

水制周辺における3次元的な流れの構造に対する面的計測および wavelet 解析による検討

愛知工業大学 工学部都市環境学科 正会員 赤堀良介

1. はじめに

河道内での物質輸送は、水平渦やボイル渦といった大規模な流れの構造に強く影響を受ける。このため、これら流れの構造のメカニズムを把握する事は、河川工学上重要な課題となってきた。

こういった大規模な流れの構造が周期的に発生する例として、狭窄部や水制設置箇所が挙げられる。筆者らのグループでは、3次元数値解析により、水制周辺では水平方向と横断方向に回転の軸を有する特徴的な複数の構造が生じている事を確認してきた¹⁾。また、数値計算結果から得られた流速変動の1次元的な空間分布に対し wavelet 解析を適用する事で、これらの特徴を波数解析的に抽出する手法に関し取り組みを行っており、空間分布を有する流れの情報から、3次元的な流れの構造を推測することを試みてきた。本研究では、水制を有する実験水路での流況を Particle Image Velocimetry(PIV)により面的に解析した後、その結果に対して wavelet 解析を適用する事で、これまで数値解析的に推測された流れの構造を実験的に再検討することを目的とした。

2. 実験概要

実験は、寒地土木研究所第4実験棟内に設置された実験水路により行った。水路は長さ15m、幅0.6m、側壁高さ0.3cmとし、主要部材は木材で構成し、下流端から6.0m - 7.5m区間においてはPIV計測のため、側壁、底面とも透明なアクリル部材により構築した。水路下流端には2.0m³程度の容量を有する水槽を設置し、水中ポンプにより上流端から循環通水を行った。水路床勾配は1/2000に固定し、下流端の堰上げの高さを調節し水深を9.3cm前後に設定した。水制は流下方向に6cm、横断方向に10cmの単一水制とし、アクリル区間の左岸側に設置した。本実験でのPIV解析では、可視化光源としてYAGレーザー光源を用いた。実験では水路右岸側面から水平方向にレーザーシートを照射し、水路下から鉛直上向きに粒子を撮影することで2次元平面上での流況撮影を試みたほか、水路下方から垂直上向きにレーザーシートを照射し、水路右岸から撮影を行う事で、せん断面である鉛直断面上での粒子の挙動に関して流況撮影を行った。本研究ではPIV撮影機材として高速カメラを使用し、フレームレートを水平面の撮影では60fps、鉛直面の撮影では250fpsとした。また、PIVのためのトレーサー粒子として、ダイヤイオン製HP20(比重約1.01、粒径約0.49mm)を用いた。

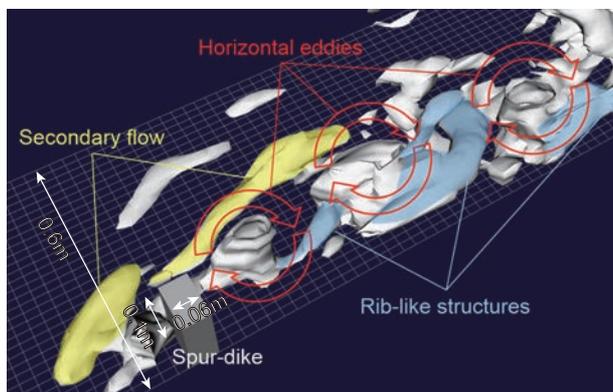


図-1 水制周辺の流れに対する3次元LES数値解析結果の瞬間値を λ_2 法により示したものの(白い等値面が回転軸を示す)

3. 数値解析

まず本研究での対象である流れ場を数値モデルを用いて検討する事で、対象となる流れの構造を確認した。数値モデルにはLarge Eddy Simulation(LES)モデルを用い、水理条件は実験と同等の条件を用いた(ただし計算コストの制約から流路長を9mとした)。計算格子は流下方向に300、横断方向に30、鉛直方向に30とした。

図-1に λ_2 法により示された数値計算結果の瞬間値を表す。 λ_2 法では圧力の極小となる面を等値面として表しており、白い等値面が回転運動の軸を示している。結果から、次に示す特徴的な構造が確認された。すなわち、1)水制上流側での潜り込みにより生じる2次流(黄色く着色した部分)、2)水制端から下流のせん断域に生じる水平渦(赤い矢印で示した部分)、3)それら水平渦の間に存在し、せん断面を横切る形で回転軸を有するリブ的構造(青く着色した部分)、といった構造である。

4. 実験結果

図-2は実験に対してのPIV解析の結果をベクトルの瞬間値として示したものであり、底面からの高さ4cmの水平面上の流速成分を示している。図-2の白い破線はせん断面の凡その位置を示しており、後に説明するwavelet解析の際に用いた1次元データの抽出箇所を示している。

図-3は、図-2中の点線上に得たある時刻の横断方向流速成分の時間平均からの変動分に対して、wavelet解析を適用した結果の例を示している(mother waveletとして、ここではMexican hat型のwaveletを用いた)。

Key Words: 水制, 乱流構造, PIV, LES

〒470-0392 豊田市八草町八千草 愛知工業大学 工学部都市環境学科 TEL0565-48-8121

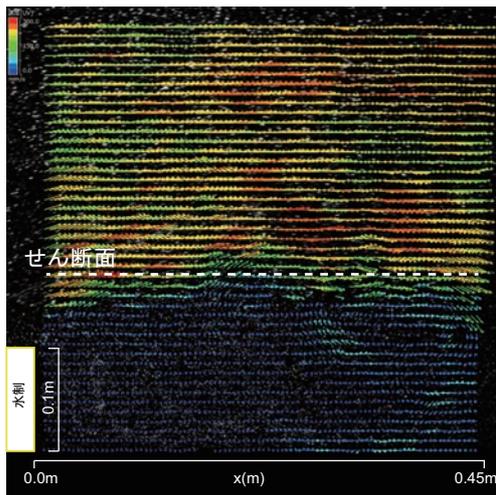


図-2 実験に対する PIV 解析の結果をベクトルの瞬間値として示したもの (底面から高さ 4cm における水平面上の流速成分に対する結果)

通常の波数解析と異なり, wavelet 解析は波数特性の空間的な分布が解析結果に反映される事から, 乱れの構造の空間的分布などの解析に実績を有している²⁾. 図-3 に示されたように, 縦軸は変動の空間的スケール L の逆数に対する \log を取り, 横軸は水制下流面からの流下方向の距離を取っている. 変動の強度はコンターの色で示され, ある空間的位置 (横軸) における, 代表的な乱れのスケール (縦軸) を, コンター図の高低で示している. このように得られた wavelet 解析の各時刻における結果を, 鉛直方向に時間軸を取り, 重ねて示したものが図-4 である. このとき, 図-4 中の赤い面 ($y=1.25$ 付近を代表的な乱れのスケールとした場合の, その点における「流下方向距離 $x(m)$ -時間 (s) 」の平面) での結果のみ抽出したものが図-5 の左図である. また 図-5 の右図は, せん断面における鉛直断面の PIV の結果から, 高さ 4.0cm での鉛直方向流速成分の変動を 1 次元的に抽出し wavelet 解析を行った後に, 上記と同様の処理を行う事で得た図である. 鉛直面での実験時の撮影可能範囲が水平面と比較すると狭いため, 横断方向流速成分と鉛直方向流速成分では解析範囲が異なるが, どちらも時間を経るにつれ (鉛直軸を上方に向かうにつれ), ある強さを持って流速に変動を与えていた構造が, 下流方向 (x 軸右方向) に移動している状況が示されている. この移流をもたらした構造に関して, 横断方向流速成分の変動をもたらす主たる要因を上記 2) の水平渦, 鉛直方向流速成分の変動をもたらす要因を 3) のリブ的構造と推測すると, 数値解析の結果が示した構造と矛盾しないと考えられる.

5. まとめ

本研究では, 数値計算によって水制周辺の流れに存在すると推測された流れの構造を, PIV による面的計測とそれに対する wavelet 解析の適用によって, 実験値から推測する事を試みた. 結果として, 水制周辺では横断方向流速成分の変動と鉛直方向流速成分の変動のどちらもが時間を経るにつれ下流側に移流していく

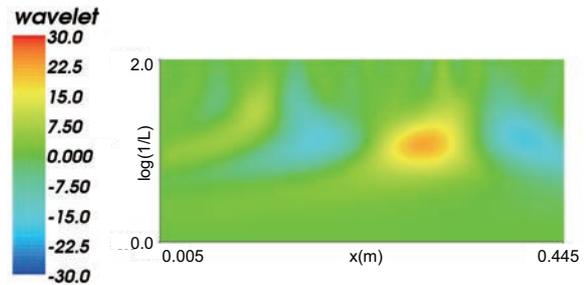


図-3 ある時刻における横断方向流速成分 (せん断面上の 1 次元分布) に対する wavelet 解析結果の一例

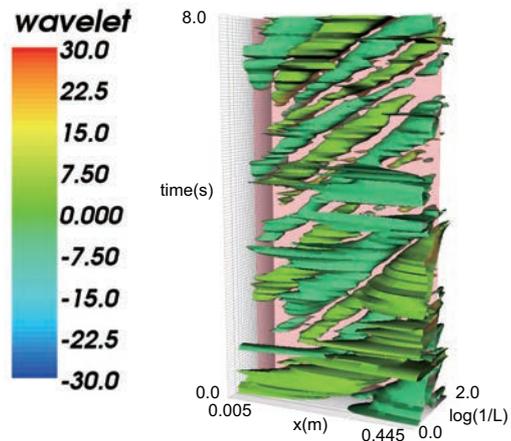


図-4 上記図-3 と同様の各時刻における wavelet 解析結果を鉛直方向に時間軸を取り積み重ねて示したもの

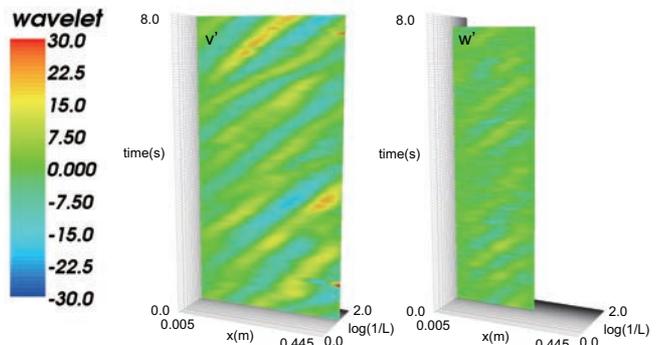


図-5 左: 上記図-4 の赤い面における結果のみ抽出したもの, 右: 同様の解析結果をせん断面上の鉛直方向流速成分の分布に対して適用したもの

事が示され, これらをもたらす水平渦とリブ的構造の存在が示唆された.

参考文献

- 1) Akahori, R., Matsuo, Y. and Ikeda, S.: Study on open channel flow with a submerged structure, *Proceedings of the 6th IAHR Symposium on River, Coastal, and Estuarine Morphodynamics (RCEM2009)*, Santa Fe, Argentina, pp.263-270, 2009.
- 2) 宮本仁志・神田徹: 開水路凹部における流れの組織運動の二次元ウェーブレット解析, *水工学論文集*, 第 45 巻, pp.499-504, 2001.