

各種水制形状に起因する 平均流構造および組織的流れ構造

MEAN AND COHERENT STRUCTURES CAUSED BY SEVERAL TYPES OF GROYNES

門田章宏¹・小島英司²・鈴木幸一³

Akihiro KADOTA, Eiji KOJIMA and Koichi SUZUKI

¹正会員 博(工) 愛媛大学大学院准教授 理工学研究科生産環境工学専攻(〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

²学生員 工修 愛媛大学大学院博士後期課程 理工学研究科生産環境工学専攻

³フェロー会員 工博 愛媛大学大学院教授 理工学研究科生産環境工学専攻

There are several types of groyne such as T-type and L-type. These groynes have been empirically constructed according to several environments in rivers. One important characteristic of Japanese rivers is a sudden change of discharge due to heavy rainfalls so that the groynes change rapidly from submerged to emerged flow conditions. Therefore, the present study focuses the effects of groyne shapes on mean and instantaneous-coherent structures under emerged and submerged conditions.

To investigate the instantaneous flow patterns around the groynes, a PTV method is adopted to estimate the instantaneous velocity fields. Weiss function and conditional sampling technique (CST) is applied to reveal the structures of coherent flow pattern. One of the main results is the distribution of coherent vortices generated at the groyne tip due to high shear forces in the mixing layer between main stream and dead zone.

Key Words : *T and L types groynes, emerged and submerged conditions, PTV, Weiss function, CST*

1. はじめに

流れの境界に存在する水制構造物は様々な役割を持ち、護岸や水生生物にとっての環境改善の目的で設置され、またヨーロッパの主要河川においては貨物船等の船舶の航行に必要な航路の確保のために水制が使われている。この様に水制構造物は様々な役割を持つことから、水制周辺に起きる流れ現象に関する研究は、良好な環境の保全や洗掘防止のための護岸対策、低水路における水深の確保のための最適な水制のデザインを目的として行われてきた。これら様々な研究の中で、水制周辺の流れに関する実験・解析では、水制間隔・角度等の変化による影響に着目した研究が行われている。特に、水制間の距離と水制長さで表したアスペクト比と主流域・死水域間の混合層や渦構造との関係に着目した研究がChen & Ikeda¹⁾、Kimura & Hosoda²⁾、Uijtewaala³⁾によって行われているが、中でも染料による可視化実験によって混合層内の物質交換現象に着目した研究がAltai & Chu⁴⁾、Uijtewaala³⁾、Weitbrecht & Jirka⁵⁾によって詳細に行われている。さらに、鬼束ら⁶⁾、Mutoら⁷⁾、禰津ら⁸⁾、池田ら⁹⁾によって、PIV

やLDAおよび電磁流速計を駆使した流れの計測が行われ、水制間に発生する渦構造について詳細な検討が行われている。一方、水制の設置角度の流れの影響に関する研究が、富永ら¹⁰⁾、川口ら¹¹⁾、木村ら¹²⁾によって可視化実験・数値解析が行われ、水制の設置角度による水はね効果の検討が行われている。主な結論として、下向き水制による大きな水はねによる主流部の流れの影響を検討し、上向きと直角水制が護岸に適していると述べている。

上述した研究の他、最近では石かご等の材料を考慮した水制、杭出し水制のような透過性をもつ水制周辺の流れ構造や局所洗掘に関する研究が行われるようになりつつある^{13, 14, 15)}。しかし、これらの研究は主に直線型水制を対象としたものであり、国内やヨーロッパ諸国に存在する様々な水制形状を考慮し、その周辺の流れに着目した研究は皆無である。実際に、岡山県の旭川ではクレップ水制と呼ばれるT型水制が存在し、熊本県にある球磨川ではL型形状をした蛇籠水制が設置されている。一方、日本の主な気象・河川特性として挙げられるのは、降雨量の季節的変動が大きく、流路が短く急峻であることである。近年観察される様々な自然現象は、温暖化による影響と併せて、突発的な豪雨・洪水が多く、水制等の河

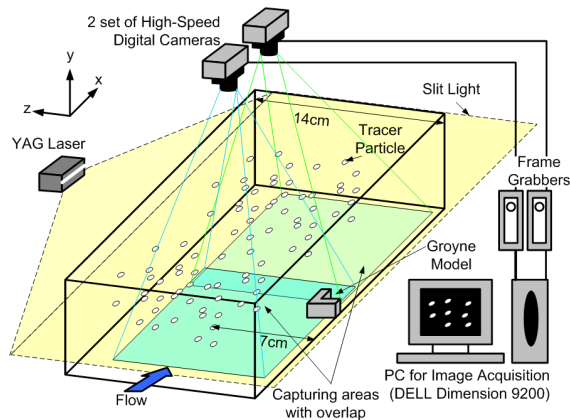


図-1 可視化実験装置

川構造物周辺の流れは瞬間的に大きなエネルギーを持つ流れが支配的となり、従来行われてきた洗掘等の土砂輸送現象やその他の物質輸送現象の解明の基本的情報となった平均流的な流れとは大きく異なったものと考えられる。以上の背景により、本研究では、河川構造物周辺の流れの中でも、組織的にかつ瞬間的な流れの局所的な場に及ぼす影響がむしろ重要であるという観点、またT型、L型といった様々な水制形状が現存するという観点から、各種水制形状からなる水制先端付近から発生する流れを対象とし、平均流構造の評価に加えて瞬間的に発生する組織的流れの構造を、流れの可視化手法およびせん断・回転領域およびその移流過程を評価できるWeiss関数および条件付き時空間相関解析により解明することを目的とする。

本研究を遂行するにあたって、これまで開発してきた瞬間的乱流変動場を広域にわたって水表面に分布する浮遊粒子画像を的確に追跡し速度差のあるベクトルを評価できる画像流速測定法(SPTV法)¹⁶⁾を可視化実験画像撮影システムに適用し、瞬間流速の計測・評価を行った。その後、流れの組織渦構造を評価するために、せん断および回転運動の大きさとその時間変化を表すことができるWeiss関数や条件付きサンプリング手法(CST法)¹⁶⁾を採用した。CST法では、特徴的な組織的乱れ変動パターンを示す領域でのスペクトル解析を行うことで発生周期を求め、これを判別条件として与えることで水制周辺の組織的乱れ変動パターンを抽出し移流過程を捉える。また、水制が越流時や非越流時の二つの状況が上述した日本の河川特性では頻繁に起きるにもかかわらず、従来の水制周辺の流れに関する研究では、これらの比較についての議論が乏しいと言える。そこで本研究では上述の計測・解析手法をこれらの二つの状況を実験条件として適用した。本研究では、各種形状からなる水制模型を作成し、上述の実験・解析手法により、この水制模型周辺の流れの可視化実験を行い、越流・非越流状態の平均流構造の評価に加えて瞬間的に発生する組織的流れの構造の解明を試みた。

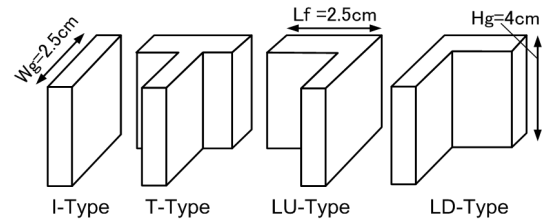


図-2 各種水制形状

2. 可視化実験および解析手法

本実験で使用した可視化実験装置は、アクリル製の直線開水路(長さ3m, 幅14cm, 高さ20cm), 2台の高速CCDカメラ(IMPERX IPX-VGA120-LM), 画像取得および解析用PC(DELTA Dimension 9200), 画像キャプチャーボードから構成されている(図-1)。この直線開水路は、ポンプ(最大流量約3000cm³/sec), 流量制御コントローラ(TOSHIBA, VF-S9)を用いた循環式水路となっている。撮影時に用いた光源はYAGレーザ(カトウ光研, PIV Laser G50, 出力50mW)であり、シート状に平面光を発生させた。散乱トレーサ粒子にはDIAION (HP-21, 三菱化学, 径約250μm, 密度1.02g/cm³)を用い、粒子どうしの吸着を防ぐために界面活性剤(メタノール)を加えて使用した。水制模型については、模型背後にもスリット光が透るように厚さ5mmの透明アクリル板からなるI型、L上流型、L下流型およびT型の模型(図-2)を作成した。水制模型のサイズは、横断方向長 $W_g=2.5\text{cm}$, L型・T型模型の流下方向長 $L_f=2.5\text{cm}$ に設定した。横断方向長 W_g については、北四国の河川では局所部の河岸保護・流路確保を目的とした単独水制が設置されていることから、愛媛県松山市にある内川に現存する水制を参考に、水路幅との比を一致させるように設定した。また、全ての実験ケースにおいて水制高さ $H_g=4\text{cm}$ とした。一方、水理条件の設定にあたって、水制先端付近から大規模な組織渦構造が発生すること、非越流状態から越流状態への組織渦構造の変化が顕著である¹⁶⁾ことから、水制高さ $H_g=4\text{cm}$ に対して非越流水深を $h=3.9\text{cm}$, 越流水深を $h=4.5\text{cm}$ と設定した。また、流量を $Q=1000\text{cm}^3/\text{sec}$ (Re 数は約7140)とした。

一方、水制先端付近およびその背後に発達する流れの移流過程を見る上で、図-1に示すように1台のカメラのサイズを $480 \times 520\text{pixel}$ とし二つのカメラからの画像をオーバーラップさせ同期させることで、より広域な領域をカメラの精度の劣化をなくすように同時撮影を行った。また、平面光の高さは、非越流・越流条件に対してそれぞれ、水制高さの極付近に設定した。これらの設定の下で、撮影周波数約109Hzでそれぞれのケースにおいて2000枚の画像を取得しPTV画像解析を行った。この可視化画像解析では、浅水流場などの広域な流れ場を対象とした2次元PTV法として、従来からPTV法で用いられているFFT相互相関法と直接相互相関法のそれぞれの利点を組み合わせ、それぞれの欠点を補う手法(SPTV法)¹⁶⁾を採用した。

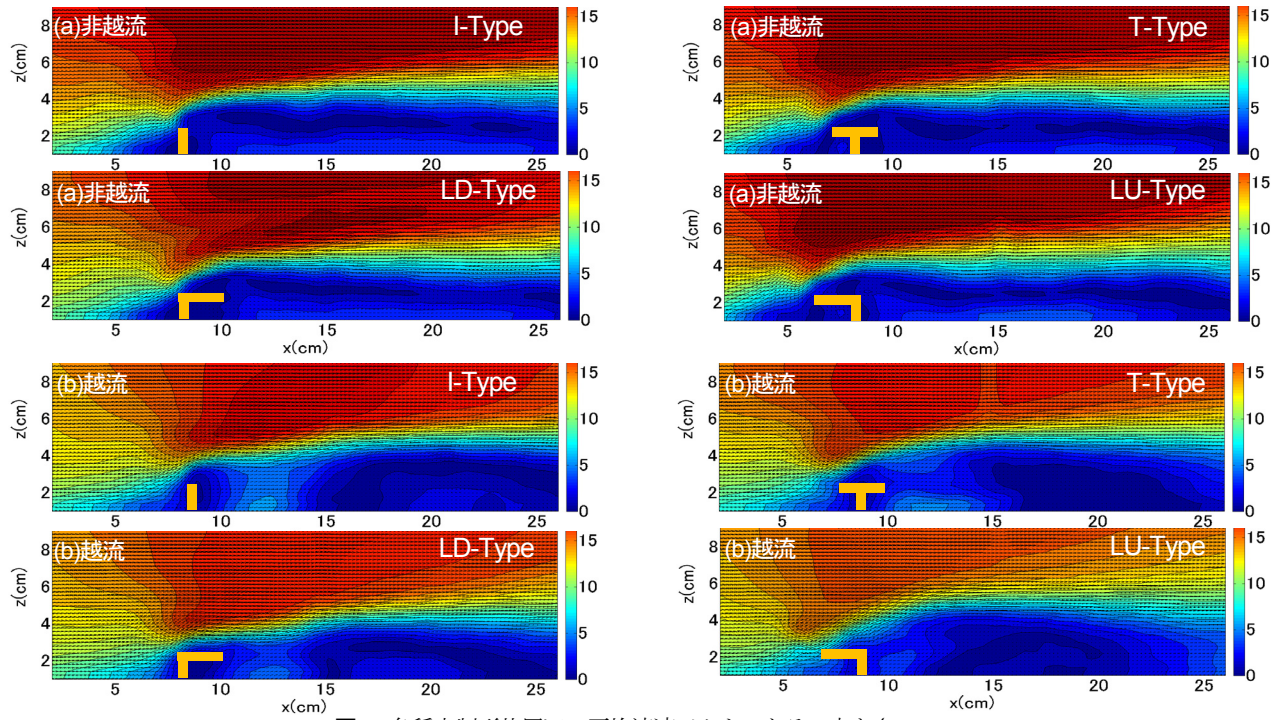


図-3 各種水制形状周辺の平均流速ベクトルとその大きさ(cm/sec)

スペクトル解析などで検出された組織的な乱れ変動パターンの移流過程を観察する手法として、条件付きサンプリング手法(CST法)を採用した。一般的にCST法では、抽出される任意の変動量を q として、以下のように定義される。

$$\langle q(x, z, \Delta x, \Delta z, t, \tau) \rangle = \frac{\int q(x + \Delta x, z + \Delta z, t, \tau) \cdot I(x, z, t) dt}{\int I(x, z, t) dt} \quad (1)$$

ここでは、任意変動量 q を乱れ変動量(瞬間流速の平均流速からの差)の主流および横断方向成分(u, w)のベクトル値に適用する。上式(1)における $\langle \rangle$ は抽出後集合平均化された量を表す。また x および z は、それぞれ特徴のある変動パターンを示す点(固定点として定義)における主流方向および横断方向の位置である。また、 Δx および Δz は固定点から離れた移動点までの距離、 τ は遅れ時間を示す。さらに、 $I(x, z, t)$ は判別関数という。判別関数の定義については、以降の実験結果の考察とともに追って述べることにする。また、瞬間的な流れ場におけるせん断および回転運動の領域を評価するパラメータとして以下のWeiss関数(Q 値)¹⁷⁾を採用する。

$$Q = S^2 - \omega^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 - \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (2)$$

ここで、 S はせん断応力、 ω は回転による運動の大きさを示しており、それぞれ上式の第1,2項目、第3項目に対応する。 Q 値が負の値を示す領域は回転運動が支配的となり、正の値を示す領域はせん断による影響が支配的となる。この Q 値のある瞬時の分布を観察することで、せん断・回転運動の組織的渦構造を観察できる。

3. 実験結果および考察

(1) 平均流構造

図-3は、各種水制形状周辺の平均流速ベクトルおよびその流速値をコンターとして示したものである。これらの図より、上流側に突き出しがあるL上流型およびT型水制のケース(LU, T)において、非越流状態から越流状態にかけて水制下流部の淀み領域が拡大する傾向がある。非越流状態の水制付近の上流部においては、I型、LD型と比較して、上流側の水制突き出し部の影響で流れが減速されて淀んでいる傾向が見られることから、主流部から水制内部に流入する流れが卓越していると考えられる。水制形状や水理条件が異なるものの、Weitbrecht¹⁸⁾による非越流時の上向き傾斜水制による可視化実験結果と同様な傾向を示している。さらに、非越流時の水制による縮流の影響で主流部の流速が強くなり、特にI型、T型、LU型の三つのケースにおいて顕著である。LD型は越流時・非越流時ともに淀み領域および主流部の変化が比較的小さい。

乱れによるせん断応力(Reynolds応力)は、互いに垂直な速度変動による運動量の拡散・混合を意味するため、後述する水制先端から発生する組織渦構造を考えるときの重要な指標と言える。図-4は、各種水制形状先端から生成されるReynolds応力($-\overline{uw}$)の分布を前図同様に示したものである。I型およびLD型水制の上流端付近で局所的な負のReynolds応力が発生しているが、T型およびLU型では、非越流時に突き出し部先端付近で負の局所的なReynolds応力が発生し、越流状態になると先端より少し下流側にシフトしている。この傾向は、図-3に示した平

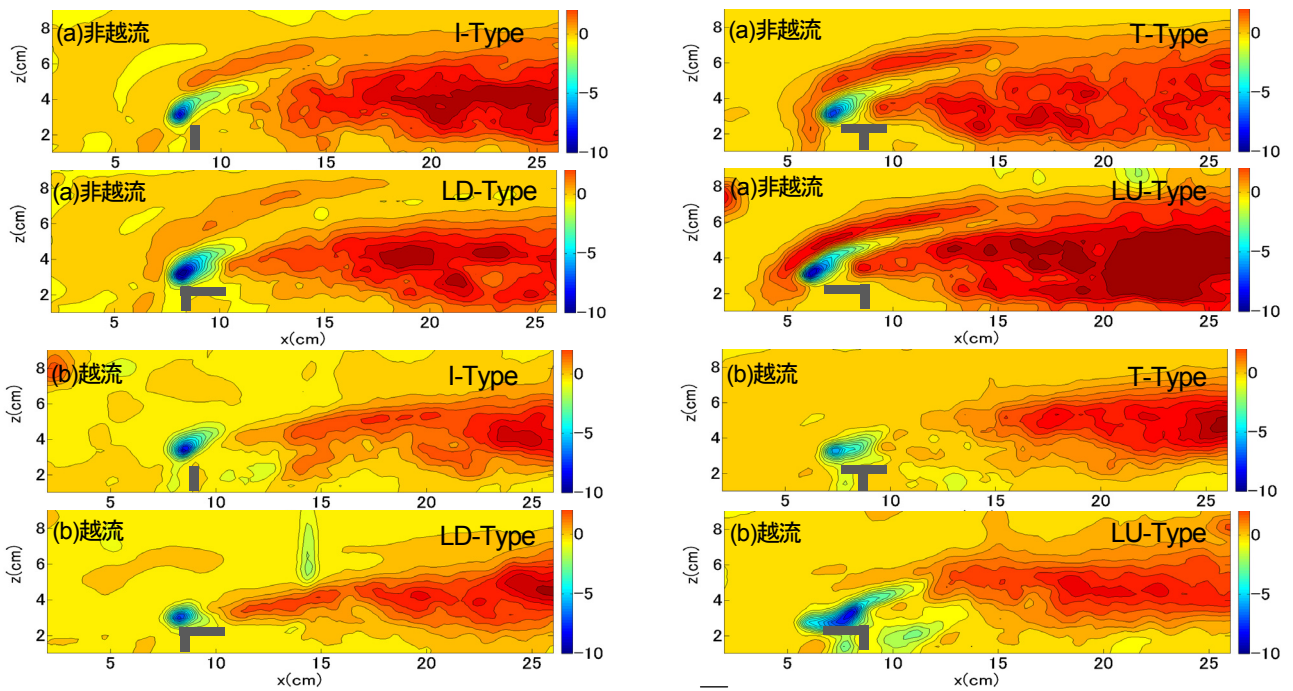


図-4 Reynolds応力($-uw$)分布

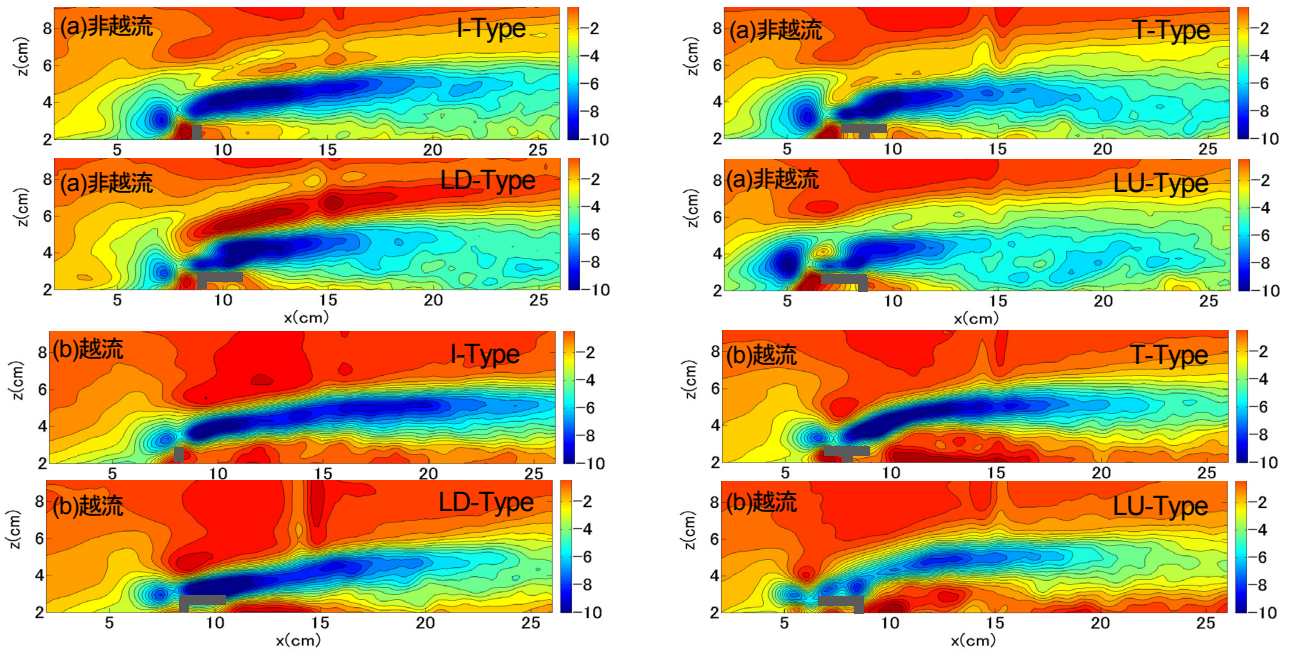


図-5 渦度(ω)分布

均流速分布から、越流状態のT型とLU型水制先端から広がる淀み領域によって流速差のある領域がやや下流にあることと関連している。この局所的な領域の詳細な三次元的な流れの検討を行う必要があると考えられる。

全てのケースでの水制下流側の領域を見ると、主流域と死水域との流速差が起因して、水制上流部側面から主流部までの領域と水制下流部の淀み領域に大きなReynolds応力の値を示している。特に上流側に突き出しのあるケース(T, LU)では、非越流状態において水制上下流ともに大きな正のReynolds応力が生じており、特にLU型で顕著である。従って、この付近に大規模は組織渦構造が発生する可能性があると考えられる。一方、越流状態では、水制上部を通過する越流の影響で死水域の流速

が増加し主流域との流速差が弱まるため、下流域でのReynolds応力も小さくなる。

図-5には、渦度(ω)の分布を示している。負(時計回り)の回転運動が水制上下流部における死水域への流入によって発生している。非越流状態では、水制の近傍周辺で流速差が大きくなるため、この付近に時計回りの回転運動が集中する。この傾向は特に上流側に突き出しのあるケース(LU)で特徴的である。越流状態になると、下流部に突き出しのあるケース(LD)およびI型水制周辺の分布に関して、その領域が下流端まで延伸する傾向がある。図-3の平均流速分布と比較してみると、水制下流側の淀みの領域と対応しているようであり、上流側に淀みの領域が比較的小さなケース(I, LD)で、越流状態になる主流

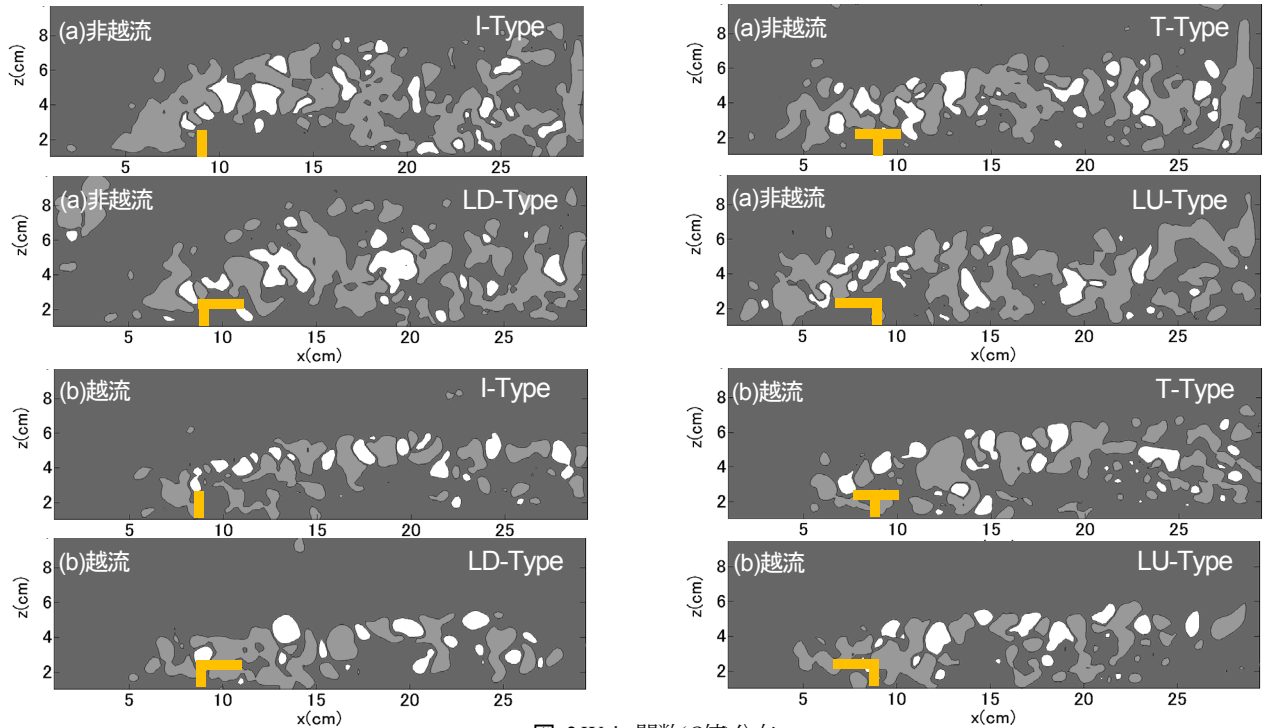


図-6 Weiss関数(Q 値)分布

方向に沿って下流端に向かって回転領域が伸びる傾向があると考えられる。本節では、せん断としてのReynolds応力の分布と渦度による回転運動について、平均流に関する統計解析結果について述べてきたが、次節においては、条件付き時空間相関解析における判別関数の説明とともに瞬間的に発生する組織渦構造について考察を行う。

(2) 組織渦とその移流過程

瞬間的流れ場において発生する組織的流れの構造について、式(2)で示したWeiss関数(Q 値)を求め、その分布と時間変化について、図-6(a)に非越流状態での各種水制形状周辺 Q 値の分布のある瞬時の時間について示した。これらの図では Q 値が $30(1/\text{sec}^2)$ 以上の領域を白色で、 -30 以下の領域をグレーで示すことで、せん断・回転運動を区別して表示している。全てのケースにおいて、水制先端からその下流側の領域に渡って、せん断と回転が交互に分布していることが分かる。特に上流側に突き出し部のあるケース(T,LU)において、水制下流部における Q 値の分布が主流から右岸側方向に偏る傾向がある。図-4で示したReynolds応力の分布と比較すると、特に下流右岸側方向に大きなReynolds応力が分布していたため、白で示すせん断領域も相似な分布を示している。一方、図-6(b)は、前図同様に越流状態での Q 値の分布を示したものである。全体的に、非越流状態と比べてせん断と回転運動の領域は小規模で、その分布は主流方向に集中している。水制からの越流の影響で、死水域と主流部との流速差が小さくなり、これらの運動の領域も小さくなる。この傾向は特に水制先端部付近において顕著である。図-6では示していないが、水制先端から下流までの領域で発生したせん断や回転運動の領域は、非越流状態におい

ては、時間とともに下流側に移流しているが、その傾向は弱く、逆に上流側に突き出しのあるケースが、僅かであるが主流への移流が大きい傾向が、また越流状態における移流過程については、主流部の流れが越流の影響で減速されるため遅くなる傾向が観られた。これらの分布の時系列を追跡することで、せん断・回転運動の発生頻度等の組織的挙動を定量的に把握できるものと考えられる。

次に、水制先端部から発生する組織的な流れ構造を見るために、条件付き時空間相関(式(1))において、スペクトル解析を用いた判別関数を次式(3)で定義する。

$$I(x, z, t) \equiv \begin{cases} 1: u < 0, w > 0 \text{ \& } |uw/u'w'| \geq H \\ 0: \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 u' および w' は、それぞれ瞬間流速の主流方向および横断方向成分($\tilde{u}, \tilde{w}$)に対するrms値、 H は閾(しきい)値である。対象とする乱流現象を抽出する判別関数 I は、各々の現象に応じて的確に定義されなければならない。本研究では、固定点の位置を各種水制先端の上流部に設定し、この固定点から発生するejection的な運動を抽出することを目的として、上式(3)のように速度変動ベクトル(u, w)の方向を定義した。また、判別関数におけるしきい値 H の決定については、固定点における流速変動のスペクトル解析を行い、組織構造の発生周波数を同定し、判別関数である瞬間レイノルズ応力($-uw$)の時系列の中で、あるしきい値以上になるデータの数が、この周波数と一致するようにしきい値 H を求めた¹⁶⁾。また式(1)の抽出する対象の q については、今回、速度変動ベクトル(u, w)の大きさを設定した。固定点における瞬間流速場の一連の時系列の中で、ある時刻の変動パターンとこの

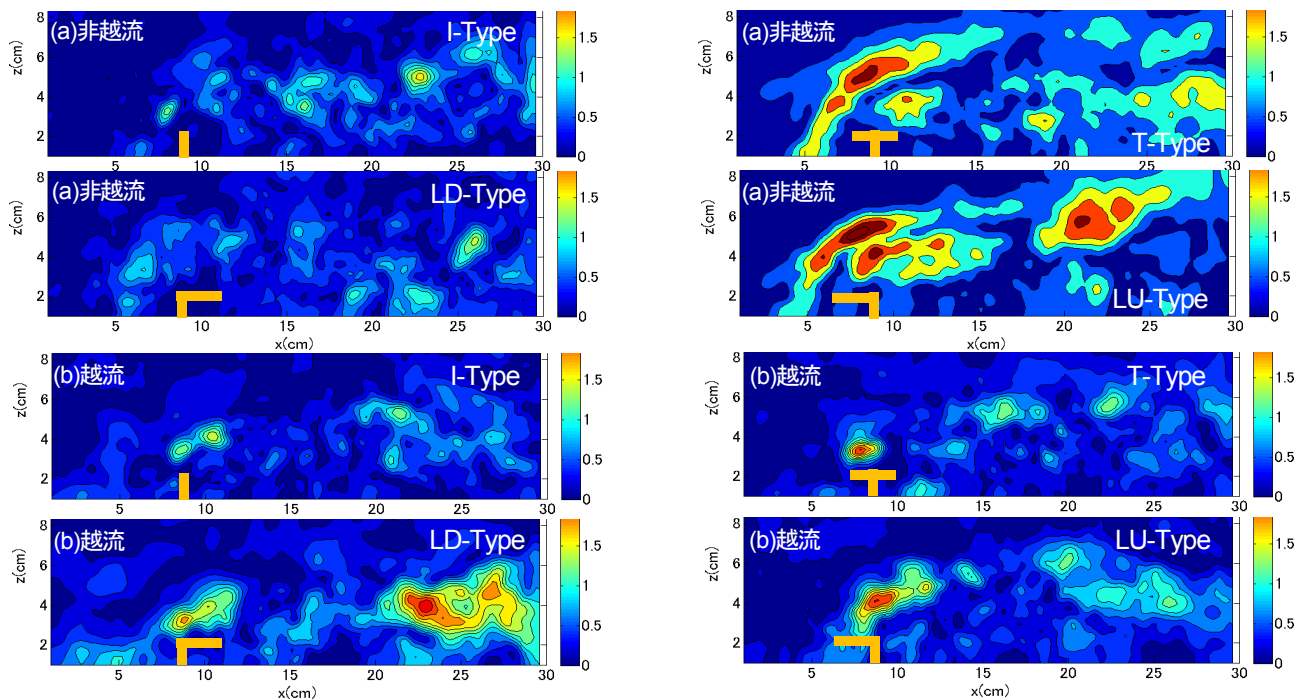


図-7 条件付き時空間相関解析による組織構造の抽出結果 (遅れ時間 $\tau=0.127$ 秒後の分布)

流速変動の正負が一致し、レイノルズ応力の無次元量として表される乱れ変動の相関の絶対値 $|uv'/u'v'|$ が上式の条件を満たしたときに1、それ以外は0と定義し、移動点における遅れ時間 τ をもつ変動パターン(組織的構造)を抽出し集合平均することで、その移流過程が求められる。

上述の条件付き時空間相関法の手順で抽出された変動ベクトルの大きさのある瞬時の結果を、各種水制形状周辺の非越流状態・越流状態について、図-7に示している。ここでは固定点から発生した組織的変動パターンが $\tau=0.127$ 秒後に移流した様子を示している。これらの図を比較すると、上流側に突起部があるケース(T, LU)において水制上流端から発生し、主流側へ移流する運動量輸送が大きく、また抽出された流速変動ベクトルも大きくなる。一方、越流状態の変化では、特に、I型、L下流型(LD)といった上流部に突き出しのないケースにおいて、水制のごく付近において大きな流速変動値を示しており、これらが下流側へ発達している傾向が見られる。また下流側にもこのような傾向を示しているが、T型、LU型と比較してやや右岸側に寄っている。Weiss関数の分布でも同様な傾向が見られたが、主流部に集中した渦構造が存在していることと関係している。

4. おわりに

本研究では、各種水制形状からなる水制先端付近から発生する流れを対象とし、平均流構造・瞬間的に発生する組織的流れの構造を、流れの可視化手法と条件付き時空間相関解析等によりその解明を試みた。水制形状による違いは、水制下流部の乱流構造に顕著に観られた。これらは、水制先端から下流部に発達する河床波等の大規模河床変動を制御し、水制そのものの効果を評価する意味で、組織的流れの影響を考えることが今後重要である。

参考文献

- 1) Chen, F.-Y. and Ikeda, S.: Horizontal separation flows in shallow open channels with spur dikes, J. Hydropscience and Hydr. Eng. JSCE 15(2), pp.15-30, 1997
- 2) Kimura, I. and Hosoda, T.: Fundamental properties of flows in open channels with dead zone, J. Hydr. Eng. ASCE, 123(2), pp.98-107, 1997
- 3) Uijtewaald, W.S.J., Lehmann, D. and Mazijk, A. van: Exchange process between a river and its groyne fields: model experiments, J. Hydr. Eng. ASCE, 127(11), pp.928-936, 2001
- 4) Altai, W. and Chu V.H.: Retention time in a recirculating flow, Proc. XXVI IAHR congress, San Francisco, pp.9-14, 1997
- 5) Weitbrecht, V. and Jirka, G.H.J.: Flow patterns and exchange processes in dead zones of rivers, Proc. 29th IAHR congress, Beijing, China, theme B, pp.439-445, 2001
- 6) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 鈴木鉄兵: 越流型連続水制のアスペクト比の変化が河床形状および水理特性に及ぼす影響, 水工学論文集, 第49巻, pp.769-774, 2005
- 7) Muto, Y., Baba, Y. and Fujita, I. Velocity measurements in rectangular embayments attached to a straight open channel, Proc. Int. Conf. on Fluvial Hydraulics, Bousmar & Zech eds., Balkema, The Netherlands, 1213-1219, pp.2002
- 8) 福津家久, 鬼束幸樹, 矢野勝士: 河床形状がわんど流れに及ぼす影響に関する研究, 水工学論文集, 第46巻, pp.559-564, 2002.
- 9) 池田駿介, 吉池智明, 杉本高: 不透水水制群を有する流れの構造に関する実験的研究, 水工学論文集, 第43巻, pp.281-286, 1999.
- 10) 富永晃宏, 田本典秀: 越流型連続水制周辺の流れ構造に及ぼす水制設置角度の効果, 水工学論文集, 第48巻, pp.805-810, 2004.
- 11) 川口広司, 福岡捷二, 渡邊明英: 設置角度の異なる越流型水制周辺の流れと流体力分布特性, 水工学論文集, 第48巻, pp.811-816, 2004.
- 12) 木村一郎, 細田尚, 音田慎一郎, 富永晃宏: 越流型水制周辺の非定常三次元流れ構造に及ぼす水制設置角度の影響, 水工学論文集, 第47巻, pp.841-846, 2003.
- 13) 赤堀良介, 道奥康治: 非ダルシー型抵抗則を用いた捨石水制内部流れおよび3次元LESによる水制周辺流れの数値計算, 水工学論文集, 第52巻, pp.1045-1050, 2008.
- 14) 道奥康治, 石垣泰輔, 前野詩朗, 南條雅志, 池松健: 透過型水制の周辺・内部の流れに関する実験と解析, 水工学論文集, 第48巻, pp.799-804, 2004.
- 15) 富永晃宏, 中居毅, 内藤健, 中村尚子: 開水路湾曲部に設置した透過水制の流れと河床変動に及ぼす影響, 水工学論文集, 第48巻, pp.547-552, 2004.
- 16) 門田章宏, 小島英司, 新家研蔵: 単独水制下流部に発生する大規模組織渦の瞬間的移流構造に関する研究, 水工学論文集, 第52巻, pp.727-732, 2008.
- 17) Bram van Prooijen: Shallow Mixing Layers, Doctoral Thesis at Delft University of Technology, 2004.
- 18) Volker Weitbrecht: Influence of Dead-Water Zones on the Dispersive Mass Transport in Rivers, Doctoral Thesis at University of Karlsruhe, 2004.

(2009. 9. 30受付)