

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

EXPERIMENTAL STUDY ON TURBULENT STRUCTURES IN AN UNSTEADY COMPOUND OPEN-CHANNEL FLOW

瀬津家久¹・山上路生²・坂根由季子³
Iehisa NEZU, Michio SANJOU and Yukiko SAKANE

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 環境地球工学専攻博士後期課程

³学生員 京都大学大学院 環境地球工学専攻修士課程

A depth-varying unsteady open-channel flow is one of the most important flows in hydraulic engineering. So, the hydrodynamic characteristics of this flow have to be investigated in detail. Recently, most of researches on rectangular open-channel flow were intensively investigated and much valuable and reasonable knowledge are now available. However, as for three-dimensional (3-D) structures of unsteady compound open-channel flows, there is no accurate database as yet. Therefore, in this study, 3-D turbulence measurements with LDA were conducted in unsteady compound depth-varying open-channel flows.

Key Words : *unsteady compound open-channel flow, turbulence, LDA, loop property*

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。この特性は、以下の諸問題を引き起こす。流量が少ない時には、水位および流速の低下により水生生物等の生活環境が悪化し、流量が大きい洪水時には平水時に比べ流量が急激に増大する。したがって、近年における河川形状には、治水防災機能を十分に有しながら、なおかつ水生生物等の生活環境や河川敷の利用に有利な形状が求められている。今日では、その河川形状の一つである複断面形状が注目されており、多くの河川に適用されている。複断面開水路は、低水路および高水敷で構成されている。この構成によって、流量の比較的少ない平水時では、低水路のみに水が流れ、水位がある程度確保できるとともに、水が流れていない高水敷でリクリエーションを行うことができる。一方、洪水時においては、低水路から水路幅の広い高水敷へと流れが移動し、増大する流量に対処できる。このように複断面開水路は治水および環境上において多くの長所を持っている。

ところで、複断面開水路に関する研究は、低水路および高水敷における相互の流れの干渉やそれらの境界付近の乱流構造、低水路から高水敷への物質輸送などを解明するためにこれまでに数多く行われてきた。また木下¹⁾は実河川を航空写真測量

し、複断面河川流における浮遊物質の挙動を平面2次元的に検討している。今本・久下²⁾はHot-film流速計を用いて複断面開水路流を計測し、高水敷の角から低水路側へ斜め上方に向かう2次流(斜昇流)の存在を明らかにした。また、芦田ら³⁾は複断面における横断方向の拡散係数の計算手法を提示し、拡散方程式から浮遊砂濃度分布や堆積量分布について検討した結果、実験的特性をある程度再現することに成功した。瀬津ら⁴⁾は低水路および高水敷の比 H/D を系統的に変化させた複断面開水路流において、レーザー流速計(LDA)を用いて2次流などの横断面内における流況を測定し、さらにPIVによって境界部付近に発生する水平渦および斜昇流の構造解析を行い、2次流および水平渦の運動量交換機構を定性的に明らかにした。

しかしながら、これらの研究のほとんどが定常流を対象としており、流量が時空間的に変化する実河川を想定する場合には、流れ場の非定常特性を把握しておく必要がある。これまでの非定常な開水路流(洪水流)に関する研究は数多く行われているが^{5)~13)}、複断面を対象としたもの^{14)~17)}は数少なく、特に乱れ構造の横断面分布を詳細に高精度計測したものはほとんどみられない。そこで本研究では、流量が三角波的に増減する非定常複断面開水路流(図-1参照)の乱流計測をレーザー流速計で行い、複断面水路における非定常乱流特性の解明を試みる。

表-1 水理条件

h_b (cm)	h_p (cm)	B_f (cm)	B_m (cm)	B (cm)	D (cm)	B_f/B	h_b/D	h_p/D	Q_b (l/s)	Q_p (l/s)	$U_{\max,b}$ (cm/s)	$U_{\max,p}$ (cm/s)	T_d (s)
7.5	9.5	20	20	40	5	0.5	1.5	1.9	2.1	7.3	13.5	28.3	120

h : depth B : width of channel B_f : width of floodplain
 B_m : width of main channel D : height of floodplain Q : discharge
 $U_{\max}$: maximum bulk velocity T_d : duration time between base and peak
suffix b: base flow p: peak flow

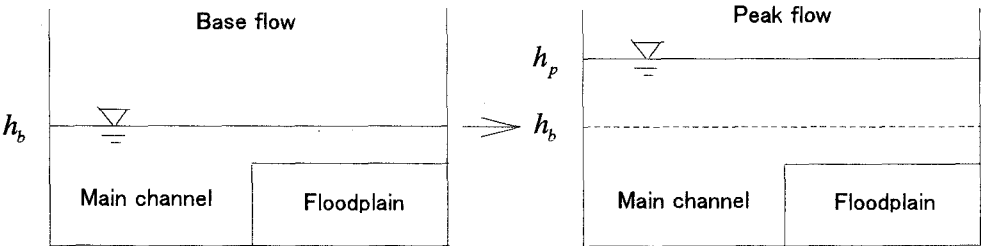


図-1 非定常複断面開水路流れのイメージ図

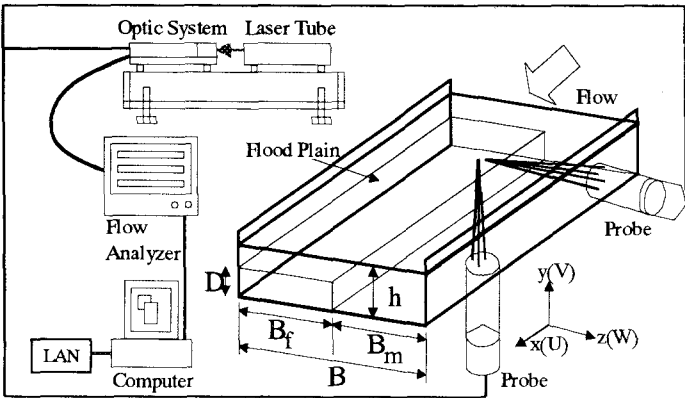


図-2 実験装置と座標系

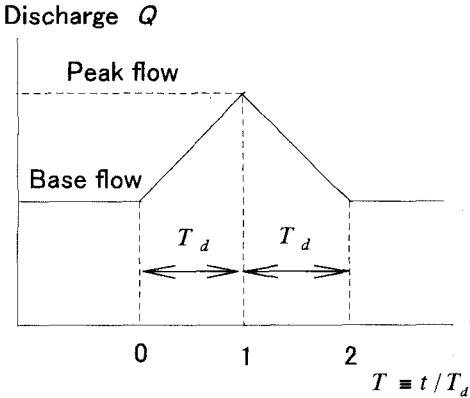


図-3 流量ハイドログラフ

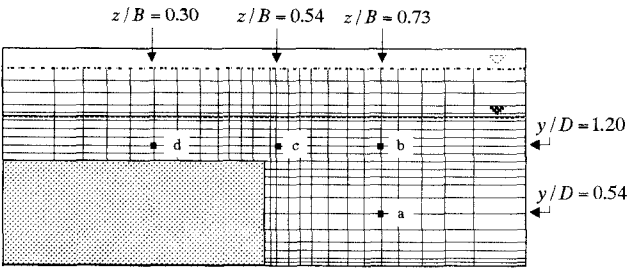


図-4 流速測定点

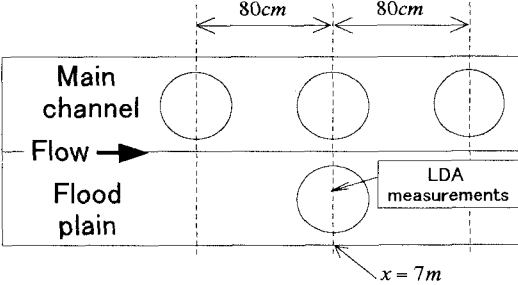


図-5 水深測定点

2. 実験概要および解析手法

図-2に本研究における実験装置を示す．本計測で用いた水路は，全長10m，全幅 $B = 40\text{cm}$ の変可勾配型循環式直線水路である．この水路の左岸側にアクリル板を用いて高水敷を設置し，複断面水路を構築した．図-2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，低水路水深を表している．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，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．低水路の測定部は長さ3mの強化ガラス製であり，底面および両側壁からのレーザー光の入射が可能

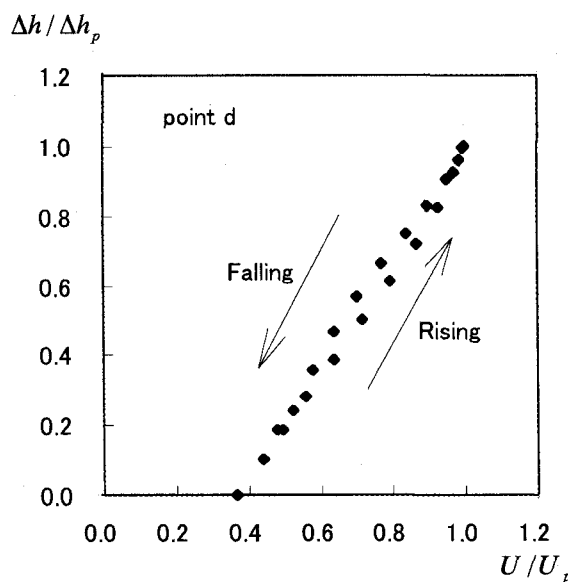
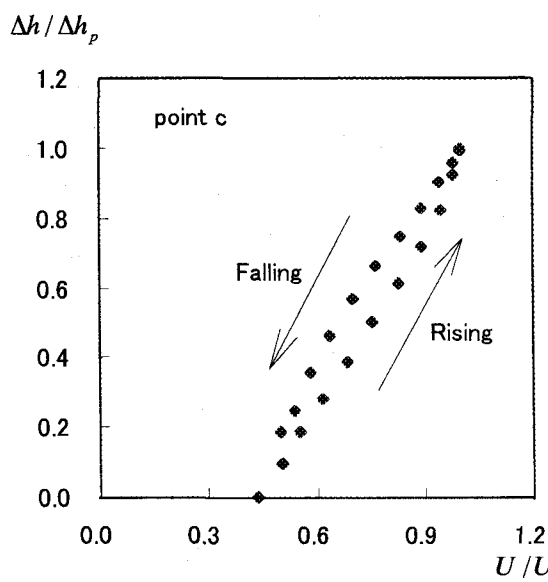
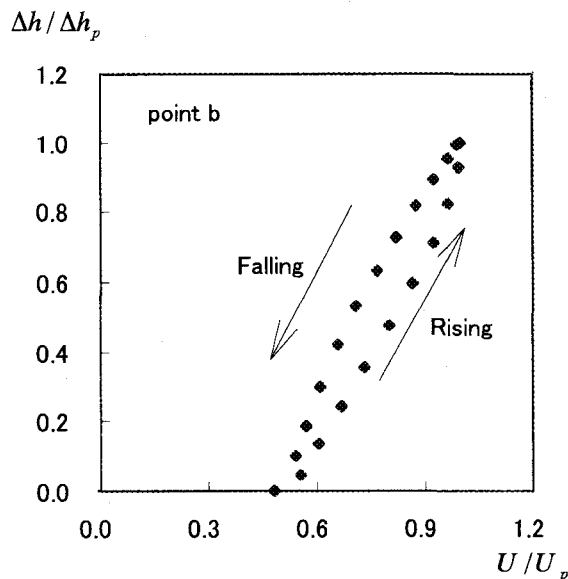
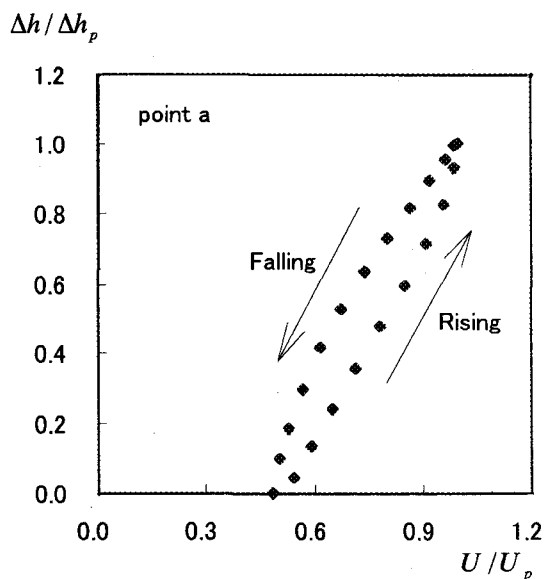


図-6 ループ特性

である。高水敷の測定部には水路下部からのレーザー光の透過を可能とするためにガラス板をアクリル板中に挿入した。

流量は、電磁流量計およびインバータ・モータの回転数を制御することで任意に自動制御できる^{7), 8)}。本実験の流量ハイドログラフは、図-3に示すように、三角波を与えた。ここで $T \equiv t/T_d$ は無次元時刻で、 T_d は増水時間である。表-1に水理条件を示す。

流速計測には、4ビーム後方散乱型2成分アルゴンイオンレーザー流速計 (DANTEC社製) を使用した。2Wのレーザー発信機から発生したレーザー光線は、ビームスピリッターによって分光され、40MHzの周波数シフトをかけた後に光ファイバーを通過し、ガラス製の水路側壁および底面から流体中に照射され、ドップラーバースト信号が発生される。このバースト信号は受光部で検出され、再び光ファイバーを通過して処理機 (Flow Analyzer) に送られ、相関法によって瞬時の流速値が算出される。

このシステムを用いて、上流から約7mの地点にお

いて図-4に示すように横断面内に計360点を計測した。U-VおよびU-W測定を行うために、図-2に示すようにプローブをそれぞれ水路側壁および底面に設置した。それぞれの測定を2回に分けて行った。

時間変化する水位の測定には、超音波波高計 (KEYENCE社製) 3台と容量式波高計 (KENEK社製) 1台の計4台を用いてLDAと同時計測した。波高計の位置を図-5に示す。低水路側に3台 (上流側に超音波波高計2台、最下流部に容量式波高計1台)、高水敷側に1台を設置した。

本研究で取り扱うような非定常流れでは、乱流構造を考える上でアンサンブル平均流速成分をどのように定義するかが重要となる。非定常流れにおける平均流速の決定手法には各種の方法があるが、本研究では従来の研究成果に基づいて^{7), 8)}、最適項数で打ち切った有限項フーリエ級数を用いるフーリエ解析法を採用した。そのフーリエ項数は7とした。

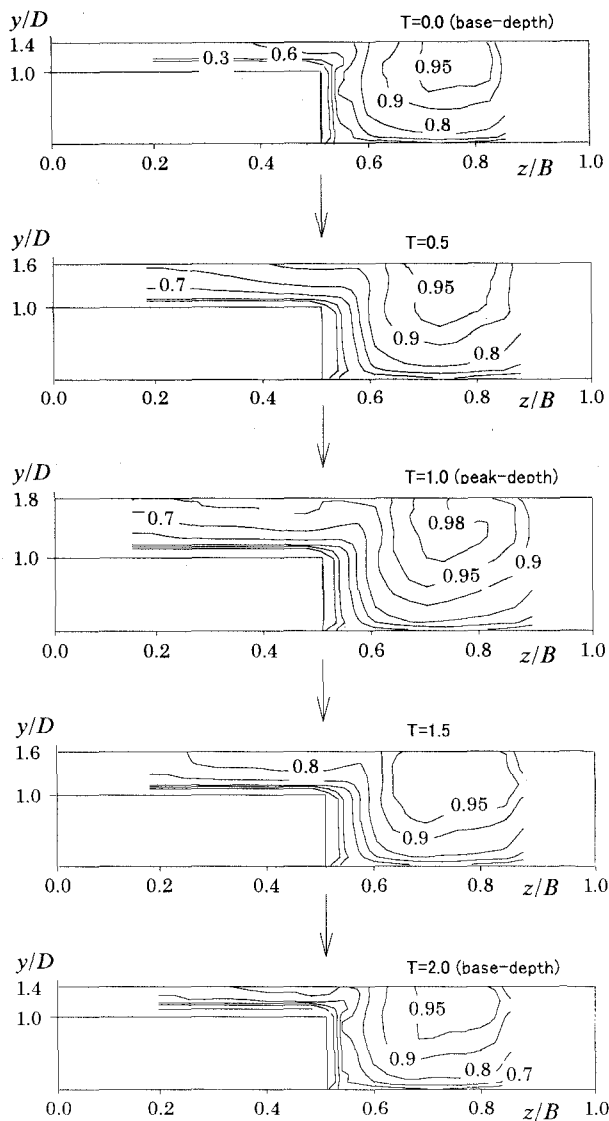


図-7 無次元主流速分布 $U/U_{\max}$

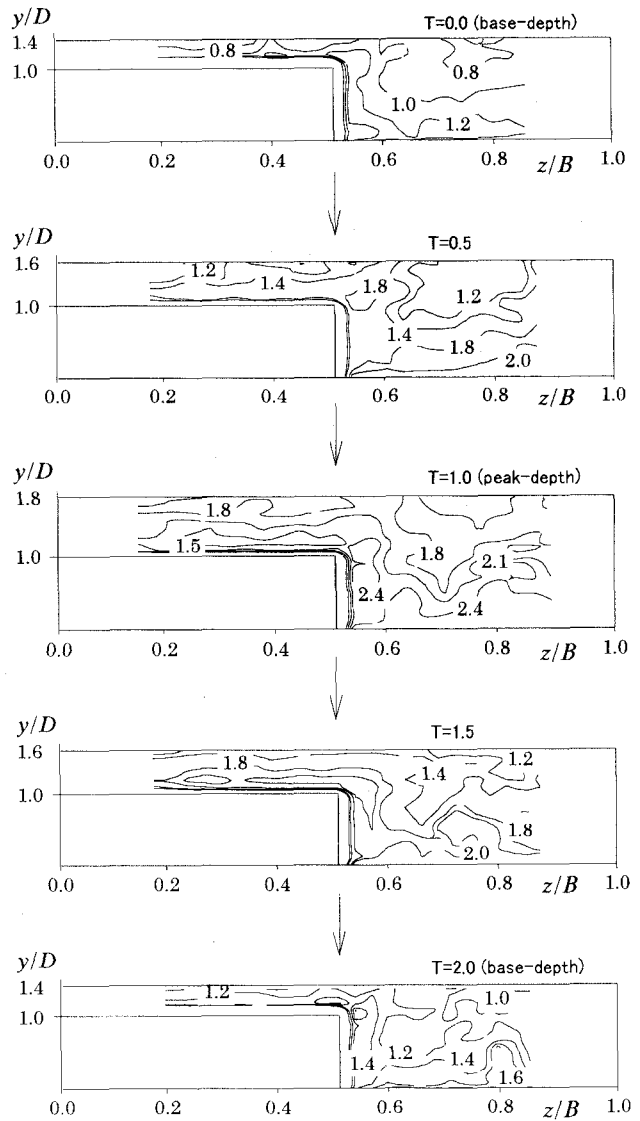


図-8 無次元乱れ強度分布 $u'/U_{\max}$ ($\times 10^{-1}$)

3. 解析結果と実験考察

(1) ループ特性

図-6は、図-4中の点a～dにおける主流速 U および水深 h の時間的関係を示したものである。全ての点において従来の非定常な単断面開水路の研究結果⁸⁾と同様に反時計回り方向のループ挙動が観測される。これは、 U のピーク値が h のピーク値よりも早く現れるためである。低水路内の点aおよびbすなわち同一鉛直方向にある点を比較すると、従来の単断面鉛直2次元測定と同様に⁸⁾、点a(底面側)の方がループ面積は若干大きいことがわかる。点b, cおよびdすなわち同一高さで横断方向に異なる点を比較すると、ループ面積は高水敷側、境界部および低水路側の順に大きいことがわかる。低水路の流速は高水敷の流速よりも大きくなるので、上流側からの流速変化の情報は低水路の方が早く伝達する。したがって、低水路側の方が流速と水深の位相差は大きくなると考えられる。しかしながら、現段階において

詳細は不明であり、今後低水路と高水敷の差異に関する抵抗則の関係などを検討する必要がある。

(2) 主流速 U コンター分布

図-7は各時刻における断面最大主流速 $U_{\max}$ による無次元主流速 $U/U_{\max}$ のコンター(等値線)を示したものである。

従来の定常流複断面開水路の研究⁴⁾で報告されているように高水敷の角付近に極大値が見られる。この傾向は特に流速ピーク時刻($T=1.0$)においてもっとも強く現れていることがわかる。この結果、非定常流れにおいても低水路の水深が大きくなるにつれて斜昇流の影響が大きくなることが推測される。また、ベース時において低水路が高水敷に比べて主流速が大きくなる一方、ピーク時刻($T=1.0$)には流速増加に伴い高水敷水深が大きくなると主流速の差は小さくなり、運動量の交換に差が発生していると考えられる。

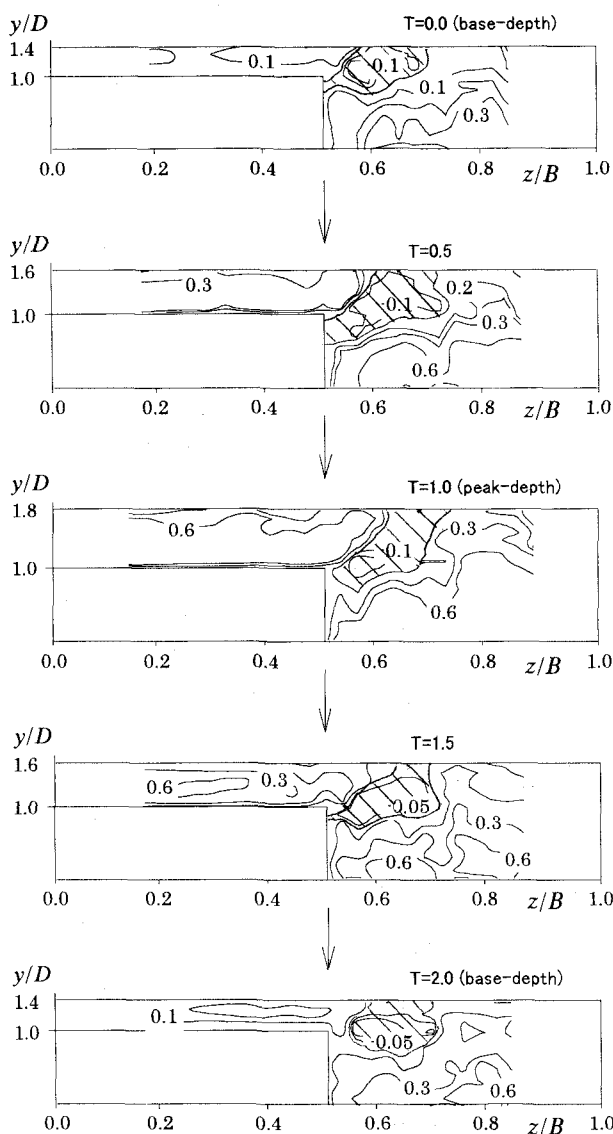


図-9 無次元レイノルズ応力分布 $-\overline{uv}/U_{\max}^2 (\times 10^{-3})$

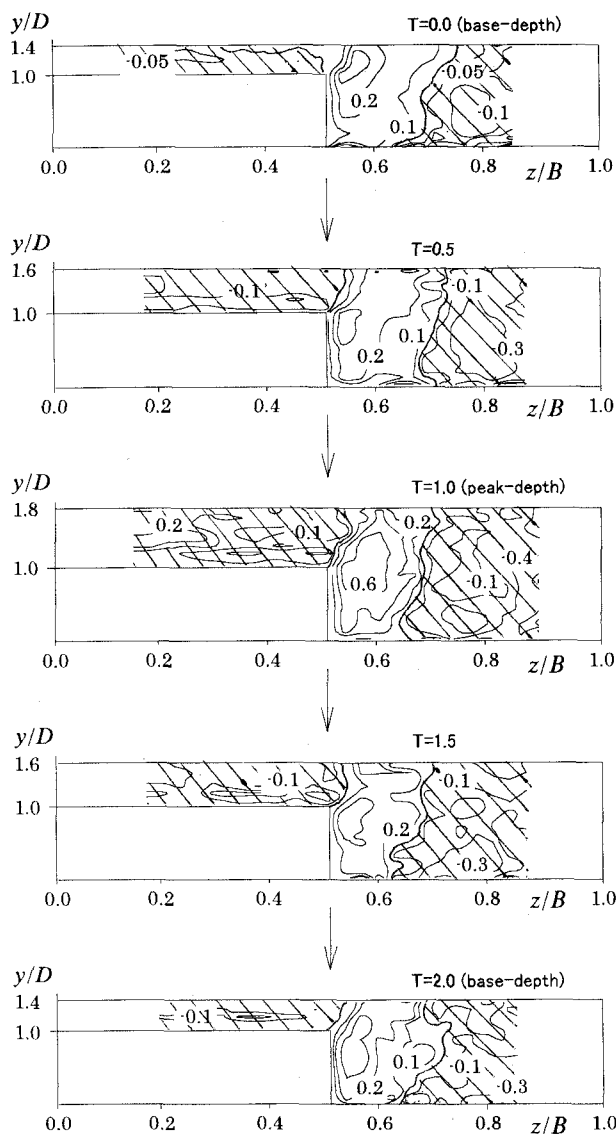


図-10 無次元レイノルズ応力分布 $-\overline{uw}/U_{\max}^2 (\times 10^{-3})$

(3) 乱れ強度 u' コンター分布

図-8は各時刻における $U_{\max}$ による無次元乱れ強度 $u'/U_{\max}$ のコンター分布を時系列に示したものである。全期間において低水路と高水敷の境界部付近および低水路底面部において乱れが卓越し、低水路側壁面の水面付近で極小値を示している。この傾向は、定常流複断面開水路の研究¹⁷⁾においても同様の結果が得られている。特にピーク時刻 ($T=1.0$) においてもっとも大きくなることがわかり、斜昇流およびこれが誘起する流れの影響が関与すると思われる。また、高水敷の角付近におけるコンターがピーク時刻 ($T=1.0$) までは鉛直方向上向きであるが、減水時刻 ($T=1.5$) 後のコンターは水路床とほぼ平行になる。また、ピーク時刻 ($T=1.0$) においては高水敷底面部でも極大値が拡大し、低水路および高水敷の差が小さくなっている。これは、主流速分布と同様の傾向であり、単断面の特性が次第に現れることが予想され、今後詳細に検討する必要がある。

(4) レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ コンター分布

図-9は各時刻における $U_{\max}$ による無次元レイノルズ応力 $-\overline{uv}/U_{\max}^2$ のコンター分布を時系列に示したものである。全期間を通じて、低水路の底面部において極大値をもつ正の分布が広がり、高水敷の角付近を中心に負の分布が確認できる。これは流速分布が逆勾配 ($\partial U / \partial y < 0$) になることに起因しているためである。

(5) レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ コンター分布

図-10は各時刻における $U_{\max}$ による無次元レイノルズ応力 $-\overline{uw}/U_{\max}^2$ のコンター分布を時系列に示す。全期間において高水敷中央部付近で負となり、高水敷の境界部付近では正となる。また、低水路中央部付近には負の分布が見られる。これらの結果から、非定常流と従来の複断面定常流¹⁾の間には大きな差異は観察されなかった。高水敷周辺のコンターが低水路側に張り出しているのは、高水敷の値が斜

昇流の影響を受けているためと考えられる。また、高水敷の境界部付近で $-\overline{uw}$ は正の分布をするが、これは複断面の側壁の影響による流速勾配 $(\partial U / \partial z) > 0$ に起因するものと考えられる。

4. おわりに

本研究は、流量が三角波的に増減する非定常複断面開水路流の乱流計測を行い、複断面開水路流の非定常特性を実験的に検討し、以下の結果が得られた。

- 1) 主流速 U および水深 h の位相差によるループ特性は、従来の非定常流れの結果と同様に、水面に近いほどループ面積が狭くなるようである。また、低水路および高水敷の間にはループ面積の顕著な差が認められた。
- 2) 主流速 U 、乱れ強度 u' 、レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ および $-\overline{uw}$ のコンター分布の結果より、複断面開水路流れの構造は、非定常時においても定常時⁹⁾と同様に、低水路および高水敷の流速差および壁面近傍のシアーに大きく関与していることがわかった。特に、増水期に比べ減水期においては、低水路と高水敷の差が小さくなることが観察された。
- 3) 主流速分布では高水敷の角付近に斜昇流の影響が観察された。レイノルズ応力は、 $-\overline{uv}$ について高水敷の角付近で負の分布の存在が確認できた。また、 $-\overline{uw}$ については低水路側面側に負の分布、高水敷側に正の分布が観察された。このように今回の計測では、複断面開水路流れの構造は非定常時においても定常時とほぼ同様であるが、増水期および減水期を比較すると、減水期にはピーク時の乱れの影響が高水敷上に残ることが観察された。

今後は、さらに非定常性の大きなケースを計測し、今回の結果と比較検討したい。

最後に、本研究を進めるにあたって助言を頂いた本学鬼束幸樹助手に謝意を表す。

参考文献

- 1) 木下良作：航空写真による洪水流の解析、その乱流構造と表面の流れ方の特性について、日本写真測量学会誌，vol.6，pp.1-17，1967
- 2) 今本博健，久下俊夫：複断面流れの水利特性に関する基礎的研究，京都大学防災研究所年報，第17号B，pp.665-679，1974。
- 3) 芦田和夫，藤田正治，劉 炳義：複断面直線河道における浮遊砂の輸送過程，第32回水利講演会論文集，pp.461-466，1989。

- 4) 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。
- 5) 林泰造，大島正憲：Kinematic Wave として非定常性が水流の乱れに及ぼす影響の研究，第32回水利講演会論文集，pp.607-612，1988。
- 6) Nezu, I. and Nakagawa, H.: Turbulent Structures over Dunes and its Role on Suspended Sediments in Steady and Unsteady Open-Channel Flows, *Int. Symp. on Transport of Suspended Sediments and its Mathematical Modeling*, IAHR, Florence, pp.165-190, 1991.
- 7) 橋津家久・門田章宏・中川博次：非定常開水路流れの乱流構造に関する実験的研究，土木学会論文集，No.491/II-27，pp.81-88，1994。
- 8) 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.
- 9) Graf, W. H.: Shear stress statistics and wall similarity analysis in turbulent boundary layers using a high resolution 3-D ADVP, *EPFL*, Lausanne, No. B.210, pp.1-23, 1999.
- 10) 橋津家久・鬼束幸樹：非定常性がKarman定数に及ぼす影響，水工学論文集，第45巻，pp.625-630，2001。
- 11) 橋津家久・牛島省・山上路生・坂根由季子：低レイノルズ数型 $k-\varepsilon$ モデルとVOF法を用いた非定常開水路流の数値計算，水工学論文集，第45巻，pp.547-552，2001。
- 12) Sanjou, M.: Analysis of Unsteady Open-channel Flows by Numerical Calculation, *Proc. of 29th IAHR Congress, Beijing*, pp.136-142, 2001.
- 13) 橋津家久・山上路生：応力モデルとVOF法を用いた非定常な開水路の乱流構造に関する数値解析，応用力学論文集，vol.4，pp.601-610，2001。
- 14) 富永晃宏・長尾正志・三尾憲史・劉建：複断面水路を通過する洪水波の水利特性，水工学論文集，第38巻，pp.443-448，1994。
- 15) 富永晃宏・柴田健一郎・三尾憲史・長尾正志：高水敷樹木群を有する複断面河道の非定常流の水利特性，水工学論文集，第40巻，pp.693-698，1996。
- 16) 澤井健二：非定常流による蛇行水路の河床変動に関する実験的研究，京都大学防災研究所年報，第35号，B-2，pp.365-371，1992。
- 17) 富永晃宏・江崎一博・森上秀樹：複断面開水路接合部の乱流構造，水工学論文集，第33巻，pp.523-528，1989。

(2001. 10. 1受付)