

河床波上の非定常開水路流れに発生する組織渦の可視化実験

Visualization of Coherent Vortices Generated behind Dune in Unsteady Open-Channel Flows

瀬津家久*・門田章宏**・新橋秀樹***・倉田昌明***

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

Coherent vortices such as separated vortex and kolk-boils often occur especially in flood flows. The hydrodynamic behavior of the flood structures is quite different between the rising and falling stages of the flood period. In the rising stage, the concentration of suspended sediment increases due 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, the structure of turbulence and the associated coherent vortices over dunes in rivers and estuaries is one of the most important topics in hydraulic engineering. In the present study, flow visualizations by means of dye-injection and hydrogen-bubble techniques are adopted in order to discuss the elemental structures and unsteadiness effects on separated and kolk-boil vortices from the dune crest.

KeyWords : dye-injection technique, hydrogen-bubbles, unsteadiness effects
separated and kolk-boil vortices

1. はじめに

一般に、開水路の流れでは、様々な組織渦が存在し、各種の物質輸送がこの組織渦によって引き起こされる。また、河川には、自由水面をもたない閉管路の乱流や境界層乱流とは異なる大規模な組織渦が存在する^{1,2)}。水面付近の外層ではコルク・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い河床から水面に向かって浮上する。洪水時には、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流下する。最も基本的な流れである直線河川にみられるボイル渦は、その発生機構の相違から三つに分類される¹⁾。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、土砂の浮遊機構の主因となる。また、第2種は縦筋状のsand ribbonとの相互作用で発生するセル状の二次流(縦渦)に伴って生ずるもので、ridge上に発生する上昇流が水面にまで達する。第3種のボイルは河床で発生したバースト現象が発達したものである。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ため、第1,2種のボイルが支配的であると考えられ、河床形状と密接な関係があると推察される。本研究では、これまで河床波背後で形成される剥離渦によって惹起された強い組織渦、すなわち上述の第1種の組織渦に着目し、ホットフィルムとレーザ流速計を用いて段落ち(ステップ流)および三角波床上的流れの三次元時空間構造を解明した³⁾⁻⁵⁾。その結果、再付着点から

* 正会員 工博 京都大学大学院工学研究科教授 環境地球工学教室
(〒606 京都市左京区吉田本町)

** 学生員 工修 京都大学大学院 環境地球工学専攻

*** 学生員 京都大学大学院 環境地球工学専攻

発生するコルク・ボイル渦は、Müller&Gyr(1986)⁶⁾が流れの可視化観測から提案した馬蹄型渦モデルによって説明できると結論した。また、図-1に昨年度の定常流に関する河床波背後の組織渦の解析によって得られた発生形態概念図を示す。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と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。このように剥離流れ、前方の河床形状および外層流れの相互作用がコルク・ボイル渦の発生機構に大きな影響を与えることが示唆された。しかし、コルク・ボイル渦は洪水時に頻繁に発生することが知られており、流量が時間的に変化する非定常性をも考慮した組織渦の発生機構についてより詳細な検討が必要である。本研究では、染料注入法と水素気泡法による可視化実験を行い、河床波上の非定常開水路流れに発生する大規模な組織渦の発生周期や移流速度などの基本的特性、非定常性が河床波上の組織乱流構造に及ぼす影響を考察した。

2. 実験方法および解析手法

本実験で使用した水路は、長さ10m、幅40cmの可変勾配型直線水路である。流量制御には、電磁流量計とインバータ・モータの回転数を同期・制御することで行った。河床形状および水理条件の選択の際には、クレスト高 $h_s(=2\text{cm})$ に対する水深 $h_u(=8\text{cm})$ 、波長 $L(=40\text{cm})$ の比など実河川でみられる典型的な二次元状のdune波形および条件を採用した。図-2に可視化実験装置を示す。実験装置は染料タンク、ビニールチューブ、ガラスコックおよび染料を流す注射針(内径1mm)に加え、コルク・ボイル渦の挙動を捉えるための、水素気泡発生装置(KENEK製)およびスライドプロジェクタから構成されている。染料にはローダミンB(赤色)を用いた。実験は、染料タンクからチューブによって結ばれた注射針の先端を、剥離渦の場合クレストの先端に、またコルク・ボイル渦の場合再付着点付近に合わせるように設置して行われた。このようにして可視化された組織渦のうち、剥離渦については、35mmカメラおよびビデオカメラによって水路の側面側から撮影した。一方、コルク・ボイル渦については、スライドプロジェクタのスリット光を水路側方から水面付近の $y/h_s=3.0$ の高さに照射した。染料注入法と水素気泡法とを組み合わせることによって、底面から水面付近まで発達する上昇渦がスリット光を通過していく様子を、水路上方から剥離渦の場合と同様に撮影した。

表-1に、可視化実験条件を示す。非定常流の波形として三角波を採用し、水深立ち上がりからピーク時までの時間、すなわち水位上昇時間 T_d が60, 120secの2ケースについて行った。なお、 α は非定常性の大きさを示すマクロなパラメータで $\alpha \equiv 2(h_p - h_b)/T_d(U_{mb} + U_{mp})(U_m)$ (断面平均流速)で表される。

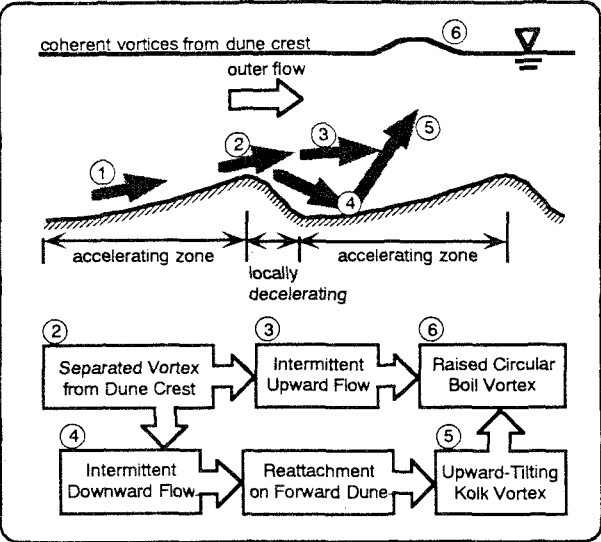


図-1 河床波背後の組織渦の発生形態概念図

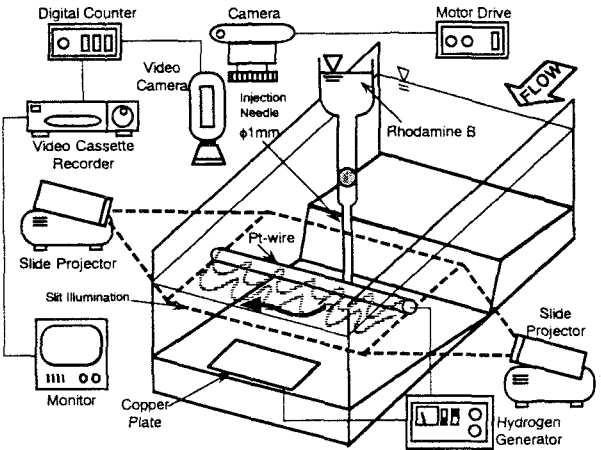


図-2 染料注入法と水素気泡法による可視化実験装置

表-1 実験条件

Case	T_d (sec)	h_{cb} (mm)	h_{cp} (mm)	Re_b ($\times 10^3$)	Re_p ($\times 10^3$)	Fr_b	Fr_p	α ($\times 10^{-3}$)
VT1	60	60.0	67.0	4.1	8.2	0.09	0.15	1.25
VT2	120	60.0	68.0	4.1	8.2	0.09	0.14	0.72

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

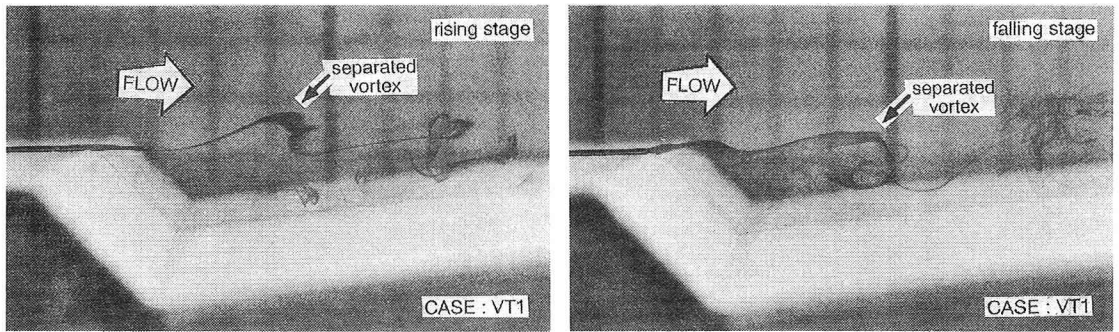


図-3 染料注入法によって可視化された剥離渦(左図:増水期, 右図:減水期)

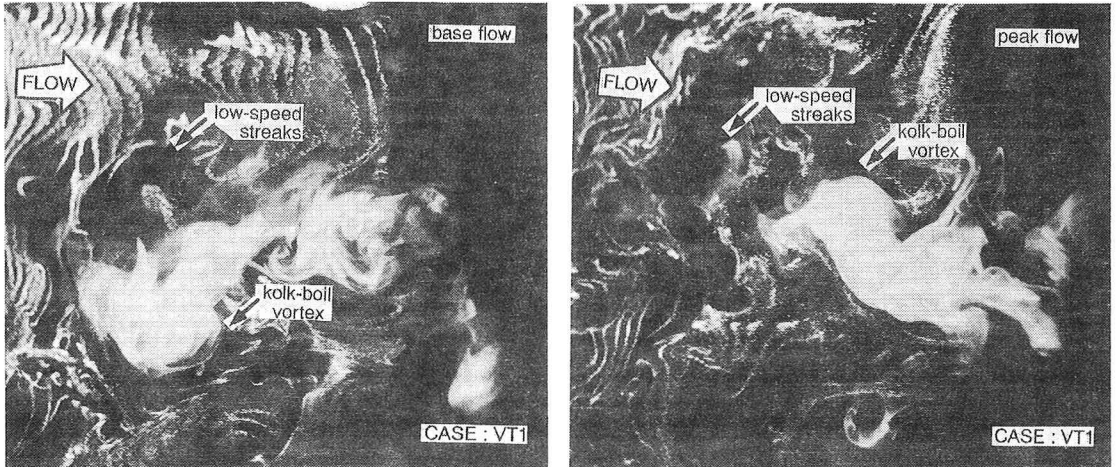


図-4 水素気泡法によって可視化された水面近傍のコルク・ボイル渦(左図:定常時, 右図:水深ピーク時)

3. 実験結果および考察

図-3は、35mmカメラで撮影された組織渦の可視化実験結果の一例であり、増水期及び減水期それぞれにおける剥離渦の特性を捉えたものである。増水期の剥離渦は、減水期と比較して流下方向への移流が抑制されるとともに、上昇傾向がやや強いといえる。これは、非定常流れの時間的な加速および減速と、河床波の存在による空間的な加速および減速との二つの効果の相互作用により生じた結果と推察される。時間的な加速および減速を空間的なものに置き換えると、非定常流れの増水期は、空間的に見れば減速流となり、一方減水期は順圧力勾配の空間的な加速流となる⁷⁾。したがって、前方の河床波による加速の影響を常に受けてつも、増水期には空間的な減速流の効果が生じるため、それらの相互作用によって上述したような結果が得られたと考えられる。同様に、図-4は定常時および水深ピーク時におけるコルク・ボイル渦を比較したものである。増水するにつれて、発生位置が下流側に移行していく様子が伺える。このことと、コルク・ボイル渦が発生すると考えられている再付着点位置が、後述するように、増水期に最も手前、すなわち上流側に存在することから推測して、コルク・ボイル渦の流下方向への移流速度が、増水分に比例して大きくなることを示しているといえる。また、同時に撮影されたビデオ画像から、流れの縞構造が次第に形成されていき、その後低速流体塊を伴って沸き上がるように発生するコルク・ボイル渦を、水素気泡法を用いた可視化によって確認することができた。

コルク・ボイル渦の動的特性を把握する上で重要な点は、コルク・ボイル渦の発生源となる再付着点の位置について検討することである。そこで今回の可視化実験では、従来の研究を補足、発展させるために、非定常性が再付着点距離の変化特性に及ぼす影響について検討した。図-5には、再付着点距離 x_r の平均値および標準偏差についての時間変化を示した。図中、Nezu & Nakagawa (1987)⁸⁾のステップ流の結果($x_r/h_s=5.0$)も併示した。再付着点距離の値がステップ流の場合と比較して小さくなるのは、剥離点の前方に存在する河床波の影響である⁹⁾。時間変化については、増水するにつれ再付着点距離は短くなり、かつR-2でピークの値を持つ。減水期では逆に再付着点位置は下流側に移行していく傾向がある。これは、平均流速の時間変化特性に関して、同一水深

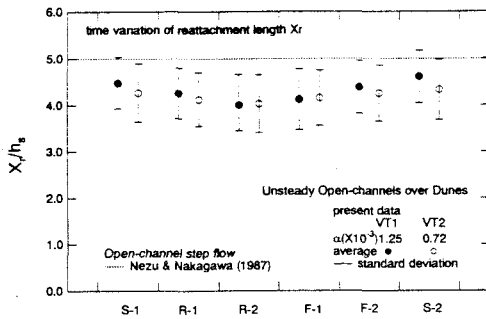


図-5 再付着点距離 x_r の時間変化

時には増水期の方が大きくなる¹⁰⁾ことに由来していると考えられる。再付着点位置の変化幅に関して、非定常性の高いケース(VT1)の方が低いケース(VT2)に比べ大きいことから、非定常性が再付着点距離に影響を与える一つの重要な要素となっている。図-6は、再付着点距離 x_r をRe数の関数で示したものである。図には、Nezuら(1996)⁹⁾の連続波の結果も併示した。再付着点距離に関しては定常流れとさほど値に差は見られないが、先述したような、Re数に対する再付着点距離の値は非定常性が高くなるにつれ傾きが急になる、すなわち再付着点位置の変化が大きいという性質が伺える。

図-7に、剥離渦およびコルク・ボイル渦それぞれについて、その発生周期の時間変化を示した。なお、諸量の時間変化特性を評価する際には、増水期、減水期それぞれについて2段階ずつに区分し(R-1,R-2,F-1,F-2)、その前後の定常時の区間(S-1,S-2)とあわせて全部で6段階についてそれぞれの平均値を示すこととし、以下同様とする。また発生周期については剥離渦(T_{sep})、コルク・ボイル渦(T_{boil})ともに、増水開始時間 $T=0$ の全断面における最大流速 U_{max0} と上流側水深 h_{u0} によって外部変数表示されている。非定常性の高いVT1で、これらの変化特性が顕著となる。また剥離渦の場合は、発生周期の値は増水期で減少していき、増水期の後半(R-2)にピークを持った後、減水期で増加するといった推移を辿る。一方、コルク・ボイル渦では逆に、発生周期はまず増加し、増水期の後半(R-2)のピークを境に減少に転じる。さらにコルク・ボイル渦について、図-8には時間 t に対する渦の発生時間間隔 Δt 、すなわち個々の渦についての発生周期を、ともに水位上昇時間 T_d で無次元化した形で示した。ケース間で無次元化量 T_d の値が異なることによる縦軸のスケールの差を考慮しても、非定常性の高いケース(VT1)の方が変動幅が大きく、コルク・ボイル渦の発生周期における非定常流れの特徴がこの図からも確認できる。増水期および減水期の比較をすると、減水期における分布領域の方がやや下方に存在し、発生頻度の高いことが伺える。しかし、野外観測の知見から、コルク・ボイル渦は増水期に顕著に見られ¹⁾、一見すると矛盾した結果が得られたように見える。これは、今回の実験で設定した高さのスリット光を通過する渦が、上昇するコルクを捉えたものであり、それが必ずしも水面まで到達するボイル渦を形成するものではないことが理由に挙げられる。一般に、非定常流れにおける鉛直方向の乱れ強度に関するループ特性から、同一水深における比較で増水期の方が高い値をとることが知られており⁷⁾、よって増水期では、クレスト付近から間欠的な剥離渦が広範囲に渡って放出され、それに伴い河床波上に再付着した後に形成される上昇渦(図-1:⑤)の持つエネルギーは小さくなると推測される。しかし増水期の上昇渦は、クレストから放出された主流方向やや上向きの流れ(図-1:

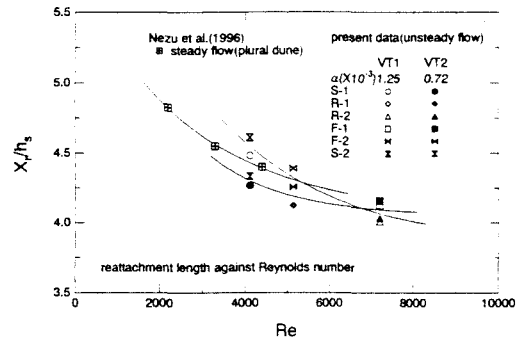


図-6 Reynolds数 Re に対する再付着点距離 x_r

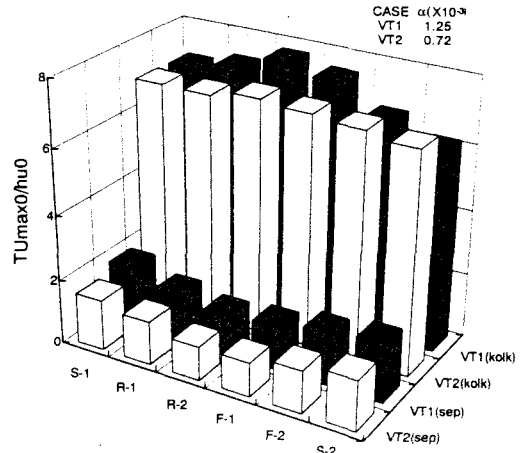


図-7 組織渦の発生周期の時間変化

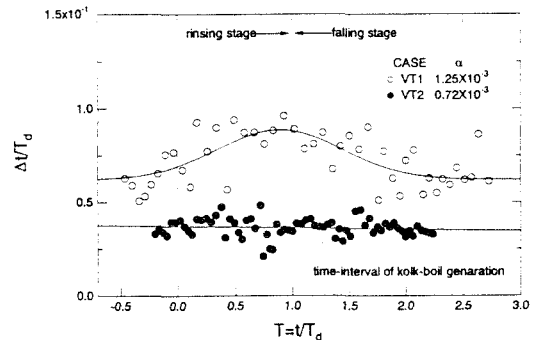


図-8 コルク・ボイル渦の発生時間間隔 Δt

図-8には時間 t に対する渦の発生時間間隔 Δt 、すなわち個々の渦についての発生周期を、ともに水位上昇時間 T_d で無次元化した形で示した。ケース間で無次元化量 T_d の値が異なることによる縦軸のスケールの差を考慮しても、非定常性の高いケース(VT1)の方が変動幅が大きく、コルク・ボイル渦の発生周期における非定常流れの特徴がこの図からも確認できる。増水期および減水期の比較をすると、減水期における分布領域の方がやや下方に存在し、発生頻度の高いことが伺える。しかし、野外観測の知見から、コルク・ボイル渦は増水期に顕著に見られ¹⁾、一見すると矛盾した結果が得られたように見える。これは、今回の実験で設定した高さのスリット光を通過する渦が、上昇するコルクを捉えたものであり、それが必ずしも水面まで到達するボイル渦を形成するものではないことが理由に挙げられる。一般に、非定常流れにおける鉛直方向の乱れ強度に関するループ特性から、同一水深における比較で増水期の方が高い値をとることが知られており⁷⁾、よって増水期では、クレスト付近から間欠的な剥離渦が広範囲に渡って放出され、それに伴い河床波上に再付着した後に形成される上昇渦(図-1:⑤)の持つエネルギーは小さくなると推測される。しかし増水期の上昇渦は、クレストから放出された主流方向やや上向きの流れ(図-1:

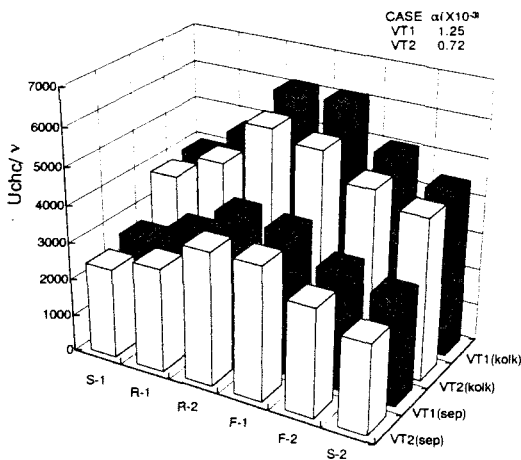


図-9 移流速度 U_c の時間変化

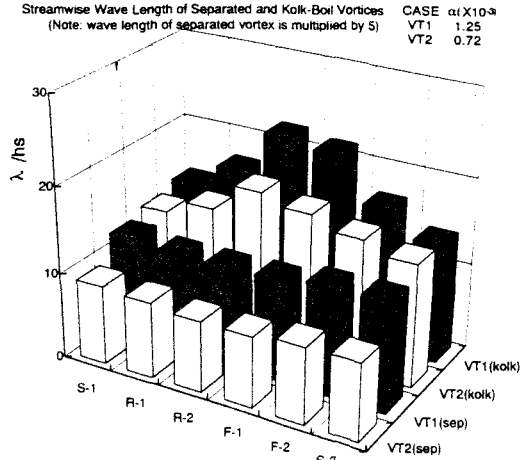


図-10 波長 λ の時間変化

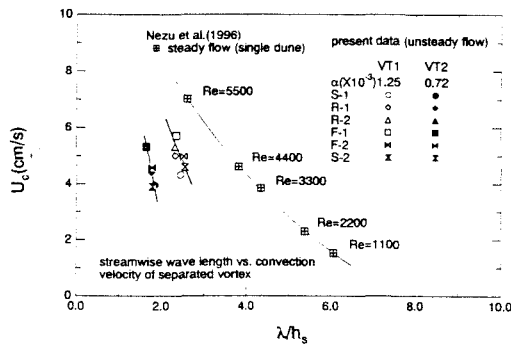


図-11(a) λ と U_c の関係(剥離渦)

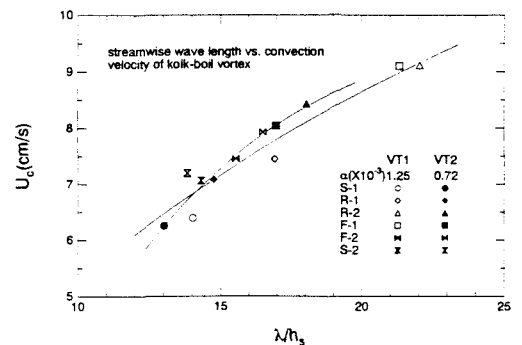


図-11(b) λ と U_c の関係(コルク・ボイル渦)

③)によって発達し、また空間的な減速の影響により生じた弱い外層流れのために、主流方向に流されることなく上昇し水面まで到達できる。それに対し、鉛直方向の乱れの小さい減水期では逆に大きな上昇エネルギーを持った渦(図-1:⑤)が再付着点から発生するため、増水期と比較して発生頻度の高い渦が観測されたが、空間的な加速流の効果により外層で流下方向への移流の影響を強く受け、水面では観測されないと考えられる。

図-9には、剥離渦およびコルク・ボイル渦の移流速度の時間変化特性を示した。ここで、 h_c は河床波クレスト上の水深である。増水しRe数が増加するにつれ、剥離渦、コルク・ボイル渦ともに移流速度は上昇し、減水期、すなわちRe数が減少すると移流速度は逆に減少するという結果が得られた。渦が周囲の流速に乗って流下方向に移流していることを考えれば明らかなことである。次に、増水と減水の効果について検討するために、特にコルク・ボイル渦に関して増水期の前半(R-1)と減水期の後半(F-2)について着目すると、いずれのケースでも減水期の方が渦の流下方向への移流速度が大きくなる。ここでも、加速の効果が大きい減水期の特徴が見受けられる。

図-10は、組織渦の波長 λ の時間変化について示したものである。なお波長 λ は、渦の周期 T_{sep} あるいは T_{boil} と移流速度 U_c の積で表し、波高 h_s で無次元化した。図中で、(a)剥離渦は減少した後増加に転じているのに対して、(b)コルク・ボイル渦では逆の傾向が現れる。いずれの組織渦も移流速度の時間変化が同様な増減の傾向を示すことを考慮すれば、発生周期の増減が双方の波長の時間変化特性の相違に大きな影響を与えていると解釈できる。非定常性の高いケース(VT1)の方が値、変化量ともに大きくなり、非定常性による影響の大きさも伺える。図-11に波長 λ に対する移流速度 U_c の関係を示した。図から、(a)剥離渦では、波長と移流速度は反比例、すなわち渦どうしの間隔が開くにつれて移流速度は小さくなる傾向にあるが、(b)コルク・ボイル渦では逆の変化を示す。また剥離渦については、Nezuら(1996)⁹⁾の単一波との比較を行ったが、今回の結果の方が移流速度、波長ともに変化量は小さく、特に波長の変化量の相違が際立っている。また、非定常性の影響は、傾きおよび値そのものにも現れた。図-12は、組織渦が発生したと考えられるroll-upの位置を示したもので、剥離渦についてのみ観測を行った。先述した通り、増水期に上流側へ、また減水期に下流側に移行する性質を持つ再付着点位置とほぼ同様な変化特性を示しており、roll-upの位置は再付着点位置と関連のある特性量であると考えられる。これは、図-

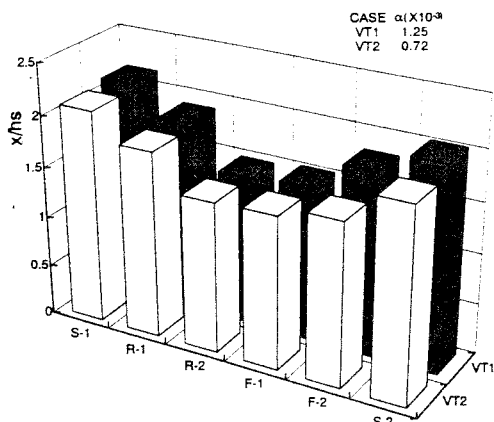


図-12 剥離渦の発生位置(roll-up)

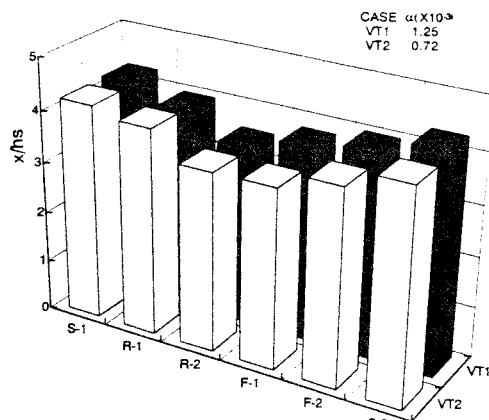


図-14 剥離渦のpairingの位置

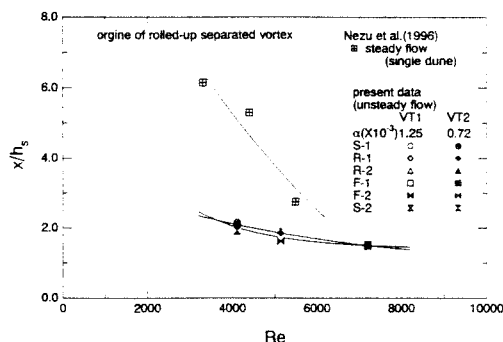


図-13 Reynolds数に対する剥離渦の発生位置

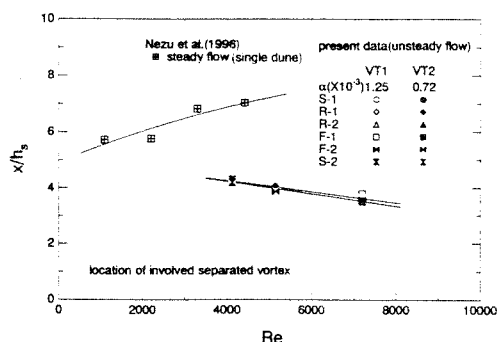


図-15 Reynolds数に対する剥離渦のpairingの位置

13のroll-upの位置とRe数の関係を示したグラフからも判断でき、その再付着点距離が今回の実験と比較して下流側に存在するNezuら(1996)⁹⁾の単一河床波のケースとは、低Re数域で特に値の開きが生じた。さらに、剥離渦の動的特性のもう一つの指標として、図-14, 15に、渦の合体し始めるpairing位置の時間変化およびRe数との関係をそれぞれ表した。Re数に対するpairingの位置は、図に併示したNezuら(1996)⁹⁾の単一河床波定常流の結果と全く逆の変化を示している。これは、単一河床波では、渦の発生後、高速流域をほぼ直進移流するため、Re数の大きな流れの方がpairingが生じるまでに流下方向に運ばれる距離が大きくなるが、今回の実験では、前方の河床波の影響を受け、再付着点付近の低速流域における渦のpairingが卓越するため、Re数が大きくなるにつれて再付着点距離が短くなり、それに伴って逆にpairingの位置が上流側に遷移するものと考えられる。また、上記の理由により、図-14のpairing位置の時間変化では、roll-up位置と同様な変化特性を示している。

4. おわりに

本研究では、河床波上の非定常開水路流れに発生する組織渦を対象として、染料および水素気泡法を併用した可視化実験を行った。その結果、大規模組織渦の基本特性に対する流れの非定常性の影響が認められ、それが時間的および空間的な加速、減速の効果の相互作用として組織渦の動的特性に現れることが確認された。

参考文献

- 1) Nezu, I. & Nakagawa, H. : *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR-Monograph, Balkema, 1993., 2) 木下良作 : 土木学会論文集, 第345号, pp.1-19, 1984., 3) Nezu, I. & Nakagawa, H. : *Tuburent Shear Flows* 6, Springer-Verlag, pp.313-337, 1989., 4) Nezu, I. & Nakagawa, H. : *Proc. Workshop on Instrumentation*, IAHR, pp.29-44, 1989., 5) Nezu, I. & Nakagawa, H. : *Refined Flow Modeling and Turbulent Measurements*, pp.603-612, 1993., 6) Müller, A. & Gyr, A. : *J. Hydr. Res.*, IAHR, vol.24, pp.359-375, 1986., 7) Nezu, I., Kadota, A. & Nakagawa, H. : *Fundamentals Advancements in Hydr. Meas. and Experimertation*, ASCE, pp.185-194, 1994., 8) Nakagawa, H. & Nezu, I. : *J. Hydr. Res.*, IAHR, vol.25, pp.67-88, 1987., 9) Nezu, I., Kadota, A. & Kurata, M. : *Flow Modelling and Turbulence Measurments*, IAHR, Balkema, pp.695-702, 1996., 10) Tu, H., Graf, W. H. & Tamai, N. : 河道の水理と河川環境シンポジウム論文集, 土木学会, pp.191-198, 1993.