水制周辺部の浅水流可視化実験と 平均的・組織的流れ構造に関する研究 STUDY ON SHALLOW FLOW VISUALIZATION AROUND SINGLE GROYNE AND THE MEAN/COHERENT FLOW STRUCTURES

門田章宏¹・鈴木幸一² Akihiro KADOTA and Koichi SUZUKI

¹正会員 博(工) 愛媛大学大学院講師 理工学研究科生産環境工学専攻(〒790-8577 松山市文京町3)
²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

Groynes have been used for the stabilization of banks and for creating a navigation channel by confining the cross-sectional area, especially for large European and Japanese rivers. Therefore, turbulent flows and transport phenomena in groyne fields have paid attention to the appropriate design for bank protection and obtainment of enough depth in the main channel as well as the proper environment for ecosystems. In the present study, mean and coherent flow structures around single groyne under emerged and submerged conditions were experimentally discussed. In order to investigate the flow pattern around the single groyne, a scaled and schematized model was implemented and experiments were conducted by means of surface flow visualization technique and Particle Tracking Velocimetry (PTV). Furthermore, analytical techniques of proper orthogonal decomposition (POD) are applied to reveal typical pattern of coherent structures.

Key Words : *Groyne, Shallow Flow, Particle Tracking Velocimetry(PTV), Coherent Structure, Proper Orthogonal Decomposition (POD)*

1. はじめに

河川・海岸における水制や橋脚, 複断面水路等の水理 構造物周辺の準二次元平面流あるいは二次元平面流に関 する研究は,実験的にまた数値計算においてもこれまで 盛んに行われてきており,これらの構造物周辺の汚染物 質の拡散現象や土砂輸送等についても様々な研究が行わ れている.

水制周辺の流れや洗掘現象に関するこれまでの主な研究では、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⁾, Uijttewaalら³⁾等によって行われ、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関する研究がAltai&Chu⁴⁾, Uijttewaalら³⁾, Weitbrecht&Jirka⁵⁾によって詳細に行われている.一方,水制先端付近の流れ構造と洗掘現象について着目した研究もGardeら⁶⁾, Gill⁷⁾, Kuhnleら⁸⁾によって古くから行われている.その他、上述の環境に関する目的や水制先端付近の洗掘防止のための乱れの制御等、各々の目的に応じた最適な水制デザインを提案した研究 (Hentschel &Anlauf⁹⁾, Klaassenら¹⁰, Uijttewaalら¹¹⁾)が行われ, 木製による透過性の水制や水制の勾配を変えて最適な横 断面形状を提案した研究も存在する.また,流れの現地 観察がSukhodolovら¹²⁾, Mutoら¹³⁾, 竹原ら¹⁴⁾によって行われ ている.

流れの境界に存在する水制構造物は様々な役割を持ち, ドイツ・ライン川やエルベ川においては主に貨物船等の 船舶の航行に必要な航路の確保に水制が使われている. その他,護岸や水生生物にとっての環境改善の目的でも 用いられている.この様に様々な水制の役割を持つこと から,水制周辺の流れの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.

上述したようにドイツやオランダなどのヨーロッパ諸 国の河川に造られている水制(groyne)は、水制によって 流水断面を狭くすることで流れを速くさせ、掃流力を増 加させることによって河道の安定化や船舶の航路内の堆 積を防止し、航行に必要な水深を確保するために古くか ら建設されてきたが、日本においても主に護岸の目的で オランダから河川技術が伝わる前(約500年前)から既に建 設されている.

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



写真−1 肱川の水制(ナゲ)



写真-2 肱川水制(写真-1)の空中写真

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.

以上の様な背景により,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から、水制 周辺の二次元浅水流を対象とし、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解明する. こ こでは、広域にわたって分布する水表面の浮遊粒子画像 を的確に追跡し速度差のあるベクトルを評価する画像流 速測定法(Surface Particle Tracking Velocimetry, 以下SPTV) の解析法を開発し、また浅水流可視化画像撮影システム を設置することで広域二次元平面場の瞬間流速を計測・ 評価する. その後, 客観的に乱流の組織構造を抽出でき る方法として正規直交分解法のPOD(Proper Orthogoal Decomposition)解析を採用し水制周辺に瞬間的に起きる 乱れ変動のパターンの中で最も高いエネルギーもつ組織 的構造を抽出することでその解明を試みた.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.



写真-3 浅水流実験水路および装置

2. 実験方法および条件

(1) 愛媛県肱川にある水制(ナゲ)

国土交通省・河川局河川伝統技術データベース (http://www.mlit.go.jp/river/)によると,全国にある直轄管 理河川の中で67箇所の水制が存在し,最も古い水制は約 16世紀頃から建設されている.本研究で対象とする愛媛 県肱川にある水制は17世紀頃に建設され最も古い水制の 一つであり,治水および軍事目的に使用されてきた不透 過水制である.写真-1は,現存する8水制の中で河口か ら上流18km地点にある渡場のナゲと呼ばれる水制であ る. 肱川の最も大きな特徴として,河口部が狭く,支川 が多いことから出水時には水が溜まりやすく捌けにくい という点が挙げられる.このため,これらの水制は大き く水深変化の影響を受け,その周辺の流れは大きく変化 する.本研究では、この肱川にある水制を対象として縮 小模型を作成し浅水流可視化実験を行った.

写真-2は、写真-1で示した肱川水制を上空から撮影し た写真である.水制は河幅130mに対し長さ約30m,幅約 12mの突堤状の形状からなり右岸堤防に対して下流側に 約60°の角度をもった傾斜水制である.本実験で対象と した領域は、水制先端から発生した流れが主流と死水域 とのせん断層で起きる組織渦構造を見るため、写真-2の 白線で示すように水制を上流端に置き、そこから下流側 の領域を設定した.この写真から、水制直下流部では洗 掘が起き、その洗掘部の土砂が下流側に堆積しているこ とから幾度の出水で起きる越流の影響を受けていること が分かる.従って、水深の変化による水制先端およびそ の周辺からの流れを詳細に把握することは重要である.

(2) 可視化実験装置と画像撮影

本研究では、ドイツ・カールスルーエ大学水力学研究所 に設置された**写真-3**に示す水路幅5.5m,水路長13.5mの 広幅開水路を用い、水制周りの浅水流を発生させ可視化 実験を行った.また水路周辺には画像撮影用のデジタル



図-2 2台のカメラを用いた撮影領域

カメラ(PhotonfocusMV-D 1024K-28CL) とカメラを移動 させるトラバース装置、トレーサ粒子供給装置とハロゲ ン光源を設置した. トレーサ粒子についてはポリプロピ レン(粒径2-3mm, 密度0.9g/cm³)を粒子どうしの吸着を防 ぐために黒色ラッカーによるコーティングを施したもの を使用した.水制模型については、水路の大きさを考慮 し図-1の約1/40のスケールモデル(長さ70cm、高さ7cm、 底部幅40cm)を作成した.また、従来の連続水制周辺の 可視化計測の結果15から、水制先端や下流に発生する旋 回渦の形成には水制間距離と長さとのアスペクト比が大 きく影響し、傾斜角の影響が殆ど観られなかったことか ら、本研究で対象とする単一水制の設置については図-2 に示すように水路壁に対して直角に設置した. 実験条件 については、写真-2の肱川橋における水位観測所のデー タから、約800m³/sの流量で水位が2.8mとなり、水制が 越流状態になることから,実験水路における水深は水制 高さの直上下の6cmおよび8cmとし非越流・越流状態の 撮影を行った.また流量については流量制御装置と可視 化計測における制約を考慮して50liter/sとした.一方, 画像取得システムについては、画像取得ソフトウェア (HeuriskoとSilicon Software Micro enable I)を使用した. 画 像取得サイズは1台のカメラについて1024×768pixel, 測 定周波数は10Hzである. このデジタルカメラについて は、水制先端から発達する渦が1台のカメラの撮影サイ ズ(幅1.60m)よりも下流側に大きく発達する現象が見ら れたため2台同時撮影による撮影領域拡張を試みた.撮 影の際には図-2に示すように2台のカメラの撮影領域を 0.25m分だけオーバーラップするようにして、下流方向 の撮影サイズを2.95mまで拡張した. また, さらに2台の カメラを下流側にも移動させ同様な方法で撮影し、全体 で5.66mの領域を撮影した. これら二つの領域は別の時 間に撮影したため、以降に述べる瞬間流データを用いた 組織構造の考察については水制先端付近の構造を見る目 的で上流側のみの領域を, 平均流に関しては上下流両方 を合わせた全領域で考察する.



図-3 FFT法と直接相関法を組み合わせたPTV解析

3. 解析方法

様々な粒子画像流速測定法の中でも、3次元ヴォ リューム内の3成分流速ベクトルへの応用が期待できる として最近注目されている手法が、個々の粒子あるいは 周囲粒子の組み合わせを追跡し流速ベクトルを評価する PTV法である. また、PTV法は水制周辺の流れのように 主流・死水域間の流速差の大きな流れ場にも適用できる. 本解析では、浅水流を対象とした2次元PTV法(SPTV)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を考え開発した.具体的には, FFT相互相関法のみを用いた場合、高速な計算は可能で あるが、相関領域が4の倍数(16,32ピクセルなど)に限ら れ、領域の1/4を超える移動が生じた場合は誤ベクトル の確率が高くなる. また, 直接相互相関法を用いた場合 は、精度は良いものの探査領域サイズを決定するのに不 確定性があることと長時間の計算が必要となる. そこで 本解析では、図-3に示すようにまずFFT相互相関法に よって精度のやや低い仮ベクトルを評価し、このベクト ルの先端を中心に上下左右3ピクセルだけ移動させた探 査領域を新たに設定し直接相互相関法に適用する手法を 考えた. この手法によって、広範囲の個々のベクトルに 対して49回のみの探査で精度を保ちつつ高速計算を可能 にした.この他、サブピクセル解析、画像処理として解 析前に全画像の平均画像を個々の時系列画像から引くこ とにより背景・ノイズ除去を行った.

次に、SPTV法によって得られた瞬間流速ベクトルを 等間隔メッシュ上に補間し、この補間データを用いて平 均流速やその他の乱れ変動量に関する平均流統計解析を 行った.また、客観的に乱流の組織構造を抽出するため の方法として用いられている正規直交分解法(POD法)を この補間した瞬間変動流速データに適用した.POD法は、 非一様せん断流の研究のためLumley¹⁶によって提案さ れ、ランダムな乱流場から最大のエネルギーを持つ変動









場を抽出し、組織的な構造を見いだす手法である。具体的な解析手順およびその他の抽出・分解法の比較についてはKevlahanら¹⁷⁾によって述べられているが、概してPOD法では以下ようにある基底(固有)関数 $\phi(x)$ を瞬間変動流速 $u \ge \phi$ の内積を最大化するように設定する。

$$\left| \boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{\phi} \right| = \lambda_{\boldsymbol{u}} \tag{1}$$

uに関する固有値 λ_u の最大化は以下の第一種のFredholm 型の積分式を導くことになる¹⁷⁾.

$$\int R_{uu}(x, x')\phi_{u}^{(n)}(x')dx' = \lambda_{u}^{(n)}\phi_{u}^{(n)}(x)$$
(2)

ここで*R_{uu}*は二点間(*x*, *x*')の速度相関である.上式は離散 化され相関行列の固有値問題に帰着される¹⁶.ある振幅 に対応した固有関数(モード*n*)を解き,最大(あるいは第 二,第三)のエネルギーを持つ流れ場を抽出できる.

4. 実験結果および考察

(1) 水深の変化による水制周辺の乱流特性量の相違

図-4は非越流・越流時における水制周辺の瞬間流速ベクトルの特徴的なパターンを示したものである.水面が水制高さより下にある非越流状態(a)では、水制先端からの剥離によって強いせん断層が形成されるのに対し、越流状態(b)の流れは水制上部を流れる越流からの段落ち流れによって主流と水制直下流部の低速域との速度差が弱くなり、非越流状態と比較して弱いせん断層が形成されていることが推察される.

これらの瞬間流速ベクトルの時系列データを等間隔 メッシュに補間し平均流速ベクトルを評価したものが 図-5であり、それぞれ非越流・越流状態について流線の 分布も併せて示している.また図中のコンターレベルは ベクトルの大きさを示している.これら二つの状態は明





らかにその分布が異なっており,越流・非越流による流 水断面の違いにより水制下流側の流れの構造も異なって いる.(a)の非越流状態では,瞬間流速ベクトルのパター ンで示したように,水制先端からの剥離流れによって, 水制下流側に水制長さの二倍程度のスケールをもった準 二次元的な第一次旋回渦が生じている.この第一次旋回 渦が大きく時計回りに流れるため,左岸側にある主流域 への運動量輸送とともに水制直下流部の小さな第二次旋 回渦が反時計回りの流れを呈することになる.また,こ れら二つの旋回渦の間には右岸から主流域に向かう流れ が生じ周辺における大きな速度差を生じさせている.

一方,越流状態では、水制上部から主流方向に向かう 流れによって主流部との速度差が小さくなり、弱いせん 断層が形成されるため比較的小さな旋回渦が形成される. また、水制上部での速い流れが、その直下流部で鉛直方 向に向かう段落ち流れに転じ急激に主流方向の流れを減 速させている.本研究の浅水流可視化実験ではこの様な 流れの解釈は難しいが、写真-2に観測された洗堀現象の 解明には三次元的な流れも考慮した流れの解明が今後必 要である.

さらに図-6,図-7および図-8は、それぞれ乱れ強度の 主流・横断方向成分(ums,wms)およびReynolds応力 – uw の分布を、同様に非越流・越流状態について示したもの である.なお、非越流部を図中に白線で示している.こ れらの乱流特性量の分布は、非越流状態の場合は水制先 端から発生し主流方向に斜めに向かう流れと二つの旋回 渦間から主流に向かう流れに伴って大きな乱れ変動領域 が拡がっている.また、越流状態の場合は、水制を越流 する流れの影響によって水制下流部で乱れが大きく、水 制先端からの発達も同様に見られるが越流によって主流 方向成分が強くなった分布を示している.特に越流下に おける乱れ強度の分布では、水制下流部200cm付近から 右岸側のへの拡がりが大きく、図-5(b)で示した旋回渦の 影響によって大きな乱れ変動が生じ、この影響が下流側 に伝わっていると考えられる.さらに、図-8で示す Reynolds応力分布では、特に非越流状態(図-8(a))におい て、図-5(a)で観察された二つの旋回渦の間に起きる主流 域に向かう流れの領域で大きな値を示し、せん断層を形 成している.この領域では、第一次および二次旋回渦の 発生に影響を及ぼす大きな運動量輸送が起きている.

(2) POD解析による組織渦構造の抽出結果

瞬間的乱れ変動場における組織的な構造を客観的に抽 出するPOD法による解析結果を非越流・越流状態につい てそれぞれ図-9および図-10に示している. これらの図 には、それぞれ最大(モード1)から第二・第三(モード2,3) までの変動パターンのみを示しており、それぞれ乱れ変 動場の中で最も支配的および第二,第三の特徴的(組織 的)な変動パターンに対応している. 非越流下において は、何れのモードにおいても水制先端から発生する剥離 渦に伴って二つのペアをなす時計回り・反時計回りの変 動場が現れていることが特徴的である.これらは、図-5(a)のベクトルのパターンで観察された二つの旋回渦の 間に発生する主流域へ向かう流れが左岸側の主流と衝突 する領域であり、図-7(a)の横断方向の乱れ強度分布や、 図-8(a)のReynolds応力分布の強い領域と対応している. 特にモード3においてはこれらの流れに伴う変動場が現 れている.

一方,図-10に示す越流下のPOD解析結果のパターンでは,水制先端付近ではなく下流側で大きく発達した変動場が観察できる.モード2および3の分布では非越流流下と同様に二つのペアをなすパターンが観られるがこれ

図-9 POD解析による抽出結果(非越流) らは水制より離れた領域に発達しており、図-7(b)の乱れ 強度の横断方向成分の分布と対応している.また,非越 流・越流状態ともに水制先端付近の変動がモード3にお いて観られるため、この付近の洗掘現象にも影響するも のと考えられる.

7. おわりに

本研究では、水制の越流・非越流状態によって及ぼさ れる平均的・組織的構造の変化に着目し、浅水流可視化 実験や広範囲な流速に対応できる画像粒子追跡法(PTV 法)を適用し瞬間流速を評価した.また,これらの瞬間 流速データをPOD法等で乱流統計解析することで、水制 周辺に発生する特徴的な組織渦構造を抽出した.本結果 は瞬間的に発生するReynolds応力の評価や特徴的な変動 パターンのある領域での時空間相関解析を行うことで移 流過程の解明に応用できる. ある大きなエネルギーを もった瞬間的乱れ変動が、どの程度流れやその他の物質 輸送に及ぼすかについて定量的に評価することも、従来 の平均的な流れに基づいて行われた評価とともに重要で ある.

参考文献

- 1) Chen, F-Y and Ikeda, S.: Horizontal separation flows in shallow open channels with spur dikes, J. Hydroscience and Hydr. Engrg 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. Engrg. ASCE, 123(2), pp.98-107, 1997.
- 3) Uijttewaal, W.S.J, Lehmann, D. and Mazijk, A. van: Exchange process between a river and its groyne fields: model experiments, J. Hydr. Engrg ASCE, 127(11), pp.928-936, 2001.
- 4) Altai, W. and Chu V.H.: Retention time in a recirculat-ing low, Proc. XXVI IAHR congress, San Francisco, pp.9-14, 1997.
- 5) Weitbrecht, V. and Jirka, G.H.J.: Flow patterns and exchange



- 6) Garde, R.J., Subramanya, K. and Namburdripad, K.D.: Study of scour around spur dikes, J. Hydr. Div. ASCE 87(HY6), pp.23-37, 1961.
- 7) Gill, M.A.: Erosion of sand beds around spur-dikes, J. Hydr. Div. ASCE 98(HY9), 1587-1602., 1972.
- 8) Kuhnle, R.A., Alonso, C.V., Shields, F.D.: Local scour associated with angled spur dikes, J Hydr. Engrg ASCE 128(12), 1087-1093, 2002
- Hentschel, B. and Anlauf, A.: Ecological optimization of groynes 9) in the Elbe river, New insights in the physical and ecological process in groyne fields, van Mazijk and Wei-brecht eds., 121-133, 2002.
- 10) Klaassen, G.J., Douben, K. and van der Wal, M.: Novel approaches in river engineering, Proc. Int. Conf. on Fluvial Hydraulics, Bousmar and Zech eds., Balkema, The Netherlands, 27-43, 2002.
- 11) Uijttewaal, W.S.J., Berg, M.H. and Wal, M. van der: Experiments on physical scale models for submerged and non-submerged groynes of various types, Proc. Int. Conf. on Flu-vial Hydraulics, Bousmar and Zech eds., Balkema, The Neth-erlands, 377-383., 2002.
- 12) Sukhodolov, A., Uijttewaal, W.S.J. and Engelhardt, C.: On the correspondence between morphological and hydro-dynamical patterns of groyne fields, J. Earth Surf. Process Landforms, 27, 289-936.2002.
- 13) Muto, Y., Baba, Y. and Fujita, I.: Velocity measure-ments in rectangular embayments attached to a straight open channel, Proc. Int. Conf. on Fluivial Hydraulics, Bousmar & Zech eds., Balkema, The Netherlands, 1213-1219., 2002.
- 14) 竹原・久末・江藤・高野: 現地河川模型実験へのPTVの適 用性の検討,水工学論文集,第50巻,pp.715-720,2006.
- 15) Weitbrecht, V.: Influence of Dead-Water Zones on the Dispersive Mass Transport in Rivers, Doctor Dissertation in Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe, 2004.
- 16) Lumley, J. L: Atmospheric Turbulence and Radio Wave Propagation (ed. Yaglom A. M. and Tatarsky V. I.), Nauka, Moscou, pp.166-178., 1967.
- 17) Kevlahan, N.K.-R., Hunt, J.C.R. & Vassilicos, J.C.: A comparison of different analytical techniques for identifying structures in turbulence. Appl. Sci. Res. 53, pp.339-355, 1994.

(2006.9.30受付)

