

河床波上非定常開水路流れの 時空間相関構造に関する研究

瀬津家久¹・門田章宏²・新橋秀樹³・倉田昌明⁴

¹正会員 工博 京都大学教授 環境地球工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工博 愛媛大学助手 環境建設工学科

³正会員 工修 JR東日本

⁴学生会員 京都大学大学院 環境地球工学専攻

本研究では、流れの非定常性と河床形状が生み出す空間的な流れの非一様性といった観点から、河床波背後に発生する組織渦構造に与える影響について時空間相関解析に基づいた実験的考察を行った。非定常流れの下で河床波背後に発生する剥離渦、コルク・ボイル渦を対象とし、空間的に離れた二地点にそれぞれ流速計を設置して同時計測実験を行い、得られたデータを従来型あるいは条件付き時空間相関解析に適用することによって組織渦の移流過程を議論した。ここでは、増水期・減水期間の相違、すなわち各位相における組織渦の発生形態、移流特性を見るために「固定時間」の定義、条件付き時空間相関解析における判別関数およびしきい値の決定方法についての説明を行い、鉛直断面内および三次元空間内の組織渦の発生形態をモデル化する。

Key Words : unsteady open-channel, spatial acceleration/deceleration, separated & kolk-boil vortices, conventional & conditional space-time correlation, fiber-optic LDA

1. 緒 論

開水路流れにおいてもバースティング現象が発生することがGrass(1971)¹⁾の可視化実験やNakagawa & Nezu(1976)²⁾による時空間相関解析によって確認され、境界層流れと共通した構造であることが示された。さらに、実河川の観測では、これとは異なる様々な大規模組織渦が確認されており、各種の物質輸送がこれらの組織渦によって引き起こされると考えられている。また、自由水面を持たない閉管路の乱流やポテンシャル流れを外側にもつ境界層乱流とは異なった大規模な組織渦が存在する。洪水時の河川流の航空写真には、二次流を引き起こす障害物が存在しないにもかかわらず、河床から巻き上げられた浮遊物の集合によってできる縦渦が見られる。この縦渦はほぼ水深の2倍のスケールで等間隔に整然と現れることが多く、開水路流れに発生するバースティングが外層に到達する場合の間隔とほぼ等しい。このように、壁面領域での組織渦と外部領域での大規模渦の相似な特性が見られることから、それらの発生要因やバースティング現象との関

連が推測されるが、未だ明確にされていない。

一方、水面付近の外層においてはコルク・ボイル渦と呼ばれる組織渦が存在し、高濃度の浮遊砂を伴って河床から水面に向かって浮上する現象が観察される。洪水時には、ときおりあたかも大量の水が下から湧き出しているかのように河川の表面に円形に盛り上がりながら流下する。ボイルは、大気中に発生する竜巻と似ているが、その回転は小さく水面で渦輪となって盛り上がり周囲へと拡散しながら流れるように見える。Jackson(1976)³⁾は、このようなボイルの実観測を行い、河床波の谷からボイルが生じやすいことを見だし、その発生周期をバースティング現象の周期同様外部変数で表している。宇民・上野(1977)⁴⁾や福岡ら(1980)⁵⁾は、ボイルの発生しやすい河床形状で可視化観測を行い、馬蹄型渦モデルで現象が説明されることを示した。これらのボイル渦に関する知見から、最も基本的な流れである直線状の河川にみられるボイル渦は、その発生機構の相違からFig. 1に示す三つの形態に分類される。第1種のボイルは砂漣や砂堆の背後に形成されるもので、強いエネルギーを持ち、土砂の浮

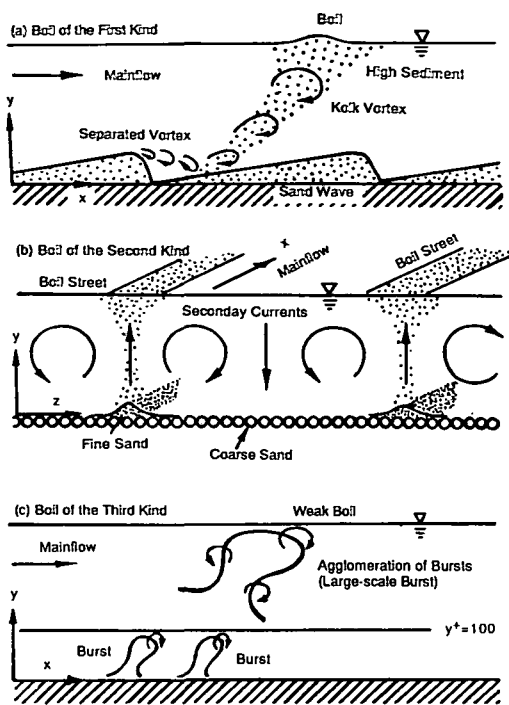


Fig. 1 Generation mechanism of kolk-boil vortex.

上輸送の主因となる。第2種のボイルは、縦筋状の sand ribbon との相互作用で発生するセル状の縦渦(二次流)に伴って生ずるものであり、ridge 上に発生する上昇流が水面にまで達する。さらに、第3種のボイルは河床で発生したバースト現象が発達・群体化したものである。河川のように高 Re 数の流れでは、第3種のボイルは弱くなるから、第1および2種のボイルが支配的となるものと考えられ、河床形状と密接な関係があることが推察される。このような実河川に発生する組織構造は、洪水流で観測されることが多く、浮遊砂輸送も激しく起こる。伊勢屋・池田(1986)⁶⁾による大型水路を使った洪水流下での浮遊砂計測では、砂堆の発達期である増水期において、砂堆の前縁から剥離した強い乱れが再付着点に強く衝突する流れが卓越し、この流れによって砂堆の表面は著しく浸食され、捻れながら強く水面まで上昇する渦、すなわちコルク・ボイル渦が多量の土砂とともに発生することが観測されている。一方、減水期においては砂堆は安定し、それに伴って土砂輸送もほとんど発生しなくなる。また、長谷川(1989)⁷⁾による石狩川の洪水流の観測結果でも、増水期が浮遊砂濃度が高く、乱れそのものも大きくなることが報告されている。

このように、流量あるいは水深といった水理特性量の時間変化、いわゆる非定常性が、開水路乱流の構造

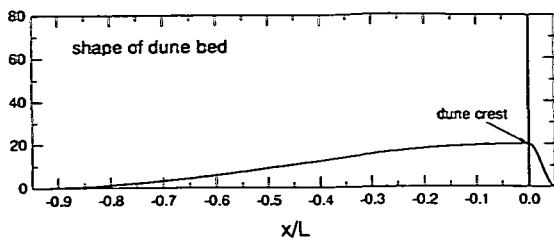


Fig. 2 Shape of dune bed.

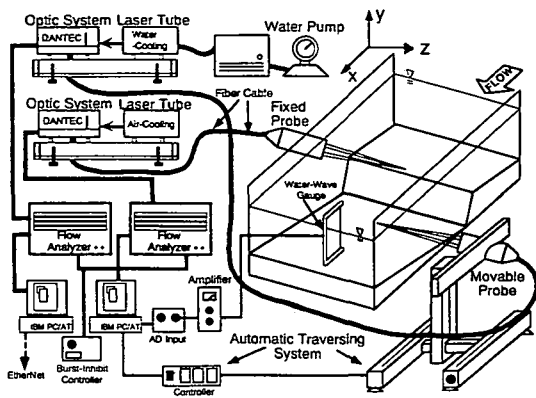


Fig. 3 Measuring system by mean of 2 sets of LDA.

に少なからず影響を与えるものと考えられ、河床形状によって引き起こされる空間的な非一様性に加えて、洪水時の流量の時間的変化に伴う Re 数の増減や水面形状の変化による効果とその乱流構造に影響を与えるものと見なすことができる。本研究では、この空間的非一様性、すなわち「圧力勾配」の変化による「空間的な加速・減速効果」に着目し、この観点から河床波上の非定常流れを対象に、空間的に離れた二点間の瞬間流速を同時計測する。これによって得られたデータに時空間相関解析を適用することで、河床波背後の組織渦構造に与える空間的非一様性の効果を議論する。

2. 実験方法および条件

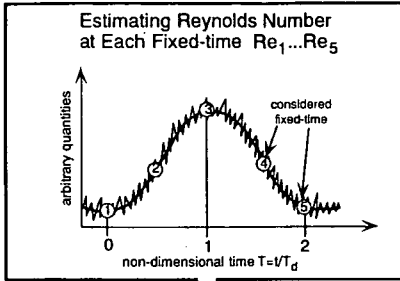
本実験で使用した水路は、長さ10m、幅40cmの変角型直線水路である。流量制御は、電磁流量計とインバータ・モータの回転数を同期・制御することによって行われた。河床形状は、クレスト高 $h_s (=2\text{cm})$ に対する水深 $h_w (=8\text{cm})$ 、および水深 h_w に対する波長 $L (=40\text{cm})$ の比などを考慮した正弦波から構成される形状で、実河川で見られる典型的な二次元状の dune 波形を採用し(Fig. 2)、この河床波(滑面固定床)を水路上流端から連続的に設置した。Fig. 3に二台のレーザ流速計と自動トラバース装置および波高計を組み合わせた計測システムを示した。瞬間流速の測定には、自動トラバース装置(0.1mm以下の誤差)に設置された DAN-

Table 1 Experimental condition.

Case	T_d (sec)	h_{cb} (mm)	h_{cp} (mm)	Q_b (liter/s)	Q_p (liter/s)	Re_b ($\times 10^3$)	Re_p ($\times 10^3$)	Fr_b	Fr_p	α ($\times 10^{-3}$)
DUC31	60	40.0	64.5	5.00	13.57	12.9	35.0	0.50	0.66	0.97
DVC31	60	40.0	64.5	5.00	13.57	12.7	34.5	0.50	0.66	0.97

Subscripts b and p denote base and peak flows, respectively.

T_d : duration time from base depth to peak one, Q : discharge, h : depth, Re : Reynolds number, Fr : Froude number, α : unsteadiness parameter adopted in the present study.



Adopting Interpolated Relation between Reynolds Number Re & Generation Frequency of Vortices T :
 $TU_{max}/h_u = a \exp(b \times 10^{-4} \cdot Re) + c$
 in which,
 $a=3.19, b=-3.19, c=0.542$ for separated vortex
 $a=9.61, b=-0.55, c=13.62$ for kolk-boil vortex

Definition of Detection Function $-uv(t)$ as Instantaneous Reynolds Stress

Determination of Threshold Values
 Number of data which exceeds from the Threshold correspond to the Generation Frequency

Fig. 4 Definition of threshold value in conditional sampling.

TEC社製の水冷(2W)4ビーム後方散乱型アルゴン-イオン・ファイバーレーザー流速計(FLDA)を移動プローブとして、さらに同社製の空冷のレーザー流速計(100mW)を、剥離渦に関しては河床波クレストに、またコルク・ボイル渦に関しては点計測実験で評価された平均再付着点距離の付近に固定プローブとして設置した。さらに、増水期・減水期の定義を行うために容量式波高計(KENEK製)を併用し、水深の時間変化の測定も同時に行った。図に示すように、波高計の信号がAD変換器の外部入力信号としてレーザー流速計を制御するコンピュータに取り込まれるシステムとなっている。なお、レーザー流速計の測定周波数は、空冷について約120Hz、水冷について約300Hzである。同時計測の際

には、二台の流速計と波高計との計測開始時間(トリガー)を調節することが重要となるが、図のBurst-Inhibit Controllerを計測開始前にoffにすることにより、これらの計測機器からの信号を完全にシャットアウトし、一方計測開始時点でonにすることで一度にデータを取り込むようなシステムとしている。

Table 1に三角波状のハイドログラフで行われた時空間相関実験の条件を示した。なお、 α は非定常性を表すパラメータで、 $\alpha = 2(h_p - h_b) / T_d(U_{mb} + U_{mp})$ で表される。ここで、 U_m は断面平均流速、添字bおよびpは、それぞれベースフロー時、ピークフロー時における値を示す。ここでは、水深hにクレスト上での値 h_c を用いた。二台の流速計による時空間相関実験については点計測の実験条件を基準に剥離渦(DUC31)、コルク・ボイル渦(DVC31)をそれぞれ計測した。測定断面および測定点は、河床波クレストを主流方向の原点とし、二つのレーザー流速計による相互間の干渉がない範囲を検証し、固定点のやや下流側から1および1.5cm間隔で8断面、1鉛直断面当たり約9~10点、計74~75点の計測を行った。これらの剥離渦、コルク・ボイル渦に関する鉛直中央断面の計測点を、時空間相関構造の三次元性を議論するために横断方向(z)にも拡張し、 $z/h_s = 0, 0.25, 0.5, 1, 2, 3.5, 5.5, 7.5$ の計8断面の計測を行った。なお、1計測点当たりの計測時間は、ベースフロー時の30sec、増減水時間120~180sec、減水後の100secの計250~310secである。

3. 解析方法

(1) 従来型時空間相関解析

ある固定点 $P(x)$ における乱れ成分 u_i と任意の地点 $Q(x+r)$ における乱れ成分 u_j の従来型時空間相関係数は、次式で定義される。

$$C_{u_i u_j}(x, r; t_{fix} + t, \tau) = \frac{u_i(x, t_{fix} + t) u_j(x + r, t_{fix} + t + \tau)}{u_i u_j} \quad (1)$$

ここで、 τ は遅れ時間で、 u_1 および u_2 は、それぞれ乱れ成分の主流方向(u)、鉛直方向成分(v)に対応する。

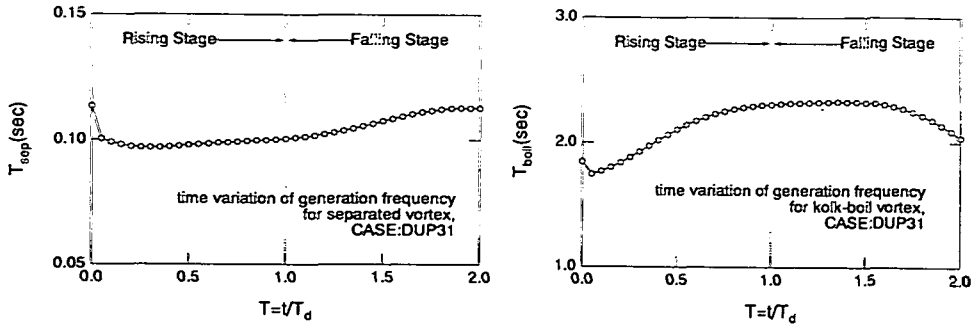


Fig. 5 Generation period of coherent vortices by using approximate function.

t_{fix} は固定時間として定義した時間であり、上式はその固定時間からの時空間相関を表している。また、上線は、厳密にはアンサンブル平均を示す。Fig. 4の最上部に固定時間の定義を示しており、水位上昇時間 T_d で無次元化された時間 T で表すと、 $T=0,0.5,1,1.5,2$ の五つの固定時間を定義した。各固定時間における時空間相関の時系列データの適用範囲は、その固定時間から次の固定時間までの範囲であり、上式はその区間の乱れ強度で無次元化されている。本研究では、これら固定時間の内、 $T=0.5,1$ の二つの固定時間からの時空間相関係数の変化を、それぞれ増水期、減水期における組織渦の移流過程を示すものとする。

(2) 条件付きサンプリング手法と判別関数の定義

条件付き時空間相関解析は、ある固定点の流速の値が渦のある条件を満たした場合や変動が特有のパターンに当てはまったときの、ある遅れ距離や遅れ時間を持った現象のみを抽出し、集合平均化する方法である。後述する固定点の判別条件を採用し、各固定時間に対する組織渦構造を捉える。条件付き時空間相関係数は、一般に次式で定義される。

$$\begin{aligned}
 & \langle q(x, r; t_{fix} + t, \tau) \rangle \\
 &= \frac{\int q(x+r, t_{fix} + t + \tau) \cdot I(x, t_{fix} + t) dt}{\int I(x, t_{fix} + t) dt} \quad (2)
 \end{aligned}$$

ここで、 q は流速などの任意の乱流変動量を一般に示し、 $\langle \rangle$ は抽出後集合平均化された量を表す。さらに、 $I(x, t_{fix} + t)$ は、対象とする乱流現象を抽出する判別関数であり、各々の現象に応じて的確に定義されなければならない。

Fig. 4は条件付きサンプリング手法におけるしきい値の決定手法の手順を示したものである。しきい値の決定の際には、Nezuら(1996)⁸⁾による可視化実験とレーザ流速計との同時計測実験から得られた Re 数と組

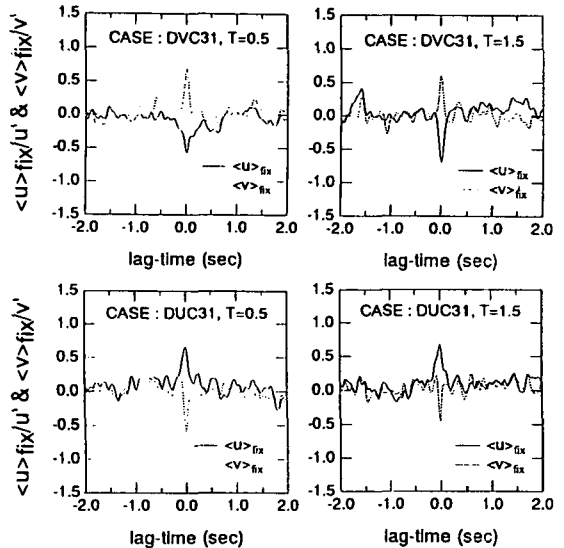


Fig. 6 Conditional auto-correlation.

織渦の発生周期 T_{vortex} の関係をを用いる(Fig. 4)。この関係は、 Re 数が増加すると組織渦の発生周期が一定値に達するという実測値に基づいた仮定の下に導入されたものである。なお、本実験の実験条件は、水深ピーク時においても常流の範囲内であるので、 Re 数と Fr 数は一対一に対応し、 Fr 数との関係もやはり同様な関係で表されるものと考えられる。次に、同一の条件で行われた点計測のデータより各位相時間における Re 数を評価し、この関係から組織渦の発生周期(発生周波数)を求める。Fig. 5はFig. 4の指数関数の関係から評価した発生周期の結果を示したものである。剥離渦は Re 数(流量)の増加に従って減少し、逆にコルク・ボイル渦の周期は増加するという現象を捉えていることが確認できる。

次に判別関数の定義であるが、ここで定義される判別関数は、Lu & Willmarth (1973)⁹⁾、Nakagawa & Nezu (1977)¹⁰⁾によって開発された流速変動 $u-v$ の四象限区分しきい値法を用いることにする。四象限区分しきい値

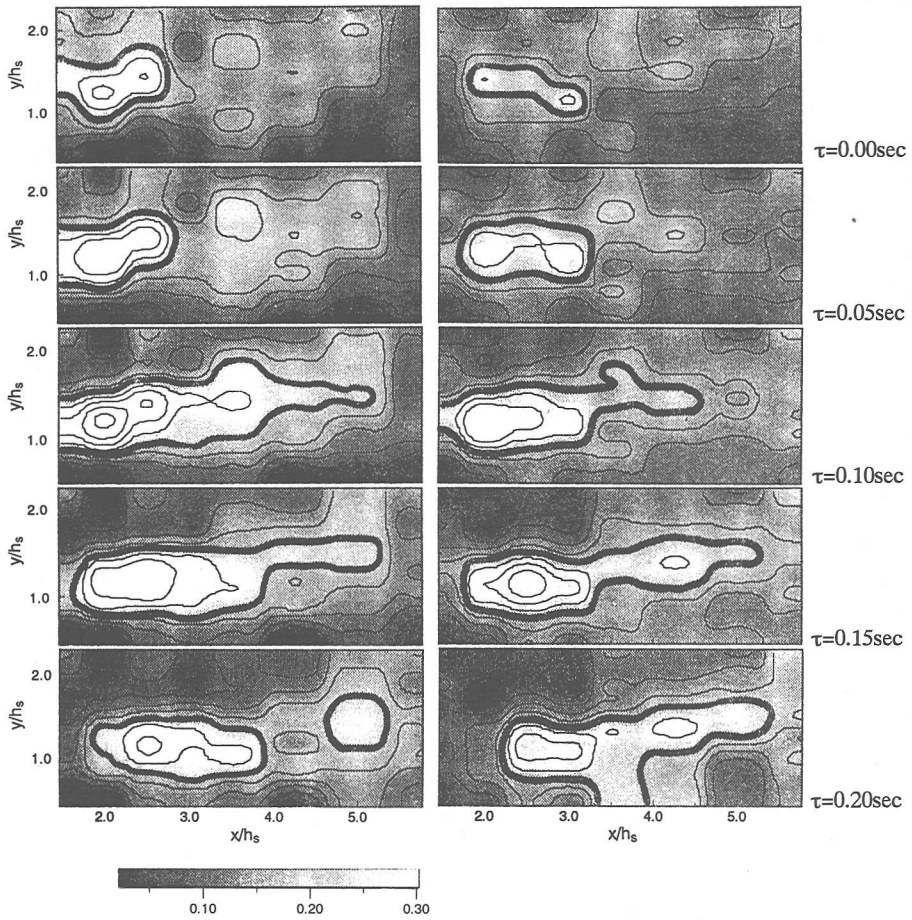


Fig. 7 Conventional space-time correlation C_{uv} coefficient for separated vortex. (left : rising stage, right : falling stage)

法では、河床波上の種々の乱流諸量から組織渦の発生、発達過程を検出する情報源(判別関数)として瞬間 Reynolds 応力を採用し、これを u - v 平面の四象限に区分する。四象限区分を用いた条件付きサンプリング手法では、次式で表わされるようなしきい値 H を導入し、 H より大きな渦強度をカウントする。河床波クレスト(dune crest)から発生する剥離渦および再付着点(re-attachment point)から発生するコルク・ボイル渦についてそれぞれ次式を用いるものとする。

$$I_C(t) = \begin{cases} 1: u > 0, v < 0, |uv/u'v'| \geq H_C \\ 0: otherwise \end{cases} \quad (3)$$

$$I_R(t) = \begin{cases} 1: u < 0, v > 0, |uv/u'v'| \geq H_R \\ 0: otherwise \end{cases} \quad (4)$$

再付着点から上昇・発達するコルク・ボイル渦の発生源がクレストからの剥離渦の運動の一つである再付着点に向かう下降流であると考えられる。よって、 I_C はクレストから発生する剥離渦のうち、高速度 ($u > 0$) 流体

塊が再付着点へと降下する ($v < 0$) 条件を満たす運動を検出するもの、一方 I_R は低速流体塊の上昇と考えられるコルク・ボイル渦の運動を表わすものである。これらは、バースティング現象の ejection, sweep 現象に対応するが、実際には本質的に異なるものである。

さらに、上式(3)および(4)を満たす時系列のデータ個数が、上述の方法で評価された組織渦の発生周波数と対応するようなしきい値 H_C, H_R を求める。Fig. 6はこのしきい値を用いて評価した条件付き自己相関係数であり、次式で表される。

$$\langle u_i \rangle_{\text{fix}} = \frac{\int u_i(x, t_{\text{fix}} + t + \tau) \cdot I(x, t_{\text{fix}} + t) dt}{\int I(x, t_{\text{fix}} + t) dt} \quad (5)$$

図より遅れ時間 $\tau = 0$ sec で、剥離渦についてはどの固定時間においても $\langle u \rangle$ は正、 $\langle v \rangle$ は負となり、剥離渦の下降の様子が捉えられている。一方、コルク・ボイル渦については $\langle u \rangle$ は負、 $\langle v \rangle$ は正となり再付着点からの上昇が捉えられている。この結果より、以下に示す

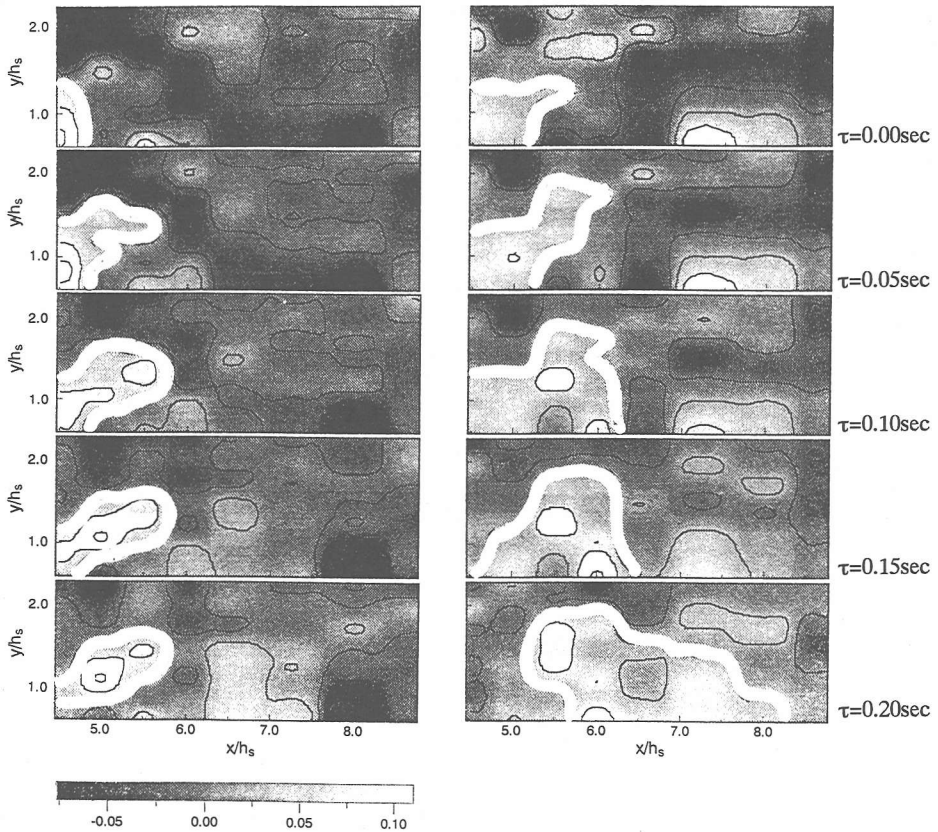


Fig. 8 Conventional space-time correlation C_w coefficient for kolk-boil vortex. (left : rising stage, right : falling stage)

条件付き時空間相関解析で、これらのしきい値を適用することにする。

4. 鉛直中央断面内の従来型時空間相関構造

(1) 河床波クレストから発生する剥離渦

Fig. 7は、それぞれ剥離渦に関して二つの固定時間 ($T=0.5, 1$) からの時空間相関係数 C_w の変化を示したものである。なお、図中の縦方向の並びは遅れ時間 $\tau=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ sec の変化、横方向の並びは固定時間 t_{fix} の変化を示し、左図は増水期、右図は減水期に対応する。また、特徴的な高相関領域を太線で示してある。図より、全体的に増水期・減水期ともに剥離点よりやや上方に高相関領域が存在する。増水期においては、底面方向のみならず、水面側にも広がる傾向を見せ、高相関領域も流下方向に拡大した分布を示す。これに対し減水期では高相関領域の厚さが比較的薄く、かつ再付着点 ($x/h_s=3.6$) 付近に達するものがあり、クレスト上部から黒い負の相関領域が押し寄せてくるとともに正の高相関領域が下降気味の移流特性を示す。増水期における鉛直方向あるいは主流方向の乱れ、すなわち鉛直方向の流体の変動が減水期と比較して大きく

なるが、このことは増水期における高相関領域の流下方向への拡大傾向と対応しているものと考えられる。時間的な増水および減水の変化は、それぞれ空間的な減速流、加速流に対応すること、この非定常性による影響は粘性の効果が支配的な壁面領域よりも慣性の効果が大きな外層において大きいことから、増水期における剥離渦は水面付近の外層で一旦主流方向に抑制され、それにより鉛直方向の変動が再配分され大きくなる。一方、減水期では空間的な加速の効果が大きくなるために鉛直方向の変動が抑制されるとともに主流方向への移流が大きく、水面付近にはあまり高相関領域が現れず、平均的なクレストから下降流のみが支配的となり、結果として図に見られるように再付着点付近に大きな相関領域が形成される。このことは、可視化観測で得られた増水期における剥離渦の先端の水面方向へ浮上するような様子、減水期におけるやや下向きの変化に良く一致していると考えられる。

(2) 再付着点から発生するコルク・ボイル渦

剥離渦同様、Fig. 8はそれぞれコルク・ボイル渦の鉛直方向の上昇・下降過程を見るために、従来型時空間相関係数 C_w の移流特性を示したものである。 C_w の

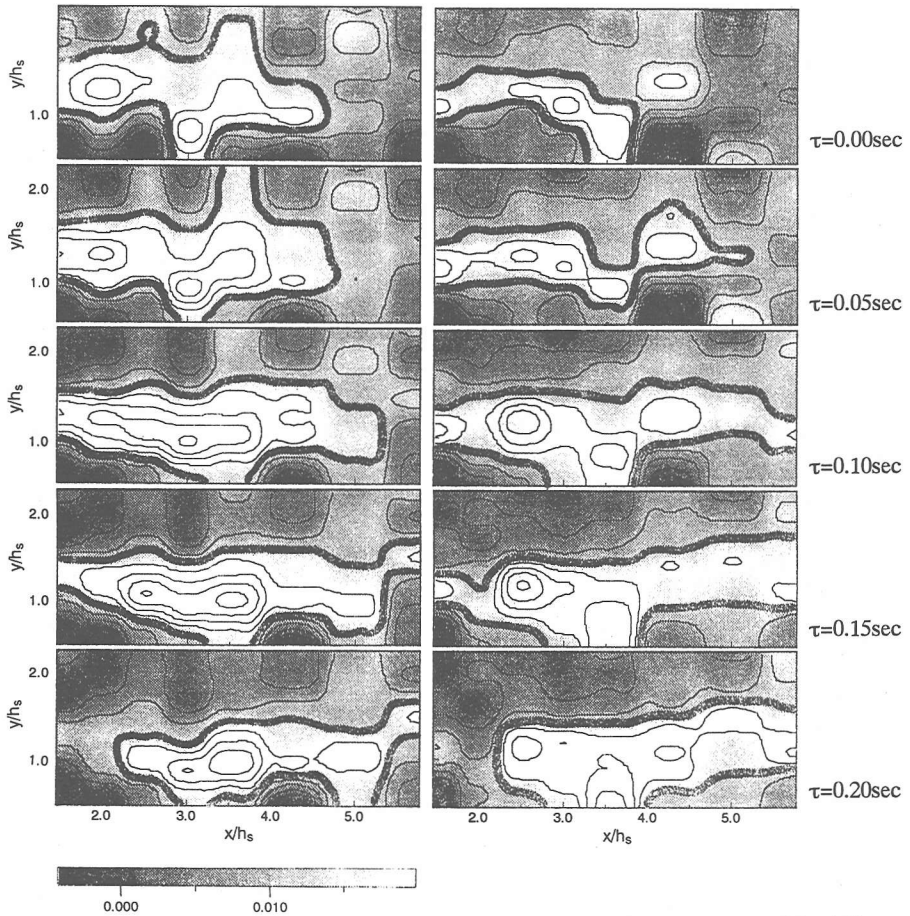


Fig. 9 Conditional space-time correlation coefficient $\langle u \rangle$ (m/s) for separated vortex. (left : rising stage, right : falling stage)

分布を見ると、増水期において黒い負の相関が水面から再付着点のやや下流側に向かうような斜め下方に存在する流体塊が存在し、その後正の相関が上昇するように変化することが分かる。一方減水期においては、増水期で観察された下降流は存在せず、反対に正の相関が鉛直方向に広がった特性を示す。時空間相関 C_{uv} の高相関領域の占める割合は、むしろ水深ピーク時から減水期にかけて広く、再付着点からの上昇流体(コルク)のもつエネルギーは、空間的に加速されている減水期で河床形状による加速の影響に増長されて強くなると考えられる。

洪水時の大規模組織渦に関する実観測結果では、コルク・ボイル渦が増水期において顕著であるとされているが、この現象は上述した実験結果から次のように解釈できる。減水期においては、再付着点からの上昇流体が強いエネルギー(高相関領域で表される流体塊)を伴って発生するが、外層の空間的に加速された流体が水面までの到達を阻害し、さらに主流方向に移流させる。一方、増水期においては、先に述べたようにク

レストからの剥離渦が鉛直方向に拡大した分布となり、主流方向のエネルギーは弱くなる。その結果、間欠的にクレストから下降した流れは再付着点に衝突し弱い上昇流を形成するが、この弱い上昇流を他の間欠的に発生したクレストからの上昇流体が上層まで引き上げ、かつ外層の流れが空間的に減速流であるためにこの上昇流体を阻害することなく水面まで現れる。したがって、増水期に現れる洪水河川に発生するコルク・ボイル渦は弱いエネルギーを伴った低速流体塊となる。

5. 条件付きサンプリング手法による組織渦の検出

(1) 河床波クレストから発生する剥離渦

Fig. 9は、式(2)および判別関数(3)によって抽出された主流方向変動流速 $\langle u \rangle$ の分布を示したものである。式(3)による判別条件を、河床波クレストから再付着点に向かう下降流の条件としたために、高相関領域の分布は主にクレストからの下降の様子を明確に捉えてい

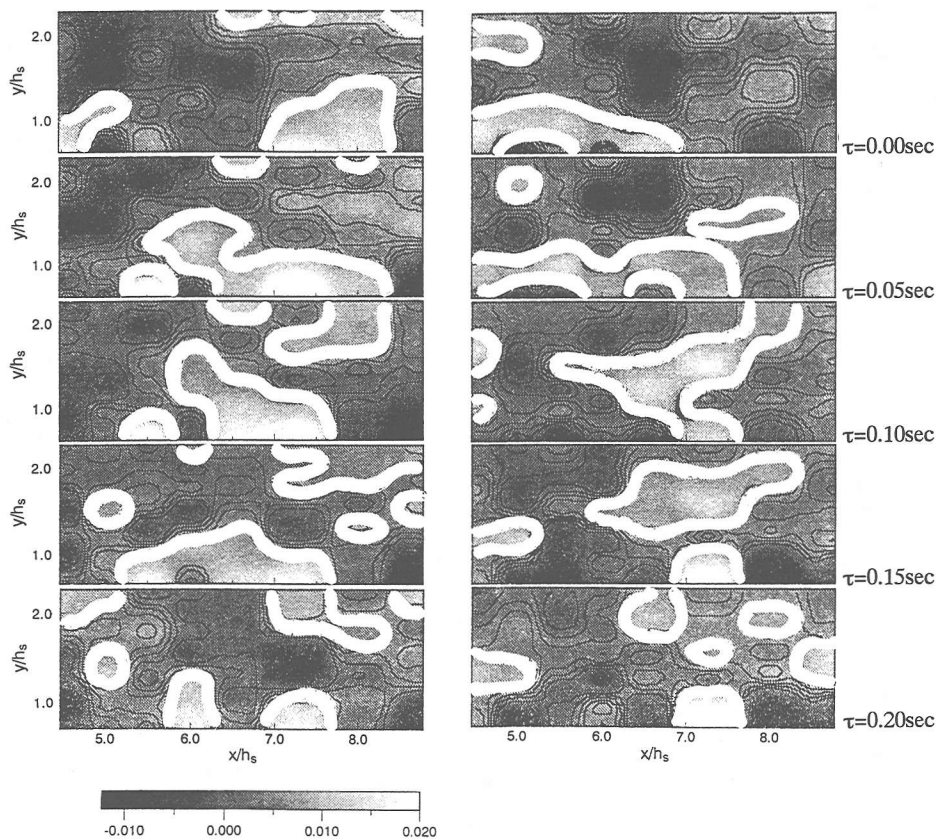


Fig. 10 Conditional space-time correlation coefficient $\langle v \rangle$ (m/s) for kolk-boil vortex. (left : rising stage, right : falling stage)

る。特に減水期の $\langle u \rangle$ の分布特性は強い下降流を捉えており、再付着点からやや下流側までの領域に高い相関領域が存在することが分かる。また、固定点である剥離点からの高相関領域の拡大の様子は、 $\tau=0.1\text{sec}$ までの変化を見ると増水期において顕著であり、減水期の剥離点直下流の様子は、鉛直方向の幅の狭い分布形を示している。この傾向はFig. 7の従来型時空間相関 C_{uv} の変化特性よりも明確に捉えられており、本研究で採用したしきい値の決定手法が妥当であることを示している。

(2) 再付着点から発生するコルク・ボイル渦

再付着点から水面に向かう上昇過程を考察するために、判別関数(4)によって抽出したコルク・ボイル渦に関する鉛直方向変動流速 $\langle v \rangle$ の分布をFig. 10に示した。コルク・ボイル渦に関する条件付き時空間相関係数 $\langle v \rangle$ の分布は、減水期において強い上昇流体の変化を示しているものの、増水期においては先の従来型の相関係数で得られた分布とは異なった変化を示している。すなわち式(4)の判別条件で得られるサンプリング $\langle v \rangle$ は、水面付近の外層においてより顕著な高相関領域が捉えられており、先述した弱いエネルギーを持ったコルク・ボイル渦が抽出できたものと考えられる。

一方、減水期側においては負の相関が高相関領域を流下方向に持ち上げるようにして左斜め上方からsweep的に底面に向かって入り込み、結果として正の領域が強いエネルギーを持って、かつ移流速度の大きな状態で主流方向上方に運ばれることが分かる。すなわち、式(4)による条件付きサンプリングは、増水期では水面にまで発達しきったボイル渦を検出し、減水期では再付着点からの強い上昇渦を捉えることが可能なことを示している。

(3) 剥離渦およびコルク・ボイル渦の三次元特性

これまで述べた鉛直断面内の条件付き時空間相関構造の特性を、さらに三次元的に拡張し、横断方向の分布特性も併せて考察する。Fig. 11は遅れ時間 $\tau=0.2\text{sec}$ について、剥離渦に関する条件付き時空間相関係数 $\langle u \rangle$ を三次元分布として、また $y/h_s=1$ の水平断面および $x/h_s=2$ の横断面として示したものである。なお、三次元分布に関しては、正および負の代表的な二つの値に関する表面のみを示しており、それぞれグレーおよび黒色で表している。また、この図の上方に増水期から水深ピーク時に向かう剥離渦の移流過程(固定時間 $T=0.5$)、下方に水深ピーク時から減水期への移流過程(固定時間 $T=1.0$)を示した。これらの図より、定常流に

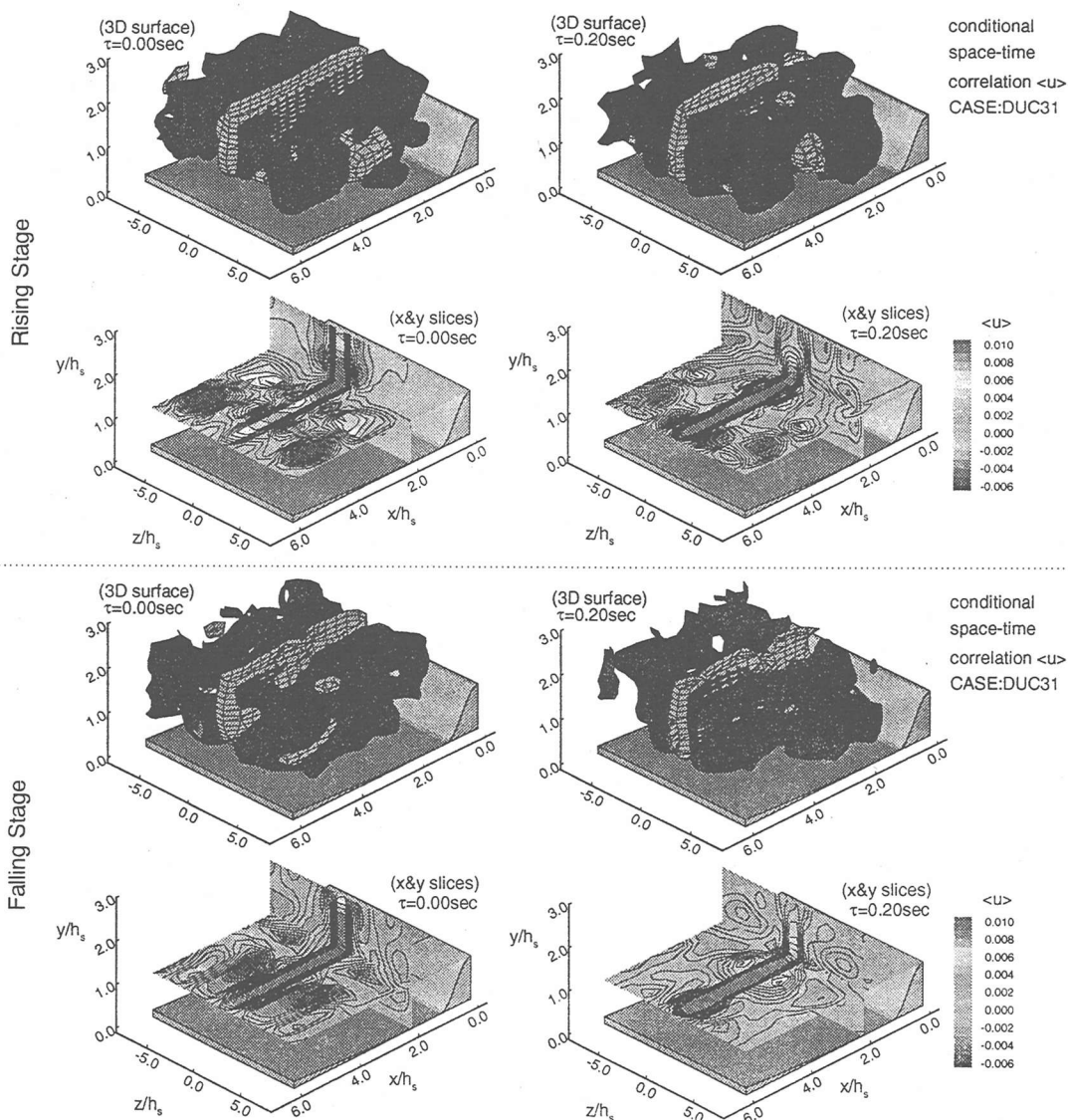


Fig. 11 3D-view of $\langle u \rangle$ (m/s) for separated vortex. (left : rising stage, right : falling stage)

関して得られたNezuら(1996)⁸⁾の三次元特性同様に、横断方向に高・低相関領域を伴った、高速・低速縞を有する縞構造が明らかに確認できる。水平断面のクレスト直下($x/h_s=2$)付近の分布から、中央断面($z/h_s=0$)における相関値が最も高く、これに隣接して負の相関が狭い間隔で存在し、次に横断方向に広い間隔を持った正の相関領域が観察される。すなわち、増水期において、正の相関で表されるクレストからの瞬間的な高速流体塊が、先に述べた鉛直方向だけでなく横断方向にも大きく広がった分布形を示すことが分かる。また、遅れ時間に対する水平断面の分布特性より、先に述べた水路側壁側の正の相関領域の主流方向への移流が小さいことが判断できる。

一方、水平断面の特性から、概して減水期における剥離渦の移流は増水期と比較して大きくなるのが分かる。また、 $\tau=0\text{sec}$ における $x/h_s=2$ あるいは $x/h_s=4$ 付近の横断方向の縞構造の分布を見ると、負の相関で表される低速流体塊の分布が広く、その分高速流体塊の再付着点に向かう流れのみが卓越し、横断方向にあまり広がらない特性を示しているのが分かる。こうした減水期における特性は、 $\tau=0.2\text{sec}$ ではほとんど観察されず、前方の河床形状による影響と減水期との空間的加速の効果による移流が卓越していると考えられる。

剥離渦同様、Fig. 12は遅れ時間 $\tau=0, 0.2\text{sec}$ について、コルク・ポイル渦に関する条件付き時空間相関係数 $\langle v \rangle$ の三次元分布、また $y/h_s=1$ の水平断面、および再付

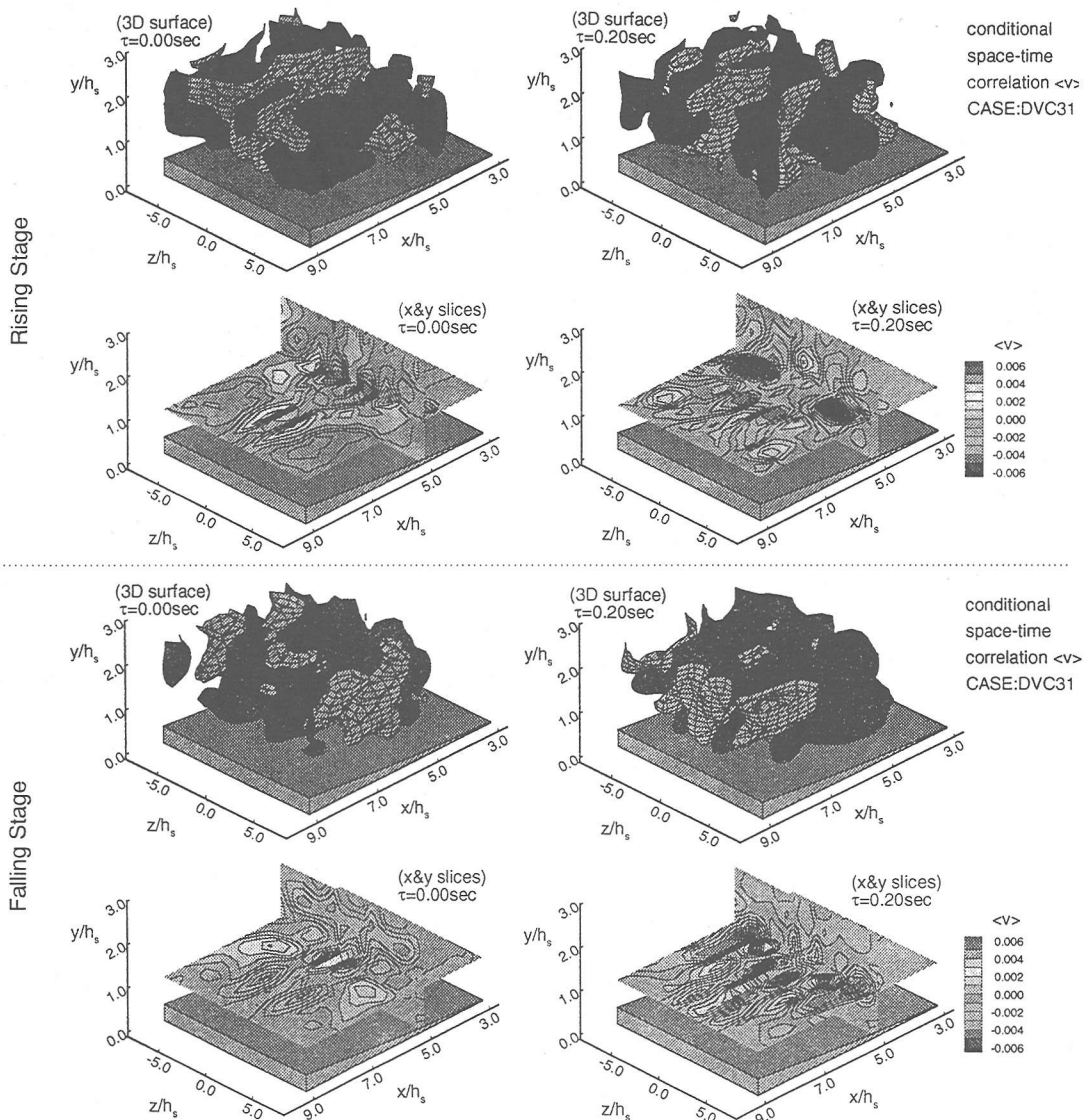


Fig. 12 3D-view of $\langle v \rangle$ (m/s) for kolk-boil vortex. (left : rising stage, right : falling stage)

着点より下流側の $x/h_s=5$ の横断面分布を示したものである。コルク・ボイル渦に関して、Nezらの得た結果同様に、剥離渦と比較してより複雑な三次元の渦構造を呈している。遅れ時間 $\tau=0\text{sec}$ における $x/h_s=5$ 付近の水平・横断面の分布から、高・低速流体塊の縞構造の間隔は剥離渦より狭く、正・負の相関領域が互いにほぼ等間隔に配置されている。この付近より下流側では、高速流体塊で表される正の相関が水路側壁側に広がり、負の相関値が狭くなることから、いわゆる馬蹄型の渦構造の特性が確認される。この縞構造の存在する傾向は、主流方向変動流速の条件付き時空間相関係数 $\langle u \rangle$ の分布についても同様な結果が得られた。

一方、増水期における遅れ時間に対する移流特性を

見ると、特に三次元分布において確認されるのは、 $\tau=0\text{sec}$ の水面付近で下流側にあった負の相関が、 $\tau=0.2\text{sec}$ の分布では横断方向にやや広がった正の高速流体塊に代わっており、先の鉛直断面の特性では確認できなかったボイルの起源となる上昇流体が見られる。しかし、減水期における $\tau=0.2\text{sec}$ の下流側の高速流体の分布は、 $\tau=0\text{sec}$ の下流側の分布と比較して、増水期において見られた水面に向かう上昇傾向でなく、むしろ主流方向への移流が卓越した特性を示しており、先の鉛直断面内の時空間相関に関して述べた特性が、より明確に現れたと言える。

上述の鉛直断面内および三次元分布の特性から、コルク・ボイル渦は、剥離渦と再付着点からの上昇流体

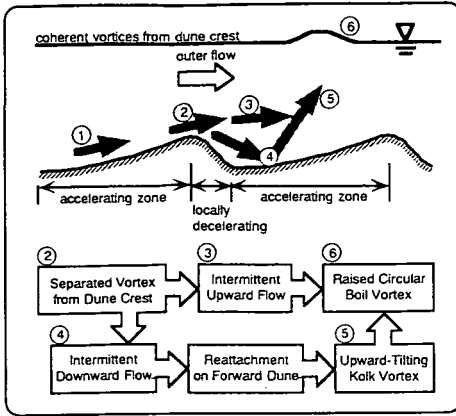


Fig. 13 Generation mechanism of vortices in vertical section.

塊とが融合したものであることが分かる。同一のレイノルズ数(あるいは水深)で増水期・減水期間の比較を行うと、剥離渦は増水期において空間的に減速され、クレストからの急激な減速効果と相まって鉛直方向や横断方向に広がった分布、あるいは間欠的に上下方向に放出されたような流れ特性を示す。このことは、鉛直方向の乱れ強度のループ特性である同一水深で増水期の方が乱れ強度が大きいことから推測できる。増水期では、この内、上方に広がった流れが、下方に間欠的に送り出された流れが再付着点に衝突し上昇する流れを増長して、水面にまで輸送する。この時、水面付近の外層部の流れは空間的な減速効果が顕著であるから、この上昇流体塊を阻害することなく水面に達しボイル渦を形成する。一方、減水期においては、クレストからの剥離渦は拡散することなく再付着点まで到達し、そこから強いやや主流方向向きの上昇流を形成するが、外層の強い加速流によって下流側に運ばれ、水面まで到達しないことが考えられる。

6. 組織渦の発生形態モデル

ここで対象とした鉛直断面内の剥離渦、コルク・ボイル渦の発生形態を、上述の実験結果に基づいてFig. 13に示した。①加速区間を通過した上流からの流れが、②クレストで剥離流れを形成し、③主流方向上向きに移流するものと、④前方の河床に下降し再付着するものが間欠的に発生する。さらに④によって惹起された⑤再付着点からの上昇渦の一部は間欠的に③の影響を受け水面まで上昇し、⑥コルク・ボイル渦を形成し、他は外層流れの影響を大きく受け、水面に到達することなく流下方向に移流される。実河川で観測されるコルク・ボイル渦は、剥離渦と再付着点からの上昇流体塊とが融合したものである。同一のレイノルズ数(あるいは水深)で増水期・減水期間の比較を行う

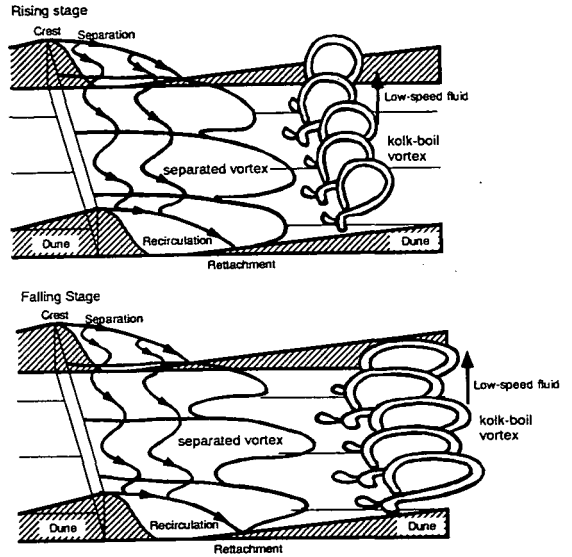


Fig. 14 3D generation mechanism of coherent vortices.

と、剥離渦は増水期において空間的に減速され、クレストからの急激な減速効果と相まって鉛直方向に広がった分布、あるいは間欠的に上下方向に放出されたような流れ特性を示す。このことは、鉛直方向の乱れ強度のループ特性である同一水深で増水期の方が乱れ強度が大きいことから判断できる。増水期では、この内、上方に広がった流れが、下方に間欠的に送り出された流れが再付着点に衝突し上昇する流れを増長して、水面にまで輸送する。この時、水面付近の外層の流れは空間的な減速効果が顕著であるから、この上昇流体塊を阻害することなく水面に達しボイル渦を形成する。一方、減水期においては、クレストからの剥離渦は拡散することなく、増水期と比較して遠くの地点に再付着するため、そこから強い主流方向よりの上昇流を形成し外層の強い加速流によって下流側に運ばれ水面に現れないか、あるいは剥離渦の影響を残しつつ主流方向に移流されるものと考えられる。このことから、増水期において浮遊砂輸送が激しくなる現象や減水期において河床が安定する傾向⁹⁾は、再付着点距離が増水期において短く、このため前方の河床波に向かう剥離渦の角度が急となるため洗掘が激しく、一方減水期では遠くなるために河床波に対して比較的緩いことが起因しているものと考えられる。

さらに、条件付き時空間関係係数の三次元移流特性から、増水期・減水期におけるそれぞれの組織渦モデルをFig. 14のように表した。上述した増水期における剥離渦の鉛直断面内の特性は、横断方向に関しても同様である。すなわち、鉛直断面内において鉛直方向に拡大傾向を示した増水期の特性は、横断方向にも同様

な特性を示し、減水期と比較して瞬間的な高速流体が横断方向に広がった特性を示す。また、再付着点距離が比較的手前に存在すること、上向きの流れも卓越する剥離渦、および増水期における空間的な減速効果によって、また比較的狭い間隔で、馬蹄渦型にコルク・ボイル渦が急な勾配で水面上まで発達する。一方、減水期における組織渦は、空間的な加速効果が大きくなること、剥離渦の到達する再付着点距離が長くなることから、乱れは全ての方向について抑制され、結果として高速流体塊の幅が狭い特性を示し、再付着点から反射したコルク渦も、この剥離渦の影響を大きく残したまま下流側へ移流されるものと考えられる。本研究の実験では、完全に発達したボイル渦は捉えられなかったが、その発生・発達過程に関しては、鉛直断面、三次元内の特性ともに上記のことが言えると考えられる。

7. 結論

本研究では、実河川に発生する組織渦構造に、洪水波によって形成される非定常性が少なからず影響を与えるものと考え、河床波背後に発生する組織渦構造のより詳細な解明を目的として、二台のレーザ流速計と波高計を組み合わせた時空間相関実験を行った。「固定時間」を定義し、各固定時間から発生する組織渦の移流特性について考察した。特に条件付き時空間相関解析においては、これまでの定常流に関する判別関数、しきい値の決定手法を基にして、本研究における非定常流れに適用した。これらの実験結果より、河床波背後に発生する剥離渦、コルク・ボイル渦の移流特性について、洪水時の増水期および減水期における相違、あるいは河床形状や水面形の時間変化が作り出す空間的加速・減速効果の観点から実験的考察を行い、組織渦の発生形態をモデル化した。これらの組織渦モデルは、河床波固定床上で得られたものであり、より詳細なモデル化のため、また浮遊砂輸送との関連も

含めて、移動床上の流れに関する検討が今後必要となると考えられる。

参考文献

- 1) Grass, A. J. : Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries, *J. Fluid Mech.*, vol. 50, pp.233-255, 1971.
- 2) Nakagawa, H. & Nezu, I. : Structure of space-time correlations of bursting phenomena in an open-channel flow, *J. Fluid Mech.*, vol. 77, pp.531-560, 1976.
- 3) Jackson, R. G. : Sedimentological and fluid-dynamic implications of the turbulent bursting phenomenon in geophysical flows, *J. Fluid Mech.*, vol. 77, pp.531-560, 1976.
- 4) 宇民正, 上野鉄男 : 可視化法による大スケール乱れに関する研究(2), 京大防災研年報, 20号B-2, pp.331-354, 1977.
- 5) 福岡捷二, 福島裕介, 奥津一夫 : 大規模渦によって誘起される上昇流およびボイルの構造, 土木学会論文報告集, 第298号, pp.41-52, 1980.
- 6) 伊勢屋ふじこ, 池田宏 : 洪水時における砂堆の発達にともなう浮遊砂濃度の変化, 第30回水理講演会論文集, pp.505-510, 1986.
- 7) 長谷川和義 : 石狩川における流速と浮遊砂濃度の同時計測, 種々のスケールにおける流れと流砂運動の同時計測による土砂輸送・河床変動機構の解明, 科研費報告書(代表: 芦田和男), pp.484-485, 1989.
- 8) Nezu, I., Kadota, A. & Kurata, M. : Free-surface flow structures of space-time correlation of coherent vortices generated behind dune bed, *Proc. of the 6th Int. Symp. on Flow Modelling and Turbulence Measurements, Tallahassee*, pp.695-702, 1996.
- 9) Lu, S. S. & Willmarth, W. W. : Measurements of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, vol. 60, pp.209-224, 1973.
- 10) Nakagawa, H. & Nezu, I. : Prediction of the contributions to the Reynolds stress from the bursting events in open-channel flows, *J. Fluid Mech.*, vol.80, pp.99-128, 1977.

(1997.2.20 受付)

THE STRUCTURES OF SPACE-TIME CORRELATIONS IN UNSTEADY OPEN-CHANNEL FLOW OVER DUNES

Iehisa NEZU, Akihiro KADOTA, Hideki SHINBASHI and Masa-aki KURATA

In open-channel flows such as rivers and estuaries, various coherent vortices are often observed and greatly affect sediment transport. These coherent structures often occur especially in flooded fluvial rivers. The hydrodynamic behavior of flood structures is quite different between the rising and falling stages of flood period. In the rising stage, the concentration of suspended sediment increases owing to the kolk-boil vortex because the rising stage corresponds to the growing period of dunes and because separated vortex from the dune collides intermittently at the next dune and washes out bed materials around there. Therefore, it is very important to investigate unsteadiness effects on the coherent structures in unsteady open-channel flows so that the growing process of the dunes and the behavior of the suspended sediment can be explained dynamically. In the present study, the specific behaviors of coherent vortices over dunes were accurately measured by means of simultaneous use of two sets of LDA. The differences of convection properties on coherent vortices between the rising and falling stages were discussed by evaluating the conventional and conditional space-time correlation structures.