

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

STUDY ON INSTANTANEOUS-ADVECTIVE STRUCTURES OF LARGE SCALE
COHERENT VORTICES GENERATED DOWNSTREAM OF A SINGLE GROUYNE

門田章宏¹・小島英二²・新家研蔵³・鈴木幸一⁴
Akihiro KADOTA, Eiji KOJIMA, Kenzo SHINYA 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学生員 学(工) 愛媛大学大学院博士前期課程 理工学研究科生産環境工学専攻

⁴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

To investigate the instantaneous flow patterns around a single groyne, a scale model was installed in the shallow water channel and experiments were conducted by means of surface flow visualization technique. A particle tracking velocimetry (PTV) method has been developed for shallow flow conditions and has been adopted to estimate the instantaneous velocity fields to cope with the problem of a very high dynamic velocity range behind the groyne. Proper orthogonal decomposition (POD) is applied to obtain an effect of the fluctuating flow pattern and its coherent structures. Conditional sampling technique (CST) is also applied to reveal the advection properties of POD decomposed flow pattern. POD decomposed coherent patterns and their advection properties under submerged and emerged conditions. One of 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 : *Groyne, Surface flow visualization, Weiss function, Conditional sampling technique*

1. はじめに

堤防から河心の方向に造られる水制構造物の主な機能として、流水の流向制御機能、河岸付近の洗掘防止機能等が挙げられる。これらの機能より、河岸の浸食あるいは護岸の破損を防ぐこと、低水路法線形の整正・修正を行うこと、さらに航路のための水深の確保、流水の確保等の効果が期待される。また、生態系保全という点からも近年注目されるようになってきた。

水制構造物は、河岸付近の流速を軽減し、木材などのソフトな素材で造られた透過型水制や、コンクリートなどのハードな素材で造られ流水の流向制御を行うための不透過型水制がある。その中でも越流型水制と非越流型水制に分けられ、高い河岸(堤防)を持つ大きな河川においては非越流型水制がしばしば用いられている¹⁾。また水制は単独に設置される場合と数基が連続的に設置される場合とがある。一般的にライン川や木曽川の下流のような緩流河川では、杭打ちや木組みによる透過型水制が多数、連続的に設置され、愛媛県西部を流れる肱川では

ナゲと呼ばれる石組みの越流型の低い不透過水制が単独で設けられた例がある。

この様な様々な水制構造物に関しては従来多くの実験、研究がなされているが、それらの研究は大きく二つに分けられる。一つは移動床水路実験による水制周辺の局所洗掘現象の解明^{2,3)}、もう一つは、固定床水路実験または数値解析による水制近傍の流況の解明^{4,5)}である。前者においては、河川構造物である水制の破壊防止対策を目的とした研究であり、後者は水制設置後において、河道内の流れ場の変化を明らかにすることを目的とした研究である。両者とも水制周辺の議論にとどまっており、水制設置による下流部に広域に発達する流れと河床波形状の変化や、後者については、瞬間的に発生する組織的流れ場についての議論がなされていない。特に、この様な現象に及ぼす流れの影響に関しては、従来の平均流特性の評価よりも、近年頻発する突発的な豪雨・洪水によって引き起こされる護岸崩壊・局所洗掘現象を考慮すると、むしろ瞬間的流れの影響を評価することが重要である。これらに着目し、本研究では水制設置によってもたらされる下流部に広範囲に発達する流れ場を対象にする。こ



写真-1 肱川河口から18.8kmに位置する不透過水制(ナゲ)

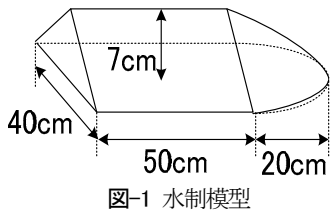


図-1 水制模型

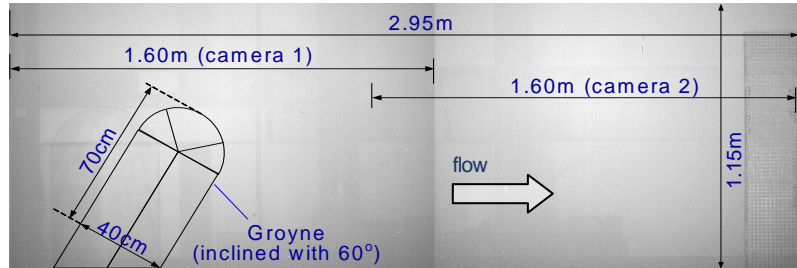


写真-2 水制模型の撮影位置とオーバーラップさせた2台のカメラ画像

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、大きな速度差のあるベクトルを評価する画像流速測定法(浅水流可視化手法)により、単独水制下流部の広域二次元平面場の高精度な瞬間流速を計測・評価した。その後、前報⁹⁾で行った正規直交分解法(POD解析)を用いて、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をもつ組織的構造を抽出した。さらに、このPOD解析によって抽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(Conditional Sampling Technique, 以下CST法)を採用した。CST法では、POD解析から抽出された組織的乱れ変動パターンを示す領域のスペクトル解析を行うことで発生周期を求め、これを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の移流過程を捉えることを可能にした。

2. 浅水流可視化実験

本実験では、写真-1に示す愛媛県肱川河口から18.8km地点にあり、護岸・低水路確保のために設置されている渡場(わたしば)のナゲと呼ばれる不透過水制を対象とし縮小模型を作成した。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、水路壁に対して60度傾斜させ、水路幅5.5m、水路長13.5mの広幅開水路に設置した(写真-2)。また、肱川流域の特徴として、河口部が狭く、支川が多いことから、水制周辺部は大きな水深変化の影響を受け、度々越流・非越流を繰り返している。そこで、実験条件として水深を水制高さ(7cm)を挟んだ6cmおよび8cmとし、非越流・越流状態の計測を行った。また、流量については僅かな水深の違いによる浅水流への影響は小さいと考え、両実験ともに流量制御装置と可視化計測における制約を考慮して $50,000\text{cm}^3/\text{s}$ とし、水路上流部に整流板を設置し、水路全幅に渡って一様流を発生

させた。また、可視化画像撮影については、広域画像撮影のために高速デジタルカメラ(PhotonfocusMV-D 1024K-28CL)を2台同時使用し、各カメラからの画像の一部分を0.25m分だけオーバーラップするようにし、下流方向の撮影サイズを2.95mまで拡張し撮影を行った(写真-2)。撮影周波数は10Hz、撮影時間は5minであり、カメラ1台あたりの画像サイズは 1024×678 ピクセルである。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。また、水路周辺には、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 $0.9\text{g}/\text{cm}^3$)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、ローラブラシとギアモータを装着した装置により水制模型上流部から均等に散布した。トレーサ粒子投入後、水制背後の旋回流に伴って均等に分散されたのを確認後に撮影開始した。

3. 解析方法

本解析では、浅水流を対象とした二次元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索領域サイズを決定するのに不確実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-2に示すようにまず対象粒子の周囲32ピクセルの比較的大きな第1画像を定義し、次の時刻(0.1秒後)の第2画像を第1画像と同一位置・サイズに設定した後、両者の画像をFFT相互相関法によって相関値のずれ

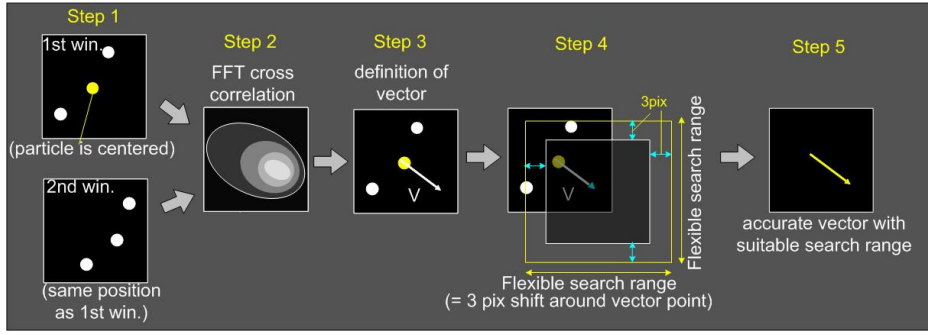


図-2 FFT相互相関法で定義した探査領域を直接相互相関法に適用した本PTV解析の流れ

を評価する。この相関値のずれと対象粒子の動きを対応させ、精度のやや低い仮ベクトルを評価する。その後、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るのみの探査領域を新たに設定し、画像サイズを対象粒子周囲16ピクセルに小さく限定した後、直接相互相関法に適用する手法を考えた。本研究で対象とする水制背後の浅水流では大きな速度差が発生することから、この手法によって広範囲なベクトルを49回のみの探査で精度を保った状態の高速計算を可能にした。なお、Stanislasら⁷⁾のstrong vortex画像を用い、Lavision社のFlow Masterによる解析結果と検証を行ったところ、各ベクトルあたり平均サブピクセル以下(0.01)の誤差の範囲内で良好な結果を得ている。また、これらの解析終了後にサブピクセル解析を行っている。さらに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以下に示す乱流統計解析を行った。

まず、水制先端から下流部に向かって発生する瞬間的流れの組織的構造を見出すパラメータの一つとして、以下のWeiss関数(Q 値)⁸⁾を採用する。

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

ここで、 \tilde{u} および \tilde{w} は、それぞれ瞬間流速の主流方向(x)および横断方向(z)成分に対応する。上式(1)の第1,2項はせん断(S)を表し、第3項は回転(ω)を表している。 Q 値が正を示している流れの場合はせん断による影響が大きい構造が、負の場合は回転運動が支配的になる組織的構造が検出でき、これらの境界となるゼロラインは渦のスケールを定義できる指標となる⁸⁾。

さらに、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。様々なパターン抽出法の中でも、POD法による解析結果は、乱れエネルギーに対して支配的な寄与率を持ち、流れの中において組織的構造を表すということがLumley⁴⁾によって述べられている。概してPOD法では以下のようにある基底(固有)関数 $\phi(x)$ を瞬間変動流速 u と ϕ の内積を最大化するように設定する。

$$|u \cdot \phi| = \lambda_u \quad (2)$$

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⁹⁾。

$$\int R_{uu}(x, x') \phi_u^{(n)}(x') dx' = \lambda_u^{(n)} \phi_u^{(n)}(x) \quad (3)$$

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⁹⁾。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。

さらに、POD解析によって抽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、以下の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。

$$\langle q(x, z, \Delta x, \Delta z, t, \tau) \rangle = \frac{\int q(x + \Delta x, z + \Delta z, t, \tau) \cdot I(x, z, t) dt}{\int I(x, z, t) dt} \quad (4)$$

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)に適用する。上式(4)における 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、 $I(x, z, t)$ は判別関数といい、非越流・越流状態について、それぞれ次式のように定義する。

$$I_e(x, z, t) \equiv \begin{cases} 1: u < 0, w > 0 \text{ \& } |uw/u'w'| \geq H_e \text{ (非越流)} \\ 0: otherwise \end{cases} \quad (5)$$

$$I_s(x, z, t) \equiv \begin{cases} 1: u < 0, w < 0 \text{ \& } |uw/u'w'| \geq H_s \text{ (越流)} \\ 0: otherwise \end{cases} \quad (6)$$

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。判別関数 I および閾値 H は、非越流(emerged)・越流(submerged)の状態を表すために、それぞれ添え字 e および s を用いている。上式の u および w の正負(方向)については、POD解析によって得られた最も特徴的で高いエネルギーをもつ乱れ変動パターンが、越流・非越流状態において異なった結果を得たため、それぞれ個別に設定した。ある時刻の固定点における変動パターンが上式の条件を満たしたときに1、それ以外は0と

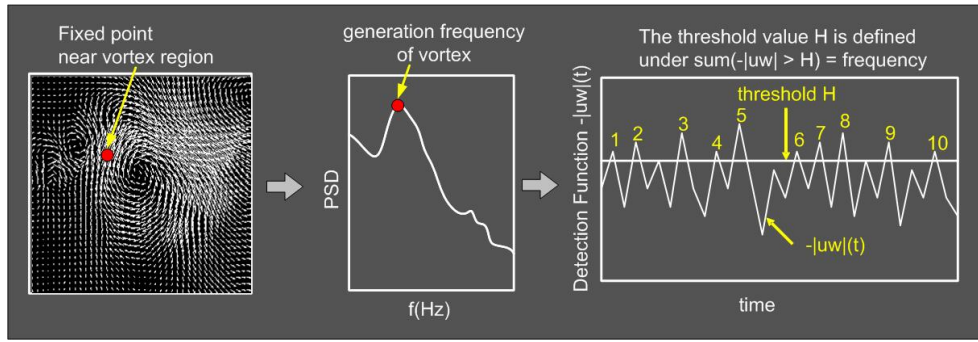


図-3 条件付きサンプリング手法(CST法)における判別関数の閾値 H の決定手順

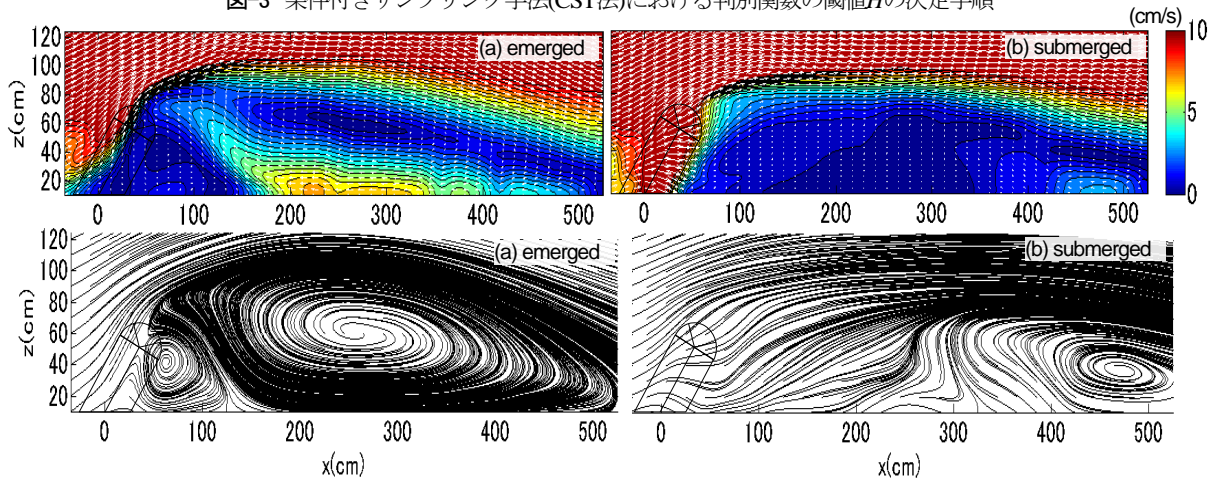


図-4 非越流・越流状態における水制周辺の平均流速ベクトルおよび流線の分布

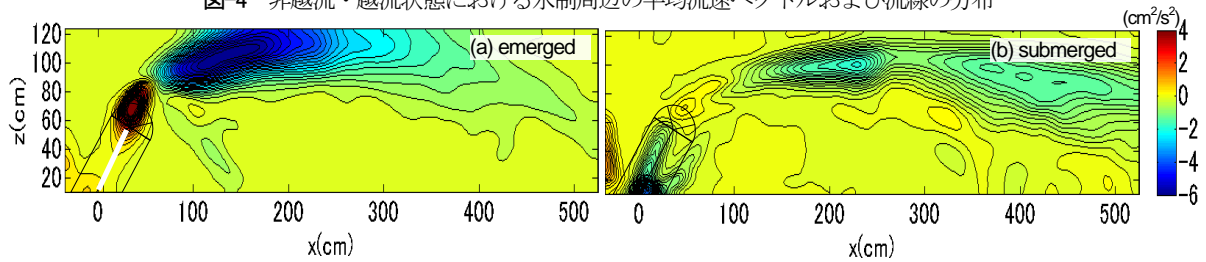


図-5 非越流・越流状態における水制周辺のReynolds応力分布 ($-\overline{uw}$) [cm^2/s^2]

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)のみを抽出することで、その移流過程が求められる。

図-3に、判別関数の定義手順を具体的に示している。まず、POD解析から得られた最大エネルギーをもつ特徴的な変動場(ここでは、旋回流の発生領域)の中から一点を選び、その点を固定点と定義し、方向成分を定義する。次に、固定点における瞬間流速の時系列のスペクトル解析を行い、変動パターンの発生周波数 f を評価する。閾値 H は、流速変動 u および w が判別関数(式(5),(6))で定義した方向成分を満たし、閾値 H を超えた運動量 $|uw/u'w'|$ の時系列データの総数が、スペクトル解析で評価した発生周波数 f と対応するように決定される。

4. 解析結果および考察

(1) 平均流構造に関する概説

図-4は、非越流・越流状態における水制周辺の平均流速ベクトルおよび流線の分布を、全撮影領域($1.6\text{m} \times 5.66\text{m}$)について示したものである。なお、図中のコンターレベルはベクトルの大きさを表している。水制下流

部の旋回流に関しては、水制高さの直上下の越流・非越流状態の僅かな水深の違いによってその構造が大きく異なっている。非越流状態(a)では、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流が生じ、越流状態(b)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流が水制から離れた下流部に形成される。これらの旋回流のスケールに関しては、前報²⁾で報告した直角配置の結果と同様に傾斜配置でも同様な傾向を示しているが、水制によって閉塞される断面(水制長さの横断方向成分と水路幅との比)が同一であるためと考えられる。

さらに図-5は、Reynolds応力($-\overline{uw}$)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Reynolds応力分布は、非越流状態(a)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流間に大きなせん断領域が広がっている。また、越流状態(b)の場合は、水制を越流する流れの影響によって水制直下流部で大きくなる。また、水制先端からの発達も越流状態でも

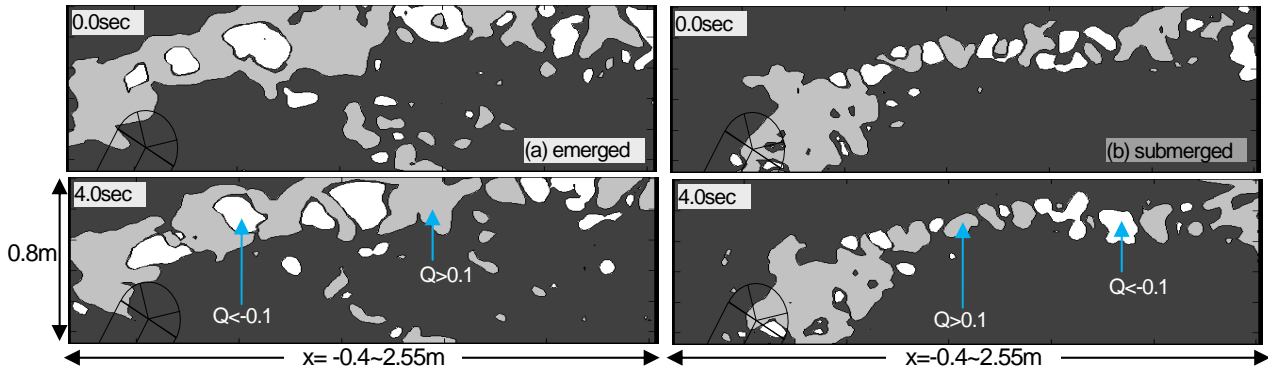


図-6 非越流・越流状態における水制先端～下流部のWeiss関数(Q 値)の分布 [1/s]

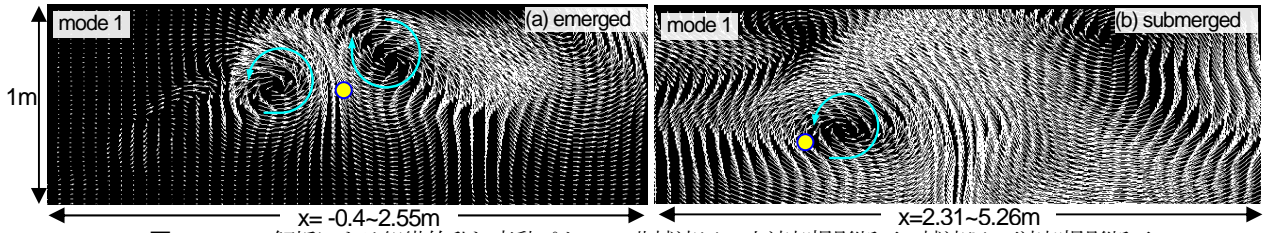


図-7 POD解析による組織的乱れ変動パターン(非越流(a):上流部撮影断面,越流(b):下流部撮影断面)

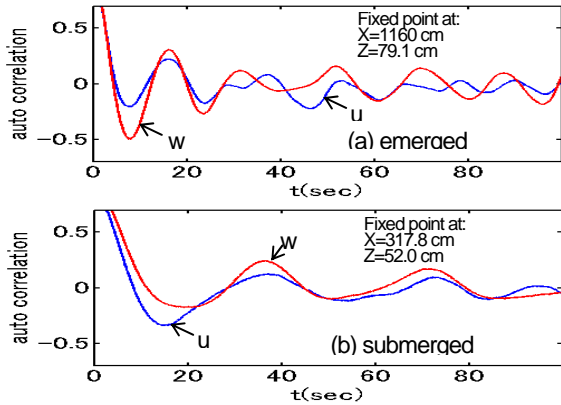


図-8 各固定点における自己相関関数

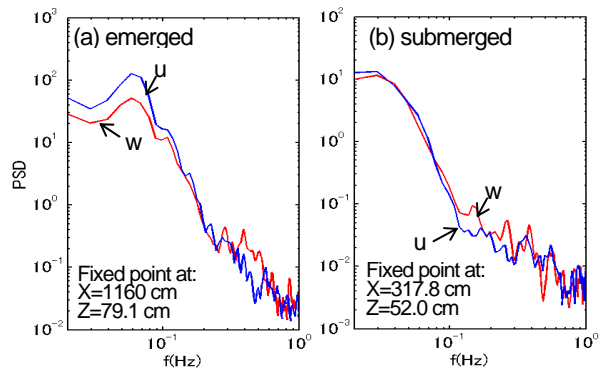


図-9 各固定点におけるPSD分布

同様に見られるが、むしろ主流方向に細く伸びた分布を示している。さらに、水制下流部300cm付近から右岸側への拡がりが大きくなり、図-4(b)で示した旋回流の発生する領域でせん断層が発達し大きな乱れ変動が生じていると考えられる。これらのReynolds応力分布は、ある一種の(平均的な)乱れ変動パターンを示しているが、上述したように瞬間的のどの様な強いエネルギーをもった変動が発生しているのかについて明らかにすることも重要である。このためには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解析やCST法によって明らかにすることが有効である。

(2) 瞬間的乱れ変動の組織構造とその移流過程

図-6は、式(1)で定義したせん断(S)と回転運動(ω)の大きさの割合を示すパラメータである Q 値の時間的変化を示したものである。これらの図では、組織渦のスケールとなる S と ω の境界を示すために、 $Q=0$ を境として -0.1 以下(ω)の領域を白に、 $+0.1$ 以上(S)の領域をグレーで示した。非越流状態(a)では、水制先端付近から大きなせん断層が形成され移流されている様子が確認できる。一方、越流状態(b)では水制直下流部の段落ち流れによる速度差の影響で大きなせん断層が広がるものの、さらに下流部では越流の影響で弱くなる。この付近でのせん断のス

ケールは回転運動と同程度で比較的小さくなる。Weiss関数によってせん断の支配する領域と、その領域の時間的移流過程を明らかにすることで、水制下流部に形成される特徴的な河床波¹⁰⁾への影響範囲を特定することが可能であると考えられる。

さらに、図-7は、POD解析による瞬間的乱れ変動場における組織的な乱れ変動パターンの抽出結果を非越流・越流状態についてそれぞれ示したものである。これらの図には、それぞれ最大のエネルギー(モード1)をもつ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(組織的)な変動パターンに対応している。また、ここで示したPOD乱れ変動パターンの図は、図-4で示した非越流・越流状態の旋回流の発達位置に着目し、上流側および下流側の撮影領域(それぞれ $1.6\text{m} \times 2.95\text{m}$)に個別に設定した。図-7(a)に示した非越流状態では、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。一方、図-7(b)に示す越流状態のPOD解析結果のパターンでは、下流部に瞬間的に発生する旋回流の周辺に最も特徴的な変動パターンが抽出できている。これらの分布は、図-5のReynolds応力の平均的分布では解明されない大きなエネルギーを持った瞬間的に発生する組織的乱れ変動場を示している。

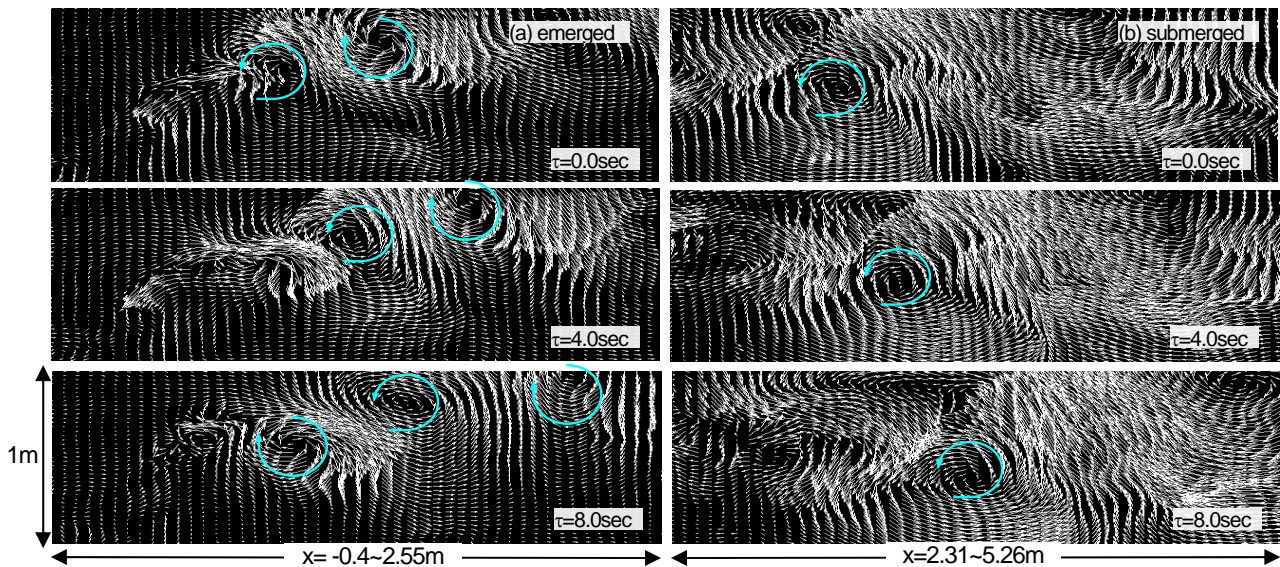


図-10 CST法による組織的乱れ変動(POD)パターンの移流過程

次に、POD解析によって抽出された乱れ変動パターンが、ある時刻に瞬間的に発生した後、どのような移流過程を示すかについて上述のCST解析を行った。式(4)における固定点は、図-7のモード1に○印で示した特徴的な変動パターンの中の一点に設定した。図-8および図-9は、それぞれ各固定点における自己相関関数およびパワースペクトル分布を示しており、特徴的な周期性が確認できる。式(5)および式(6)の判別関数における閾値 H は、これらのスペクトル分布より得られた発生周波数 f を基に、上述の手順に従って評価されている。

図-10は、定義された判別関数を用いて、CST法による解析結果を示したものである。最大エネルギーをもつ瞬間的・組織的乱れ変動パターンの、各遅れ時間 τ についての移流過程が観察できる。非越流状態(a)では、水制先端から剥離渦が発達し旋回流が形成される領域のせん断層に沿って、これらの乱れ変動パターンが左岸側方向に移流していることが分かる。この他、ここでは示していない第二、第三のエネルギーを持つその他のモードに対応した乱れ変動も間欠的に発生し、せん断層(剥離渦)のスケールを変化させていると考えられる。一方、越流状態(b)では水制を越える流れによって、むしろ主流方向の流れが卓越しているため、非越流状態と比較して若干右岸側方向に移流しているものと考えられる。

これらの組織的乱れ変動に関する解析結果は、最大洗掘深の評価や水制下流部に与える流れの影響に関する従来の研究成果を踏まえて、瞬間的で強いエネルギーを持ったせん断応力の新たな評価を行うことで、突発的で瞬間的に変動する土砂輸送・河床形状の変化に適用できると考えられる。

5. おわりに

本研究では、単独水制下流部の河床波形状に影響すると考えられる広範囲な流れの瞬間的・組織的構造の変化に着目し、非越流・越流状態での浅水流可視化実験を行い、さらに広範囲な流速差に対応できる画像粒子追跡法

(SPTV法)を開発・適用し瞬間流速を評価した。また、この瞬間流速データをWeiss関数により組織渦のスケールを評価し、POD解析やCST法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、その移流過程を解明した。ある大きなエネルギーをもった瞬間的乱れ変動が、どの程度流れや物質輸送現象に影響を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り、本研究で得られた成果を今後様々な現象に展開していく予定である。

参考文献

- 1) イヴァン・ニキティン著、福留脩文・山脇正俊訳：水制の理論と計算、(株)信山社サイテック、1995。
- 2) 村本嘉雄・Md. Munsur RAHMAN: 突堤状河川構造物周辺における最大洗掘深の簡易予測法、土木学会論文集、No.642, pp.31-34, 2000。
- 3) 前野詩朗・小川信・上関矢次: 段波通過時の水制周辺の局所洗掘の解析、水工学論文集、第48巻, pp.817-822, 2004。
- 4) 道典康治・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。
- 5) 富永晃宏・田中典秀: 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。
- 6) 門田章宏・鈴木幸一: 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、水工学論文集、第51巻, pp.721-726, 2007。
- 7) Stanislas, M., Okamoto, K. and Kähler, C.: Main results of the First International PIV Challenge, Measurement Science and Technology, vol. 14, R63-R89, 2003。
- 8) Bram van Prooijen: Shallow Mixing Layers, Doctoral Thesis at Delft University of Technology, 2004。
- 9) Lumley, J.L.: Atmospheric Turbulence and Radio Wave Propagation (ed. Yaglom A. M. and Tatarsky V. I.), Nauka, Moscow, pp.166-178, 1967。
- 10) 森本稔・鈴木泰幸・門田章宏・鈴木幸一: 単独水制周辺の局所洗掘と河床形態の変化に関する研究、土木学会四国支部・第13回技術研究発表会・講演概要集, pp.204-205, 2007。(2007. 9. 30受付)