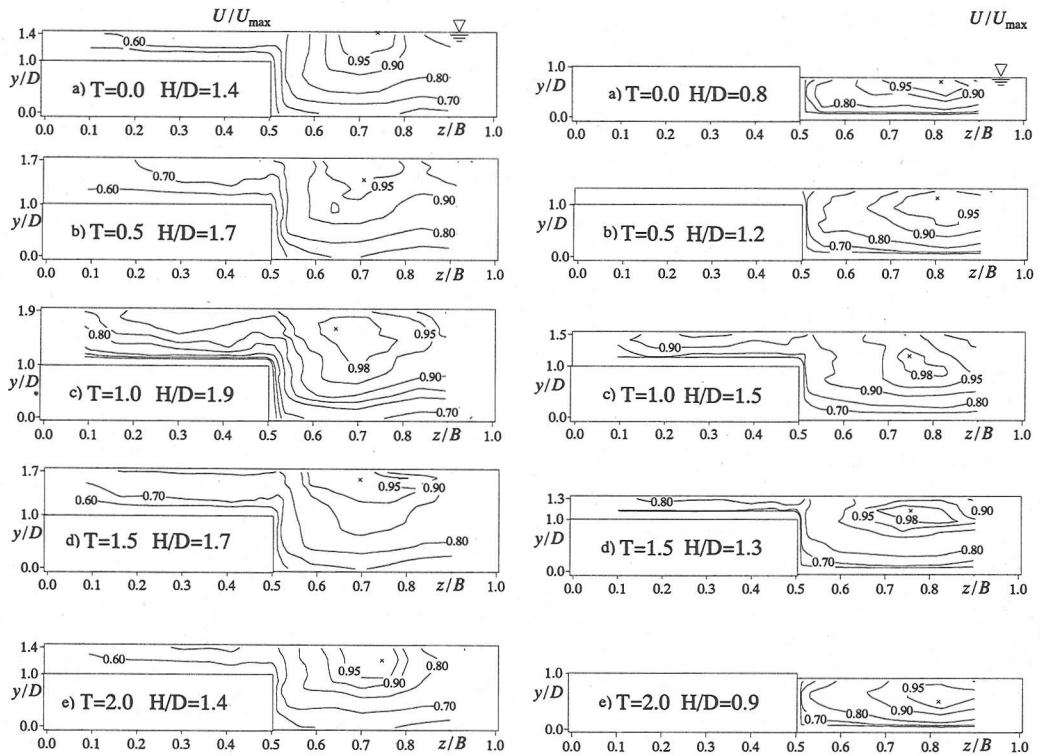


図-9 主流速分布の時間変化 (左図はHH60, 右図はTH60)
(×印は最大主流速点の位置を示す)

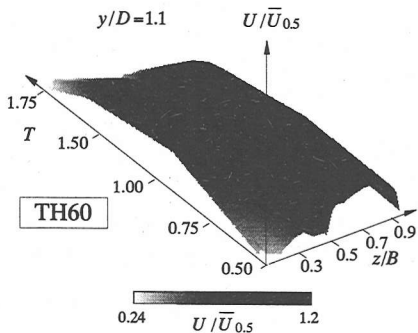


図-10 主流速分布の時空間変化の3-D表示

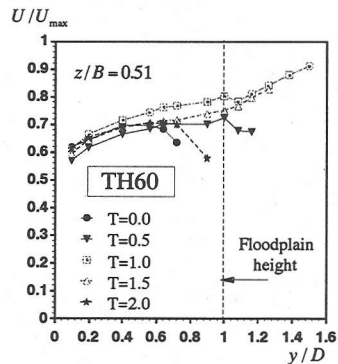


図-11 境界部における主流速の鉛直分布

量増加によって水深が上昇すると高水敷と低水路の主流速差は次第に小さくなる事が確認できる。

図-11はTH60における低水路の境界部近傍のライン(図-3の $z/B = 0.51$ のラインC)に沿う U の鉛直分布である。 $T = 0.5$ では水深が増加し複断面流れとなり、高水敷高さ($y/D = 1$)まで流速は漸増する。同様に水深ピーク時($T = 1.0$)および減水時($T = 1.5$)では、 U の鉛直分布は底面から高水敷高 $y/D = 1$ の領域までは漸増するが、高水敷高さ付近から急増するようである。

(4) 摩擦速度と底面せん断応力の時間変化特性

図-12にHH60とTH60における図-3中の $z/B = 0.25, 0.48, 0.51, 0.75$ の4つの測点での摩擦速度 U_* の時間変化を示す。摩擦速度 U_* は次の滑面対数則によって流速分布 $U(y)$ から評価した。

$$U/U_* = \frac{1}{\kappa} \ln(yU_*/\nu) + A \quad (2)$$

ここで κ はカルマン定数、 A は積分定数である。従来の2次元計測結果から非定常性が $\alpha < 0.002$ の場合、カルマン定数は非定常時においても定常流と

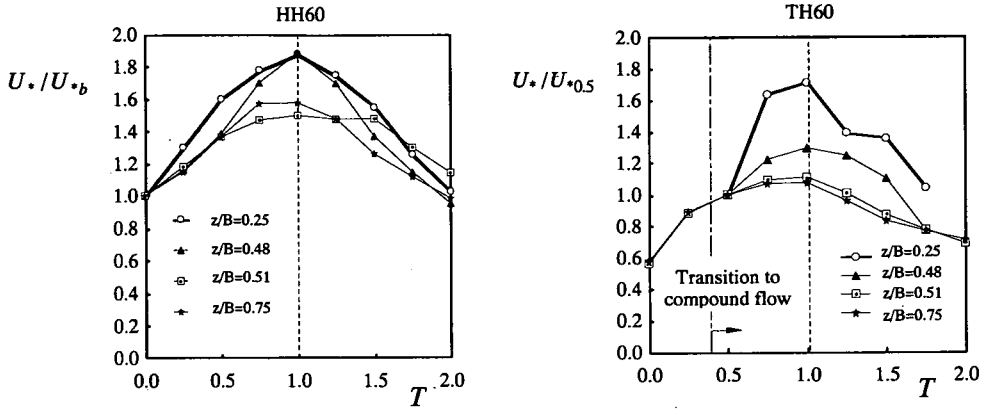


図-12 摩擦速度の時間変化特性 (左図はHH60, 右図はTH60)

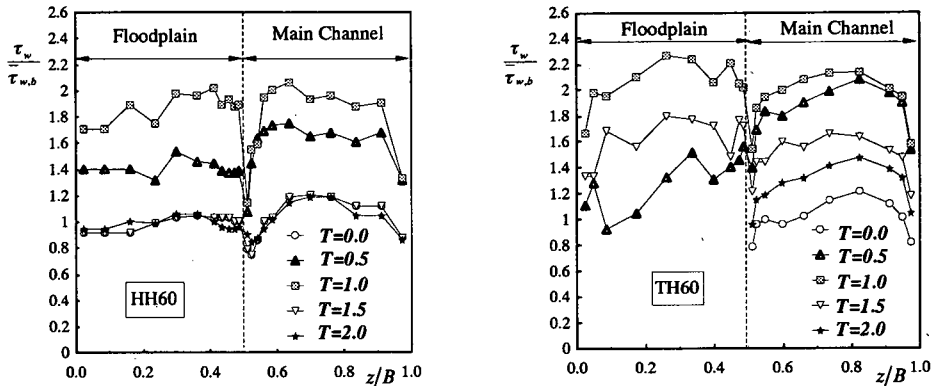


図-13 底面せん断応力の横断分布の時間変化特性 (左図はHH60, 右図はTH60)

同様にほぼ $\kappa = 0.41$ の普遍値となることが報告されている¹⁶⁾。表-1の本実験ケースもこの場合に相当するので、全時間ステージにおいて $\kappa = 0.41$ を適用し、摩擦速度を評価した。HH60に関しては $T = 0.0$ の摩擦速度 U_{*0} で、またTH60では $T = 0.5$ の摩擦速度 $U_{*0.5}$ で無次元化してある。両ケースとも流量の増減に対応して U_{*} は変化するが、低水路よりも高水敷の方が変化が大きい。この傾向はケースTH60においてより顕著であり、複断面流れへの遷移直後に高水敷上の摩擦抵抗が急激に増加することは注目される。これは定常な浅水複断面流れの抵抗急増特性¹⁾と同じ現象と考えられる。一方、減水期には比較的緩やかに減少することが図-12よりわかる。

図-13は、HH60およびTH60の底面せん断応力 $\tau_w = \rho U_*^2$ の横断方向分布を時系列に示したものである。 τ_w はベース時 ($T = 0.0$) における横断方向の平均値 τ_{w0} で無次元化してある。両ケースともに境界部の低水路側で極小値をもち、低水路中央部で極大値をもつ分布を示している。ピーク水深に近づくにつれ

低水路と高水敷の値の差が小さくなる。特にTH60では高水敷への氾濫直後 ($T = 0.5$) から水深ピーク時 ($T = 1.0$) にかけて高水敷の τ_w が大きく増加し、 $T = 1.0$ では低水路上の抵抗よりも高水敷上の抵抗の方が大きくなる点は注目される。

(5) 主流方向乱れ強度 u' の分布特性

図-14は、ケースHH60とTH60における断面平均摩擦速度 \bar{U}_* で無次元化した主流方向の乱れ強度 u'/\bar{U}_* の等値線図を時系列に示す。ここで主流方向の乱れ強度 u' は次式で定義される。

$$u' = \sqrt{u'^2} \quad (3)$$

HH60では全期間において、境界部付近 ($z/B = 0.5$) で u' は極大領域をもつ。この特性は増水時 ($T = 0.5$) からピーク水深時 ($T = 1.0$) にかけて最も大きくなることからわかる。流速 U の分布にも同様の傾向がみられ、乱れ強度も斜昇流によって輸送されると考えられる。

TH60の低水路における u'/U_* の分布は、全期間において低水路底面側で極大値をもち、水面に向かっ

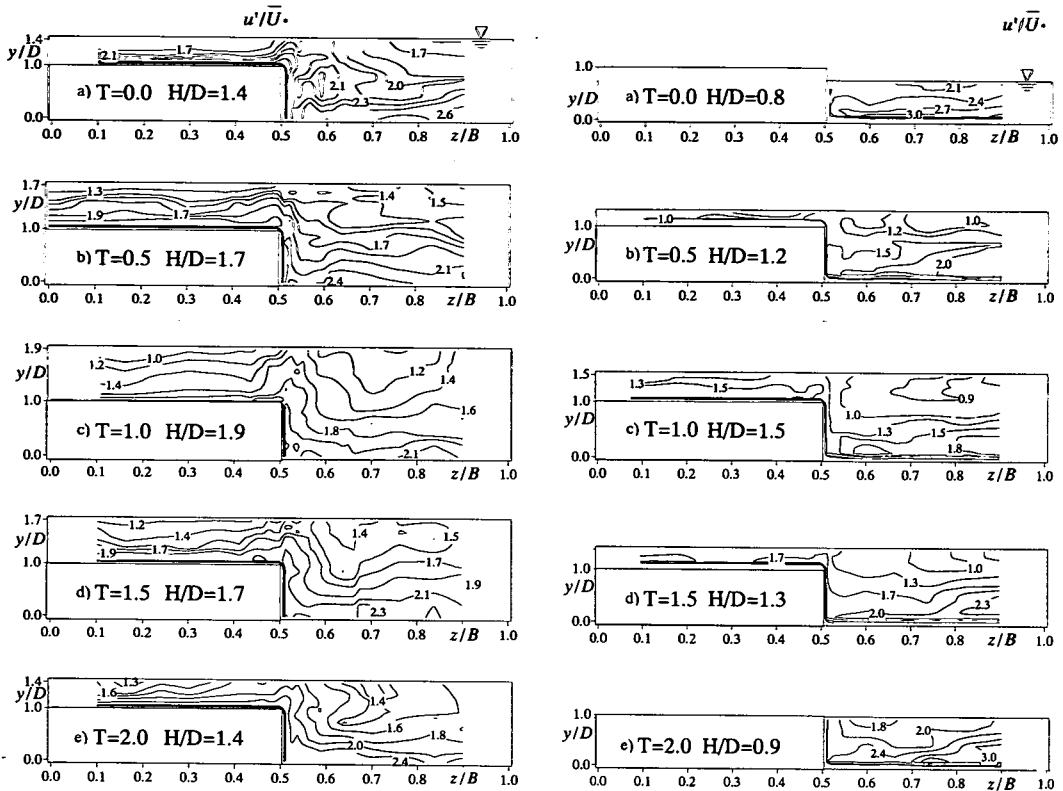


図-14 乱れ強度 u'/\bar{U} の時間変化特性 (左図は HH60, 右図は TH60)

て減少する。また複断面流れへの遷移直後の $T=0.5$ では低水路から高水敷への張り出しが観察される。一方、減水時 ($T=1.5$) には増水時とは反対に高水敷から低水路への張り出しがみられる。このケースからも u' の分布には 2 次流の影響が大きく作用しているものと考えられる。ピーク時刻には境界部付近の 2 次流が小さいためにこのような張り出しは見られない。鉛直方向および横断方向の乱れ強度 v' および w' も解析された。時間的変化特性は、上述の u' とほぼ同様であった。また TH60 に関しては全ステージにおいて境界部側壁の u' 値は低水路河床の値よりも小さい。これは境界部側壁における横断方向の流速シア $\partial U/\partial z$ よりも低水路河床における鉛直方向のシア $\partial U/\partial y$ の方が大きいと考えられる。

(6) 横断方向レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の分布特性

図-15に、低水路・高水敷間の運動量輸送を示す横断方向のレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の分布を時系列に図示した。HH60では全期間において $-\overline{uw}$ は、境界部を境

に高水敷側では負値、低水路側で正値となる。低水路中央部より側壁側 ($z/B > 0.75$) においても負の領域が観測できる。各ステージでのこれらの正負の分布特性はそれに対応する水深一定の定常複断面流れでの特性¹⁸⁾とほぼ一致し、横断方向主流速勾配 $\partial U/\partial z$ と関係していると考えられる。すなわち、境界部付近での $-\overline{uw}$ の正負の分布特性は横断シアに起因し、低水路・高水敷間の運動量交換の指標となっている。また境界部付近 ($z/B = 0.5$) で低水路側に分布が張り出しているが、これは図-7で示した 2 次流によるものと考えられる。次にケース TH60 ではベース時 ($T=0.0$) に $-\overline{uw}$ は単断面低水路の高水敷側壁付近で正の極大値をもちこれらの特性は単断面の特性¹⁹⁾と一致する。一方中央部から水路側壁 ($z/B > 0.75$) にかけて負の分布が広がり、横断方向シア $\partial U/\partial z$ の正負と対応していることがわかる。高水敷への氾濫直後の $T=0.5$ から水深ピーク時 ($T=1.0$) において境界部での $-\overline{uw}$ は、上述の正負特性を呈し、低水路・高水敷間の運動量交換が活発になることが推測され、以下でこれを解析してみる。

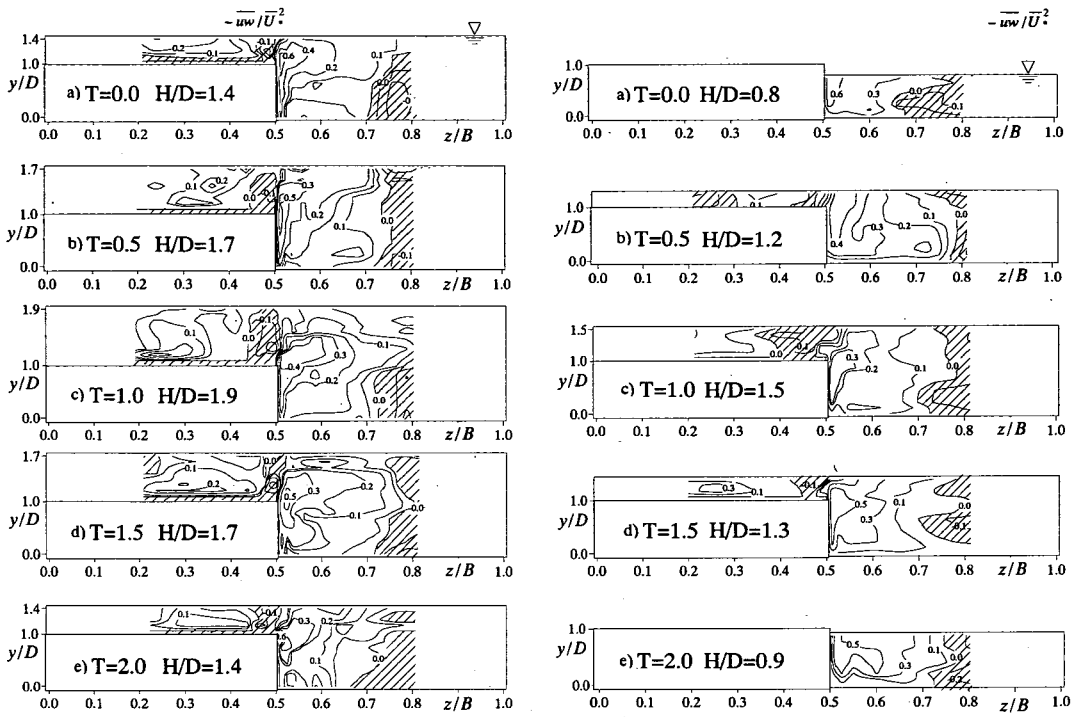


図-15 横断方向レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の分布 (左図はHH60, 右図はTH60)

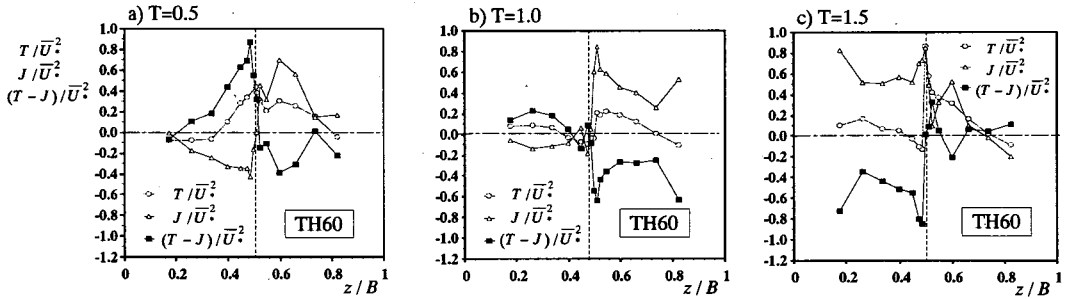


図-16 ケースTH60での τ_w の構成成分の横断方向分布

(7) 底面せん断応力の構成成分

主流方向の運動量方程式を水路床 ($y=0$) から水面 ($y=H$) まで積分すると次式が得られる⁷⁾.

$$\frac{\tau_w}{\rho} = -\int_0^h \frac{\partial U}{\partial t} dy + g I_e h' + \frac{d}{dz} (T-J) h' \quad (4)$$

$$T = \frac{1}{h'} \int_0^h (-\overline{uw}) dy \quad (\text{レイノルズ応力効果項}) \quad (5)$$

$$J = \frac{1}{h'} \int_0^h (UW) dy \quad (\text{2次流効果項}) \quad (6)$$

I_e はエネルギー勾配, 高水敷での h' は高水敷水深 h を, 低水路での h' は低水路水深 H をとる. 式(4)から底面せん断応力 τ_w は横断方向レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の効果を表す T と 2次流効果を表す J によって構成される.

すなわち, 2次流が存在しない2-D流では $J=T=0$ となり当然2-D流の公式と一致する. したがって, J と T の分布を解析すれば3-D乱流構造がある程度解明されると期待される. 図-16はTH60のケースで, T , J および $(T-J)$ の横断方向分布を, 時刻 $T=0.5$, $T=1.0$ および $T=1.5$ について示した. 各々 \overline{U} で無次元化してある. $T=0.5$ では境界部では境界部 ($z/B=0.5$) から高水敷に向かう2次流が発生するため, J は $z/B < 0.5$ で負になる. 一方, T は高水敷上から境界部にかけて大きく増加し, その結果 $d(T-J)/dz > 0$ となる. 反対に境界部から低水路にかけて $d(T-J)/dz < 0$ となり, これらの特性が図-13の τ_w の横断方向の分布特性を説明で

きる。すなわち、 $T=0.5$ の τ_w は高水敷から境界部にかけて増加し、境界付近で落ち込みがみられるが、式(4)から $(T-J)$ の分布特性で説明できる。 $T=1.0$ では高水敷中央($z/B=0.25$)および低水路中央($z/B=0.75$)で $(T-J)$ の横断方向の変化は小さいが、境界部では大きく減少する。この特性は図-13の実測の τ_w の分布($z/B=0.5$)と一致する。 $T=1.5$ では高水敷上で境界部に向かう2次流が発生するので J は正值となる。また高水敷上では T に比べて J が卓越し $(T-J)$ の分布を決定することがわかる。ただし、 $(T-J)$ の横断方向変化が大きい境界部付近を中心に、 $d(T-J)/dz$ の符号と実測の τ_w の分布は完全には一致しない箇所があり、この原因は現在不明であるが、計測精度の限界かもしれない。

4. 非定常な複断面流れの内部構造モデル

図-17は本研究で得られた知見をもとに複断面河道で発生する洪水流の3次元的な内部構造を模式的に示したものである。(a)はケースTHにみられる単断面から複断面への遷移直後の状態である。このステージでは高水敷と低水路の主流速 U の差が著しく、高水敷と低水路の境界部にはせん断不安定性により一列の平面渦が発生することが理論的・実験的に池田らによって示されている^{4),11),17)}。斜昇流などの2次流も発生するが、平面渦の方が卓越し低水路の流れを支配すると考えられる。(b)はケースHHに相当する高水敷への氾濫からさらに水深が上昇するステージである。境界部付近の斜昇流が卓越し、低速流体を水面側に輸送するため横断方向の流速分布は、図示のように境界部付近で凹型にくぼむ。このため二列の平面渦となる¹⁸⁾。また水面上昇にともない斜昇流の向きが鉛直に近づく。一方(c)は減水ステージである。かぶり水深が減少するとともに主流速のシアは(a)で示した氾濫直後のステージに類似した構造になるが高水敷上では低水路へ向かう一方向の2次流($W > 0$)が発生し、土砂などの浮遊物質の一部が低水路側に戻されるものと考えられる。

5. 結論

本研究は、流量が三角波的に増減する非定常な複断面開水路流の乱流計測をレーザー流速計で行い、その水理特性や乱流構造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)複断面から複断面に遷移する流れでは高水敷と低水路水深の時間変化はほぼ一致するが、単断面から

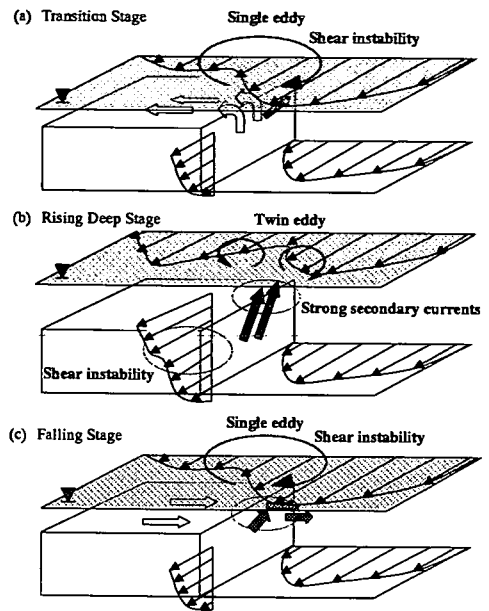


図-17 非定常な複断面開水路流れの内部構造

- 複断面に遷移する流れでは両者に位相差が生じる。特に増水期では低水路水深の方が減水期では高水敷水深の方がそれぞれ大きくなる。これは非定常時の高水敷上にみられる一方向の2次流と関係がある。
- 2)非定常な複断面流れにおいても鉛直2-D流れと同様に主流速と水深のループ特性が見られる。低水路の方が高水敷よりもループ面積が大きくなる。
- 3)2次流構造は定常な複断面流れと異なる特性をもつ。複断面から複断面に遷移する流れでは増水期に斜昇流の傾きが鉛直に近づき、逆に減水期にはベース時よりも角度が小さくなる。この現象は非定常性が大きいほど顕著である。また単断面から複断面に遷移する流れでは増水期に低水路から高水敷への一方向的な2次流が、逆に減水期には低水路に向かう2次流が発生する。
- 4)主流速および乱れの分布は2次流の影響を受け、低水路と高水敷の境界付近では低水路側への張り出し分布が見られる。また最大主流速の位置も大きく移動する。
- 5)摩擦速度の変化は低水路よりも高水敷の方が大きく、水深増加とともに高水敷での摩擦抵抗が卓越する。底面せん断応力の横断方向分布の特性は非定常流れにおいても、乱れと2次流の両方の効果のバランスによって決定される。

今後は乱流モデルを用いた数値計算による再現を行い、ここで得られた結果をさらに詳細に検討していきたい。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 藤田光一: 複断面河道の抵抗予測と河道計画への応用, 土木学会論文集, No.411/II-12, pp.63-72, 1989.
- 2) 今本博健, 石垣泰輔: 複断面開水路流れの斜昇流に関する実験的研究, 水工学論文集, 第34巻, pp.403-408, 1990.
- 3) Tominaga, A. and Nezu, I.: Turbulent structures in compound open-channel flow, *J. of Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol.117, pp.21-41, 1991.
- 4) 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, No.509/II-30, pp.131-142, 1995.
- 5) 灘岡和夫, 八木宏: SDS&2DH モデルを用いた開水路水平せん断乱流の数値シミュレーション, 土木学会論文集, No.473/II-24, pp.35-44, 1993.
- 6) 木村一郎, 細田尚, 村本嘉雄, 安永良: 平面二層モデルによる複断面開水路流れの水平渦運動解析, 水工学論文集, 第40巻, pp.699-704, 1996.
- 7) Nezu, I.: Experimental and numerical study on 3-D turbulent structures in compound open-channel flows, *Flow Modeling and Turbulent Measurements*(eds. C. J. Chen et al.), Balkema, pp.65-74, 1996.
- 8) 杉山均, 秋山光康, 松原珠: 複断面開水路内の乱流構造解析と縦渦生成に関する研究, 土木学会論文集, No.515/II-31, pp.55-65, 1995.
- 9) 佐藤弘行, 河原能久: 運動量方程式に基づく複断面直線開水路乱流における二次流の生成機構の考察, 水工学論文集, 第43巻, pp.75-80, 1999.
- 10) 佐野良久, 野崎一郎, 浜谷拓, 中井正則, 菅和利: 高水敷に樹木を有する複断面直線水路の流れと浮遊砂の輸送について, 水工学論文集, 第35巻, pp.693-698, 1996.
- 11) 池田駿介, 佐野貴之, 福元正武, 河村一弘: 複断面開水路に生じる大規模組織渦と浮遊砂輸送, 土木学会論文集, No.656/II-52, pp.135-144, 2000.
- 12) 渡辺明英, 福岡捷二, Alex George Mutasingwa, 太田勝: 複断面蛇行河道におけるハイドログラフの変形と河道内貯留の非定常2次元解析, 水工学論文集, 第46巻, pp.427-432, 2002.
- 13) Nezu, I., Kadota, A. and Nakagawa, H.: Turbulent Structure in Unsteady Depth-Varying Open-Channel Flows, *J. of Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol.123, pp.752-763, 1997.
- 14) 襦津家久, 牛島省, 山上路生: 水深変化を有する非定常な開水路流れの数値計算, 土木学会論文集, No.691/II-57, pp.63-72, 2001.
- 15) 襦津家久, 山上路生, 坂根由季子: 非定常な複断面開水路流れの乱流構造に関する実験的研究, 水工学論文集, 第46巻, pp.553-558, 2002.
- 16) Nezu, I. and Onitsuka, K.: Turbulent Structures in Open-Channel Flows with Strong Unsteadiness, *2nd Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena*, Stockholm, Vol.1, pp.341-346, 2001.
- 17) 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.558/II-38, pp.91-102, 1997.
- 18) 襦津家久, 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.
- 19) Nezu, I. and Nakagawa, H.: *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR-Monograph, Balkema, Netherlands, 1993.

(2002.3.29 受付)

3-D TURBULENT STRUCTURES IN DEPTH-VARYING UNSTEADY COMPOUND OPEN-CHANNEL FLOWS

Iehisa NEZU, Michio SANJOU and Yukiko SAKANE

A depth-varying unsteady compound open-channel flow is one of the most important flows in hydraulic and river engineering. So, the hydrodynamic characteristics of these flows have to be investigated in detail. Recently, many researches on unsteady rectangular open-channel flow were conducted intensively and thus the important knowledge and database are now available. However, 3-D structure of unsteady compound open-channel flows is not available as yet because it has been much difficult to measure them even with LDA. In this study, 3-D LDA measurements were conducted successfully in depth-varying unsteady compound open-channel flows and then 3-D structures of secondary currents and turbulence were examined.