

各種水制形状に起因する組織的流れ構造に関する研究

愛媛大学大学院 正会員 ○門田章宏
愛媛大学大学院 フェロー会員 鈴木幸一

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。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。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、突発的な豪雨・洪水が多く、水制等の河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、組織的で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、流れの可視化手法を用いた説明することを目的とする。

2. 実験および解析方法

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)を可視化実験画像撮影システム(図-1))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)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。

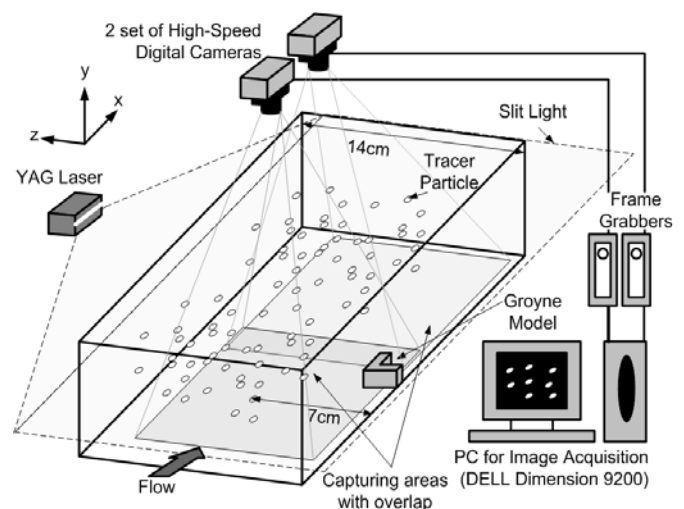


図-1 可視化実験装置

3. 瞬間的組織渦構造の抽出とその移流過程

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、次式(1)で示す Weiss 関数(Q 値)を求め、その分布と時間変化について、図-2 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。

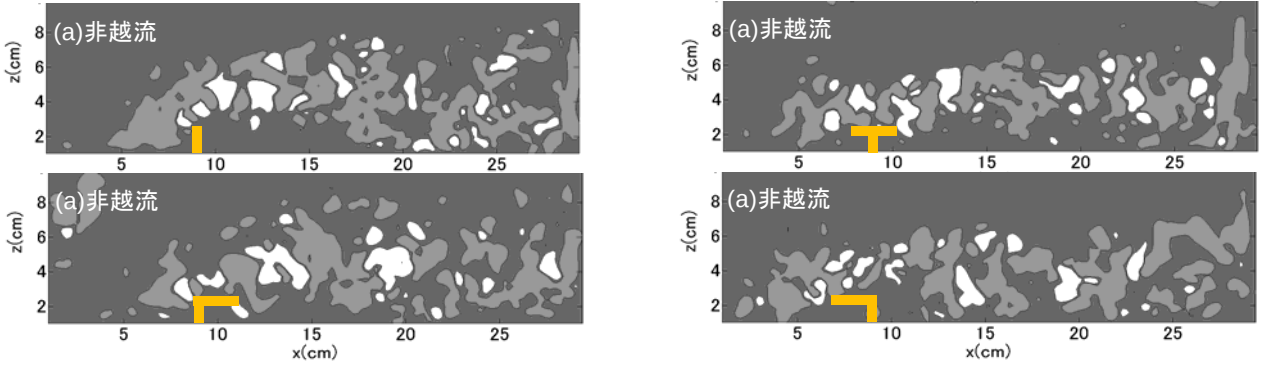


図-2 Weiss 関数(Q 値)分布

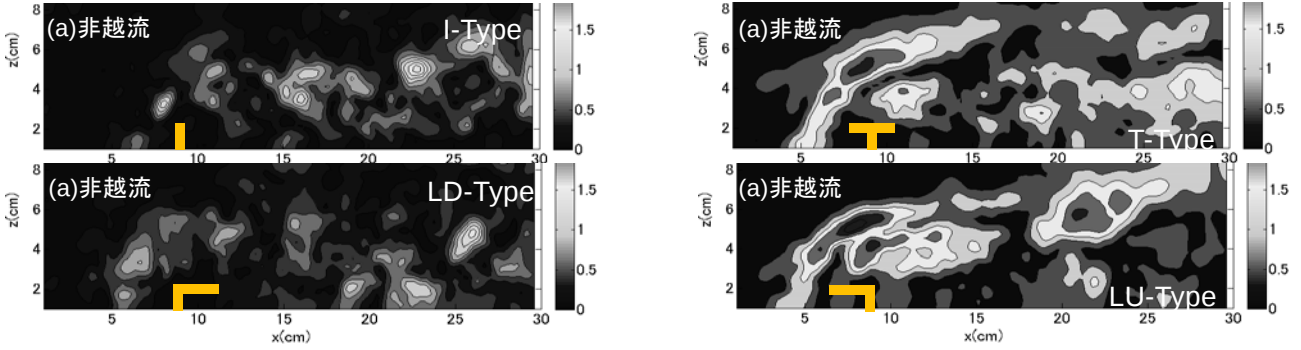


図-3 条件付き時空間相関解析による組織構造の抽出結果 (遅れ時間 $\tau=0.127$ 秒後の分布)

$$Q = S^2 - \omega^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 - \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (1)$$

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解析において次式(2)を定義し、その乱れ変動パターンのみを抽出した。

$$I(x, z, t) = \begin{cases} 1: u < 0, w > 0 \text{ \& } |uw / u'w'| \geq H \\ 0: \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

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、固定点(x, z)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(2)のように速定義した。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。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図-3 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ことが分かった。

5. 結論

本研究では、各種水制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。