

河床波背後に発生する組織渦に関する 可視化および時間周波数解析

VISUALIZATION AND TIME-FREQUENCY ANALYSIS ON COHERENT VORTICES GENERATED BEHIND DUNE

門田章宏¹・瀬津家久²・鈴木幸一³
Akihiro KADOTA, Ichisa NEZU and Koichi SUZUKI

¹正会員 工博 愛媛大学助手 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

²フェロー会員 工博 京都大学教授 大学院環境地球工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³フェロー会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

Large-scale coherent vortices such as separated vortex and kolk-boil are often observed and generated behind crest of sand dunes in actual flood rivers. The kolk-boil vortex greatly affects transport of suspended sediment that develops up to free-surface. In the present study, visualization by dye-injection technique and turbulence measurement by a laser Doppler anemometer were simultaneously conducted in order that the whole and instantaneous structure of vortices could be clarified. Then, wavelet analysis was applied by means of time series of turbulence fluctuation. Then, distinctive properties could be seen in convection velocity, wavelength and frequency of generation and so on.

Key Words : *dye-injection technique, separated and kolk boil-vortices, dune bed, wavelet analysis*

1. はじめに

開水路の流れあるいは実河川においては、様々な組織渦が存在し、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った大規模な組織渦が存在する¹⁾。この組織渦の代表的なものとしてコルク・ボイル渦が挙げられる。水面付近の外層において、高濃度の浮遊砂を伴って河床から水面に向かって浮上し、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は異なり、回転は伴わずその中心が盛り上がり周囲へと流れ、水面下に潜り込んでいるように見える。

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二次流(縦渦)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。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Reynolds数の流れでは第3種のボイルが弱くなるため、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ことが推察される。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かなり強い組織渦、すなわち上述の第1種の組織渦に着目し、段落ち(ステップ流)および三角波床の上の流れの三次元時空間構造に関する可視化・乱流計測^{2,3)}を緒として、実際の形状を模擬した河床波上の非定常開水路流れに関する可視化実験、単体あるいは複数から構成されたレーザ流速計を用いた平均流および時空間相関構造の解明^{4,5,6)}を試みた。得られた結果として、剥離渦が前方の河床に衝突し、再付着点から発生するコルク・ボイル渦は、Müller and Gyr⁷⁾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良好に説明でき、このモデルに基づいて洪水時の増水期・減水期における剥離渦およびコルク・ボイル渦の組織構造への非定常性の影響が見出された。

一方、本研究では、上述の河床波上の流れに関する研究の一環として河床波定常流に関する可視化およびレーザ流速計の同時計測を行っている。これらの計測で得られたビデオ画像および乱流変動量から、剥離渦およびコルク・ボイル渦の組織渦の時間平均的特性および瞬時の

挙動を新たに解明する目的で、ビデオ画像による平均的な組織渦構造の解析および乱流変動量とwavelet解析を用いた瞬間的な組織渦構造の解明を今回試みた。

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 $h_d(=8\text{cm})$ 、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-1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)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に合わせるように設置して行われた。さらにクレストおよび再付着点から発生する組織渦を、レーザ流速計によって捉えた。表-1に実験条件を、図-2に可視化とレーザ流速計の同時計測による計測点をそれぞれ示した。実験では、単一河床波・連続波に発生する上記二つの組織渦それぞれに流量二種類を採用し、合計8ケースの実験を行った。なお、染料の通過経路がレーザの焦点を完全に塞ぐ場合、データレートが極端に落ちるため、染料注入針とレーザ光の焦点位置を横断方向に2mm程度離して計測を行った。また、各水理条件における再付着点の位置については、レーザ流速計で計測することにより予め求めている。その後、可視化された組織渦を35mmカメラおよびビデオで撮影し、同時にレーザ流速計を用いて各点計測時間120secで計測を行った。

解析に関しては、上記の実験によるビデオ画像を観察することによって、組織渦の発生周期、移流速度、波長、発生形態など平均流的な特性を解析した。一方、同時計測した乱流変動量については、その変動量をwavelet解析することによって、各時刻に発生する周波数特性を見ることにより組織渦の発生形態について解析した。

wavelet解析による開水路流の研究として代表的なものにキャピティー流れを対象とした神田・宮本⁸⁾の研究が挙げられる。さらにwaveletの理論的背景等の詳細についてはいくつかの文献⁹⁾があるが、ここではwavelet解析の概要について以下に述べることにする。時間周波数解析であるwavelet解析は、Fourier解析のように三角関数の波の重ね合わせで波形を表現するのではなく、短い波waveletの重ね合わせで関数(信号)を表現するというものである。wavelet変換は、ある波形からmother waveletとよばれる波形と相似な波形だけを抽出することであり、mother wavelet $\psi(t)$ はコンパクトな台(有界で振動的)でなければ

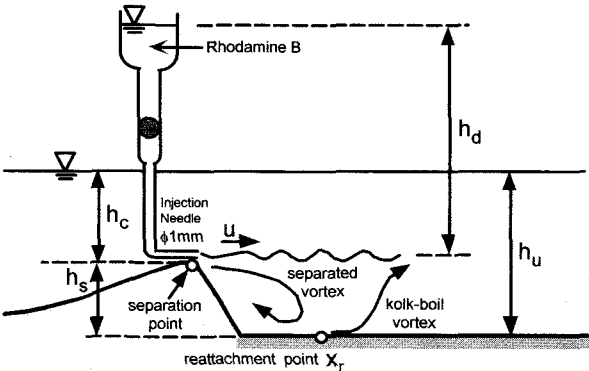


図-1 染料注入法による可視化実験装置

表-1 実験条件

Case	Discharge Q (liter/sec)	Flow depth on dune crest h_c (cm)	Geometrical type of dune	Location of injection needle
DAVLBS	1.0	6.00	Single	Crest
DAVLBR	1.0	6.00	Single	Reattach.
DAVLDS	2.0	6.00	Single	Crest
DAVLDR	2.0	6.00	Single	Reattach.
DBVLBS	1.0	6.00	Plural	Crest
DBVLBR	1.0	6.00	Plural	Reattach.
DBVLDS	2.0	6.00	Plural	Crest
DBVLDR	2.0	6.00	Plural	Reattach.

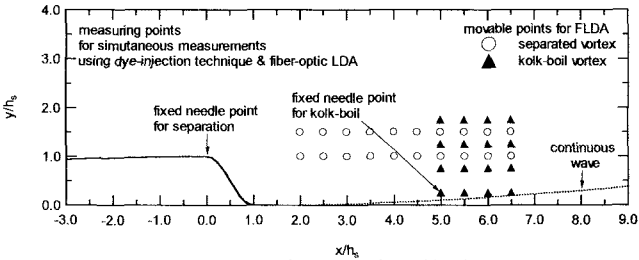


図-2 同時計測実験の計測点

ならない。それをスケール(伸縮)、トランスレート(平行移動)することによって、解析する波形中のこれと相似な様々なスケールの波形を、時間に関する情報を失うことなく抽出することができる。waveletの定義式は以下のように表される。

$$(W_{\psi}f)(a,b)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{+\infty}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)f(t)dt \tag{1}$$

ここで、 a : scale parameter, b : transrate parameter, $f(t)$:元の関数(信号), $(W_{\psi}f)$: wavelet係数である。本解析では、mother waveletとして代表的なmorlet⁹⁾を採用した。 $(W_{\psi}f)(a,b)$ は、mother wavelet $\psi(t)$ との相似性を表す量であり、それ自身の情報の他に、スケールと時間に関する二つの情報を持っており、その二乗はwavelet power spectrumと呼ばれる。

3. 解析結果および考察

(1) 剥離渦およびコルク・ボイル渦の可視化

図-3は、35mmカメラで撮影された可視化実験結果の

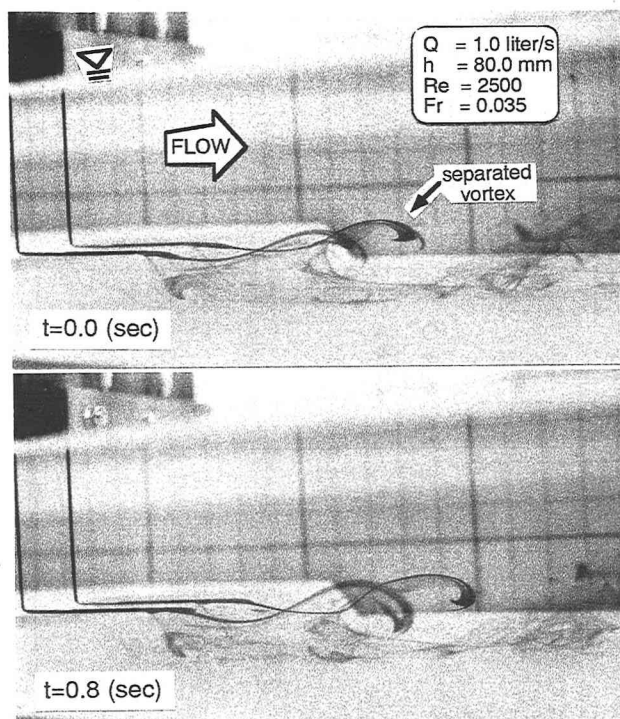


図-3 河床波クレストから発生する剥離渦(CASE:DAVLBS)

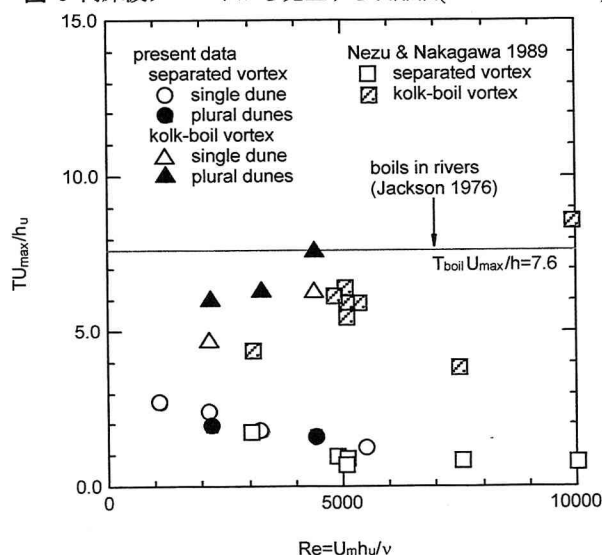


図-4 Reynolds数に対する組織渦の発生周期

一例である。クレストから発生した剥離渦は、僅かに浮上した後、直前に発生した渦を巻き込み、クレスト直下部の低流速域と外層部の高速流域間の流速差により、一種のキャビティー流れのような様相を呈していることが分かる。図-4に、断面平均流速 U_m および上流側水深 h_u を基準とした Reynolds 数に対する剥離渦の発生周期 T の関係を示した。この図には Nezu and Nakagawa¹⁰⁾ によって得られた可視化実験結果と実河川のボイルを観測した Jackson¹¹⁾ の結果 ($T_{boil} U_{max}/h_u = 7.6$) も併示した。なお、 T_{boil} はコルク・ボイル渦の発生周期であり、 U_{max} は最大流速すなわち水面における流速である。単一、連続河床波ともに剥離渦の発生周期は、Reynolds 数が増加するに従って短くなるのに対して、コルク・ボイル渦の発生周期は、逆に長くなる傾向を示し、三角波を連続的に設置

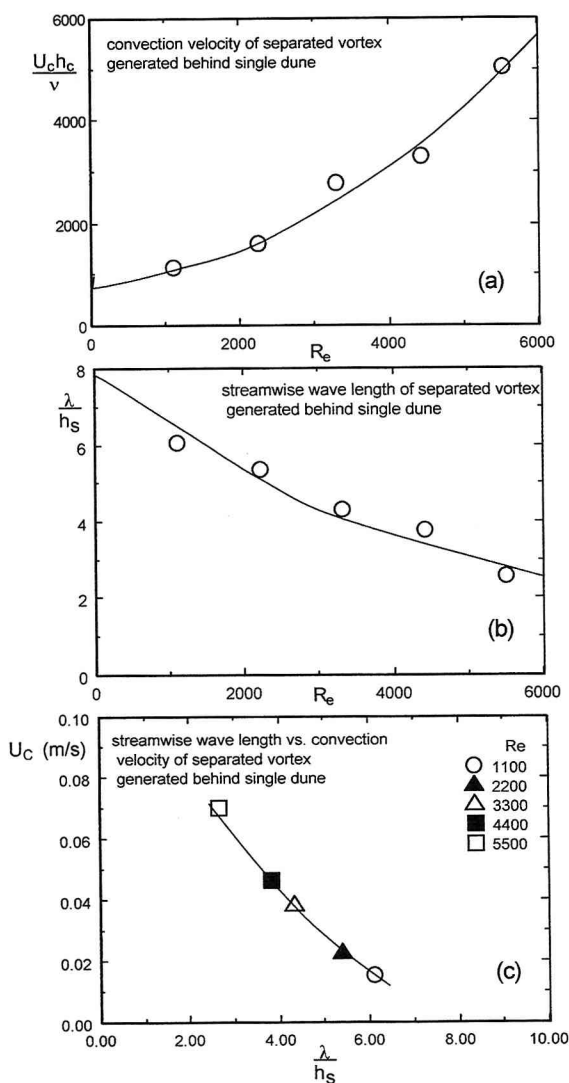


図-5 剥離渦の移流速度 U_c および波長 λ

した Nezu and Nakagawa による結果とほぼ同様な傾向を示している。また、本実験の単一波と連続波との相違は、剥離渦については本実験では観測されずほぼ同一の特性を持つものと考えられるが、コルク・ボイル渦については値に開きが生じた。このことから、コルク・ボイル渦の発生機構が、河床の形状に大きく影響され、河床波クレストから発生した剥離渦(K-H不安定性により発生する)のエネルギーを再付着点からコルク・ボイル渦へと伝える条件がより大きく関与しているものと考えられる。

図-5(a)は、単一河床波上の剥離渦に関して得られた Kadota and Nezu⁹⁾ による可視化の結果を用いて解析した Reynolds 数と渦の移流速度 U_c との関係を示したものである。ここで、 h_c は河床波クレスト上の水深である。また図中の実線はデータの増加・減少傾向を示すための回帰曲線である。移流速度 U_c は放物線に近い形状を描いて増加しているが、これは剥離渦を伴った流体塊が比較的 Reynolds 数の小さな流れであるため再付着点からの上昇渦の影響を受けて渦そのものが減速することなく、かつ周囲の流速に乗って移流していることが推測される。この剥離渦の波長 λ を Reynolds 数の関数として表示したの

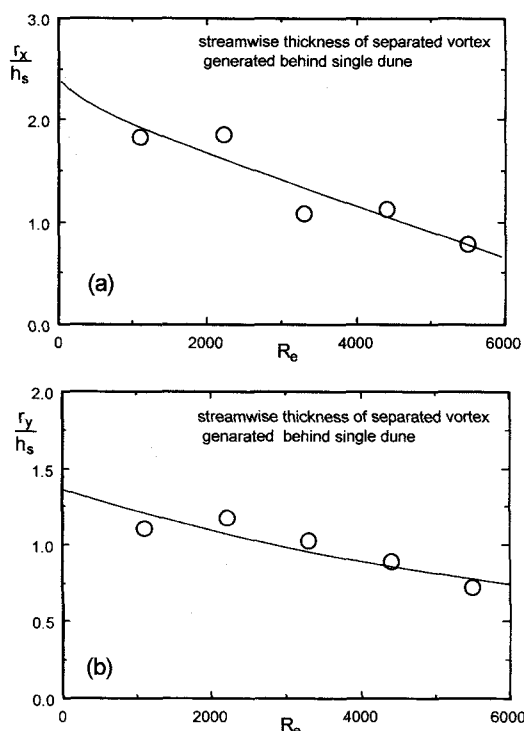


図-6 剥離渦の主流・鉛直方向サイズ渦径 r_x, r_v

が図-5(b)である。波長 λ は波高 h_s すなわち河床波 Crest の高さで無次元化した。結果として、波長はほぼ直線的に減少している。この波長 λ に対する、先の移流速度 U_c との関係を表したものが図-5(c)である。波長と移流速度は反比例、すなわち渦と渦の間隔が大きくなるに従って、その渦の移流速度は小さくなり、Reynolds数と渦の発生頻度の関係がここにおいても示されている。さらに、渦の大きさを、流下方向の径 r_x と鉛直方向の径 r_y それぞれについて調べた。図-6(a),(b)は、渦径 r_x および r_y とReynolds数との関係を示したものである。ここで、渦の大きさは、渦が一回転してもとの位置に戻ったときの径 r_x , r_y と定義した。流下方向の径 r_x および鉛直方向の径 r_y は、多少ばらつきがあるものの全体的にReynolds数に対して減少傾向にあるといえる。これは、Reynolds数の小さい領域では、剥離渦の持つエネルギー自体が小さく、ゆっくりと移流している間に再付着点から上昇してくるコルク・ボイル渦に押し上げられ、結果として渦径が大きくなるためと推測される。

剥離渦が発生したと考えられるroll-upの位置を図-7(a)に河床波上に示した。roll-upの位置は、染料がしばらく直進した後低速流域に入り減速して僅かに下降するものと、そのまま高速域を移流していくものに分岐することによって(図-3参照)、全体として変曲点を持つ遷移状態となり、その時の変曲点位置であると判断して定義した。Reynolds数の増加に伴って、渦の発生する位置は上流側に移動することが分かる。Reynolds数が小さい流れほど、再付着点距離が長くなり、それに伴って低速流域も下流方向に伸びるということが渦の発生位置に影響していると考えられる。さらに、剥離渦の合体が起こり始める

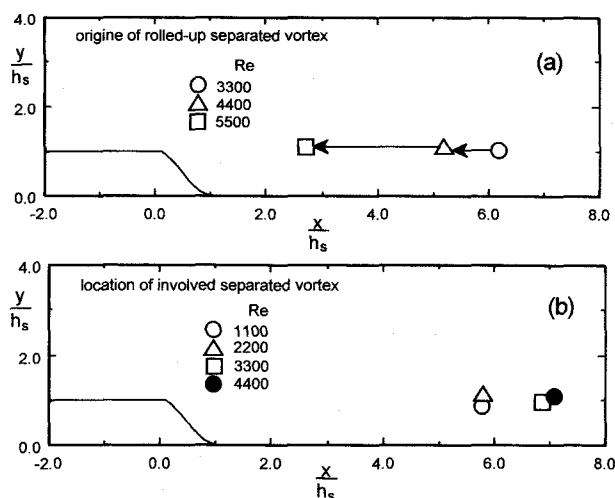


図-7 剥離渦のroll-upおよびpairingの位置

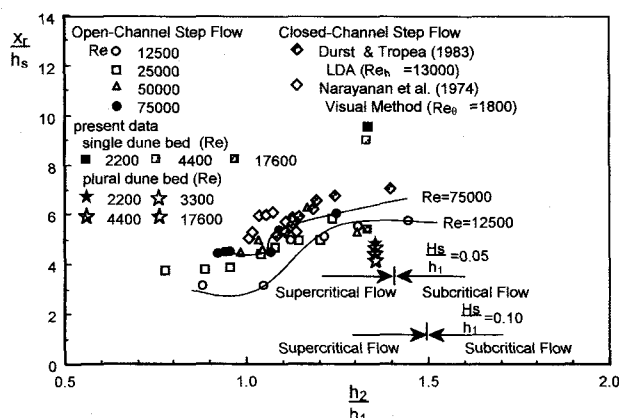


図-8 Reynolds数に対する再付着点距離 x_r

pairingの位置を図-7(b)に示した。roll-upの場合と逆の傾向を示しpairingの位置は下流側に移動する。渦は発生後、高速域をほぼ直進移流するため、Reynolds数が大きい流れほどpairingの起こるまでに運ばれる距離が長くなると推測される。これらの位置の判定にはある程度の主観は免れないが、全ケースとも可視化実験を撮影したビデオで同一の判断基準を設けて行った。

(2) 再付着点距離の変化特性

河床波上の組織渦の一つであるコルク・ボイル渦の動的特性を把握するうえで重要な点は、コルク・ボイル渦の発生位置となる再付着点を確定することである。ここではレーザ流速計を用いた計測から、再付着点を定量的に評価した⁶⁾。クレスト直下では、比較的弱い逆流域が存在しかつ再付着点が存在することが分かり、再付着点の位置を逆流率の値とも比較して決定した。その結果を示したのが図-8であり、再付着点距離 x_r をReynolds数の関数で示した。図中にはEtheridge and Kemp¹²⁾, Armaryら¹³⁾, Nezu and Nakagawa^{10),14)}によって得られたデータを併示した。単一河床波の再付着点距離は、連続河床波のものと比較して長くなる。再付着点が、河床波クレストから発生した剥離渦を伴った流体塊が再び河床波上に着地する位置のことを意味するから、連続波の場合より流体塊が河床に衝突する単一波の場合の方が、再付着点がよ

り下流側に存在することが理解でき、またクレスト背後の減速の度合い、すなわち圧力勾配の影響も単一・連続波間で異なると考えられる。また、従来の実験結果から、Reynolds数が増加するに従って再付着点距離が一定値に近づくことが分かるが、今回の実験、特に連続河床波の実験からも同様の結果が得られた。再付着点距離 x_r とFroude数 F_{r1} との関係を示したものが図-9である。なお、Froude数 F_{r1} は、 U_m :断面平均流速、 h_1 :河床波クレスト上の水深(= h_c)で定義される。Froude数の場合もReynolds数と同様な結果、すなわち単一河床波上の再付着点距離が、連続波のものより長くなり、またFroude数の増加とともに再付着点距離が一定値に近づく傾向が認められる。図-10に河床波クレスト上の水深 h_1 と下流側水深 h_2 との比に対する再付着点距離 x_r の関係を示した。図には、Narayananら¹⁵⁾、Durst and Tropea¹⁶⁾、Nezu and Nakagawa¹⁰⁾の実験結果を併示した。本実験では水深比 h_2/h_1 が一定であるが、従来の実験結果から判断して、Reynolds数が一定の場合、水深比が大きくなる、すなわち下流側水深に比して河床波クレストの波高が高くなるに従って、再付着点距離が長くなると言える。これも再付着点の定義から考えれば、高い位置から剥離した渦を伴った流体塊の方がより遠くで河床波上に着地するためと考えられる。

(3) wavelet解析による時間周波数特性

ビデオ画像による可視化の結果より、剥離渦、コルク・ボイル渦について平均的な発生周期・周波数を算定したところ、それぞれ2sec(=0.5Hz)および5sec(=0.2Hz)程度であった。同時計測したレーザ流速計の時系列データをwavelet変換し、これらの発生周期の範囲内におけるwavelet係数のコンターを図-11(a),(b)に示した。なお、wavelet変換には50Hzで計測した60sec間の時系列データを用いており、剥離渦については主流方向瞬間流速 $u(t)$ 、またコルク・ボイル渦については鉛直方向成分 $v(t)$ を用いた。ここに示した二つの時系列は、それぞれケースDBVLBSおよびDBVLBRにおける計測値で、剥離渦およびコルク・ボイル渦が通過すると考えられる代表的な点における時系列を採用した。図中には、これらの流速変動の時系列および上述の算定した発生周期におけるwavelet係数をそれぞれ示している。時系列流速データの変化より、剥離渦については河床波クレストより上流側の断面漸縮による空間的加速の影響が残っており乱れ変動が小さいものの、大きな変動が比較的頻繁に発生している。一方、この乱れ変動はクレスト背後で断面が急激に大きくなり、空間的減速の効果でコルク・ボイル渦が発生する付近において乱れ変動が大きい。コルク・ボイル渦の発生原因は剥離渦によるものであるが、再付着後の空間的広がり(乱れ)は、空間的な減速効果によるものと考えられる。しかし、コルク・ボイル渦が発生する付近の低い周波数帯に対応する変動は剥離渦に対して大きく緩やかなものとなっている。剥離渦の発生に対応する

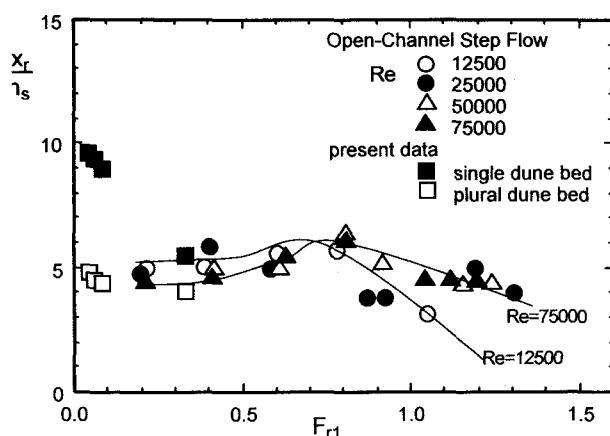


図-9 Froude数に対する再付着点距離 x_r

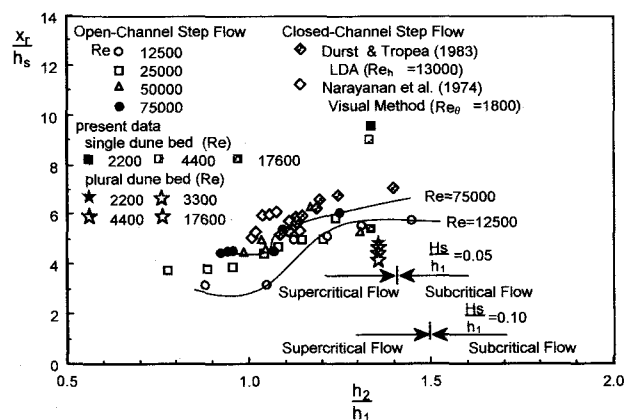


図-10 上流・下流側水深比と再付着点距離

と考えられる周期の付近では、wavelet係数が大きな値を示す時間帯と小さく緩やかな変動を示す時間帯が、そのスケールを変えつつも交互に発生している様子が伺える。実際、同時計測したビデオからの映像において確認された剥離渦は、高速・低速それぞれ交互に発生していた。また、コルク・ボイル渦に関しても、緩やかな変動の中に強いエネルギーを持つものと、そうでないものが存在することが分かる。従来から考えられてきた平均的な乱流特性よりも瞬間的・間欠的で大きなエネルギーを持つ流れが土砂輸送やその他の物質輸送等に影響を与えることが、これらの結果から推察される。今後、どの程度のエネルギーをもつ組織渦が、どの程度の頻度で発生し、土砂輸送に関与するかを解明することが必要である。

4. おわりに

本研究では、河床波上の開水路定常流に関する可視化およびレーザ流速計の同時計測を行い、得られたビデオ画像および乱流変動量から、剥離渦、コルク・ボイル渦の組織渦の特性を時間平均的、また瞬間的挙動を、ビデオ画像による平均的な組織渦構造の解析および乱流変動量とwavelet解析を用いた瞬間的な組織渦構造の解明を試みた。従来からの知見と併せて、発生周期、移流特性など平均的な特性はほぼ解明されたと言える。一方、時間

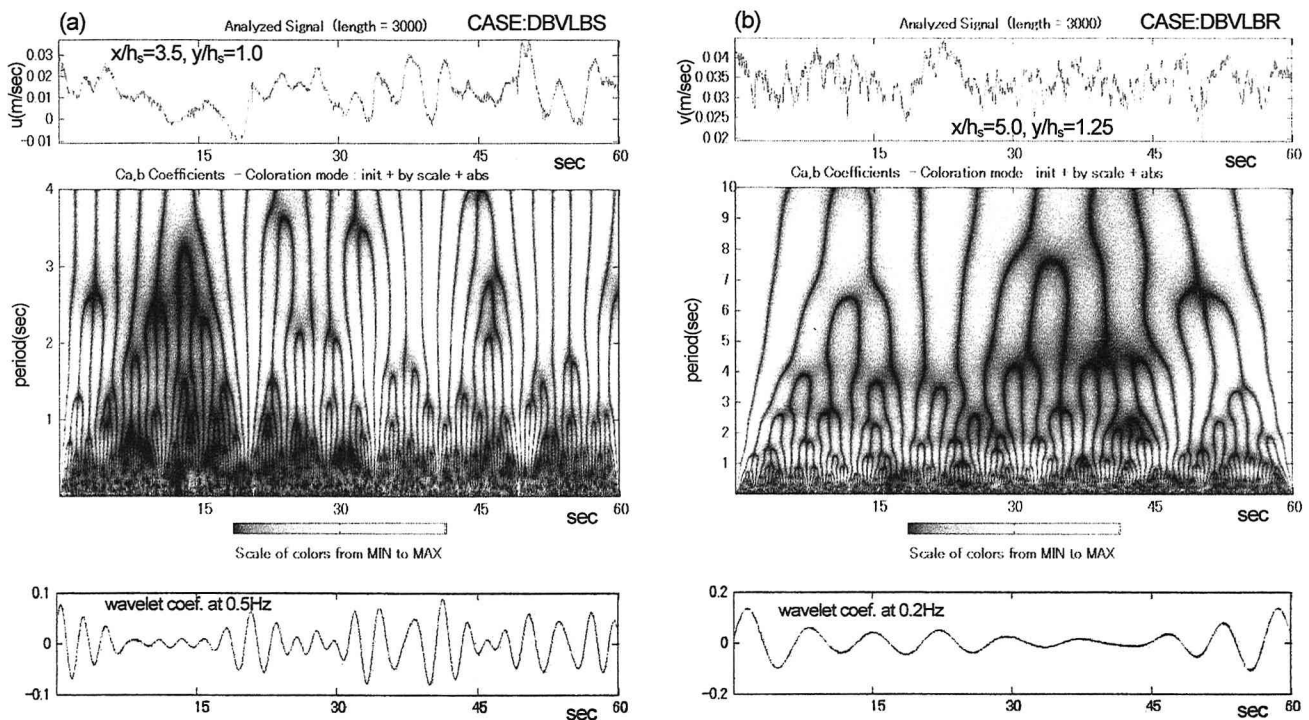


図-11 剥離渦，コルク・ボイル渦の発生する付近の流速変動およびそのwavelet係数

的かつ間欠的に発生し高エネルギーを持った組織渦の構造が特に土砂輸送等に関して重要であると考えられ，その発生頻度など今後詳細に調べていくことが必要である。

参考文献

- 1) Nezu, I. and Nakagawa, H. : Turbulence in Open Channel Flow, IAHR Monograph, Balkema, 1993.
- 2) 棚津家久・中川博次・天野邦彦：開水路段落ちにおける剥離流の乱流構造に関する研究，第30回水理講演会論文集，pp.601-606, 1986.
- 3) Nezu, I. and Nakagawa, H. : Turbulent structure of backward-facing step flow and coherent vortex shedding from reattachment in open-channel flows, Turbulent Shear Flows, Springer-Verlag, vol.6, pp.313-337, 1989.
- 4) 棚津・門田・新橋・倉田：平均流特性に及ぼす河床波形状と非定常性の影響に関する研究，土木学会論文誌，No.579/II-41, pp.115-124, 1997.
- 5) 棚津・門田・新橋・倉田：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，土木学会論文誌，No.579/II-41, pp.125-136, 1997.
- 6) Kadota, A. and Nezu, I. : Three-Dimensional Structure of Space-Time Correlation on Coherent Vortices Generated behind Dune Crest, J. Hydraulic Res., IAHR, Vol.37, pp.59-80, 1999.
- 7) Müller, A. and Gyr, A. : On the vortex formation in the mixing layer behind dunes, J. Hydraulic Res., IAHR, vol.24, pp.359-375, 1986.
- 8) 神田・宮本：ウェーブレット変換を用いた開水路凹部流れの組織運動の解析，水工学論文集，第44巻，pp.515-520, 2000.
- 9) 榊原：ウェーブレットビギナーズガイド，東京電気大学出版局，1997.
- 10) Nezu, I. and Nakagawa, H. : Accurate measurements of space-time correlations of coherent vortex behind dunes in turbulent open-channel flows with combination of laser-Doppler anemometer and hot-film anemometer, Proc. Workshop on Instrumentation for Hydraulics Laboratories, IAHR, Burlington, Canada, pp.29-44, 1989.
- 11) Jackson, R. G. : Sedimentological and fluid-dynamic implications of the turbulent bursting phenomenon in geophysical flows, J. Fluid Mech., vol.77, 1976.
- 12) Etheridge, D. W. and Kemp, P. H. : Measurements of turbulent flow downstream of a rearward-facing step, J. Fluid Mech., vol.86, pp.545-566, 1978.
- 13) Armary, B. F., Pereira, J. C. F. and Schonung, B. : Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow, J. Fluid Mech., vol.127, pp.473-496, 1983.
- 14) Nakagawa, H. and Nezu, I. : Experimental investigation on turbulent structure of backward-facing step flow in an open channel, J. Hydraulic Res., IAHR, vol.25, pp.67-88, 1987.
- 15) Narayanan, M. A. B., Khadgi, Y. N. and Viswanath, P. R. : Similarities in pressure distribution in separated flow behind backward-facing steps, Aeron. Q., vol.25, pp.305-312, 1974.
- 16) Durst, F. and Tropea, C. : Flows over two-dimensional backward-facing steps, IUTAM Symp. on Structure of Complex Turbulent Shear Flow, ed. by R. Dumas and L. Fulachier, Springer, pp.41-52, 1983.

(2001. 10. 1 受付)