

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

禰津家久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が、河床波背後の乱流特性に与える影響について実験的考察を行う。河床波上に非定常流れを発生させ、点計測実験を行うことで、水面形、底面せん断応力、再付着点距離および基本的乱流統計量の分布特性に関する考察を、従来のステップ流や河床波上の定常流で得られた実験結果との比較とともにを行った。この結果、乱流特性に及ぼす河床形状の空間的加速・減速効果と、水深の増加・減少といった非定常性あるいはレイノルズ数の増減の効果との相互比較によって、河床波上の非定常平均流構造のいくつかの現象が説明可能であることが分かった。

Key Words : unsteady open-channel, spatial acceleration/deceleration, loop properties, reattachment point, bed-shear stress, fiber-optic LDA

1. 緒 論

開水路乱流において観察される平均流特性や組織渦には、その特徴的な境界である自由水面に起因する乱れの非等方性による現象がいくつか存在する。さらに実河川においては、縦渦やコルク・ボイル渦と呼ばれる大規模な組織渦が河床形状と水面との相互作用により発生し、特に後者は高濃度の浮遊砂を伴いながら、河川の表面に環状に盛り上がり流下する¹⁾。このボイル渦はその発生形態から基本的に三つに分類されるが、その内、第1種のボイルは砂漣や砂堆の背後に形成され、かつ強いエネルギーを伴って移流し、土砂の浮遊機構の主因となる¹⁾。

実河川で発生する組織渦の観測例として、木下(1984)²⁾による航空写真、長谷川(1989)³⁾による石狩川の洪水流を実測した研究が挙げられる。その結果、浮遊砂濃度や乱れ特性の増水期・減水期間の相違など洪水流特有の現象が得られており、このことは準定常流解析に限界があることを示していると考えられる。林・大島(1988)⁴⁾は、三次元複列正弦波床上の非定常流れの乱流計測を行うことにより、乱流

特性に与える河床波の空間的加速・減速と水面の時間的変化との効果の比較について考察を行った。また、非定常乱流に関する最近の室内実験では、滑面平坦路床での乱流計測を行ったNezuら(1994)⁵⁾や、粗面上の流れの計測を行ったSong(1994)⁶⁾、また三角形の河床波模型を風洞内に設置し乱流計測を行った金子ら(1996)⁷⁾が挙げられ、これまで実験装置や計測機器の制約などから計測困難とされてきた非定常開水路流れの乱流構造についても、ほぼその基本乱流統計量の分布特性に関しては理解が深まりつつある。

著者ら(1994)⁸⁾は、これまで滑面平坦路床上の非定常流れを乱流計測し、乱流特性量の水深変化に対する反時計回りのループ状の変化特性、あるいは水深変化に対する平均流速、底面せん断応力の位相差など、実河川に見られる特性をある程度まで再現可能とし、有益な結果を得た。次に、染料を用いた可視化実験および時空間相関実験により河床波床上の定常流に関する組織渦の移流特性の相違を考察することで、河床形状が組織渦に与える影響を議論した⁸⁾。また、剥離渦、コルク・ボイル渦の三次元特性に関する考察より、低

Table 1 Experimental conditions.

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 ($\times 10^{-3}$)
DUP31	60	40.0	65.0	5.00	13.61	14.0	38.1	0.50	0.66	1.00
DUP32	90	40.0	67.0	5.00	14.01	14.1	39.6	0.50	0.65	0.72
DUQ31	60	40.0	58.5	3.00	8.40	8.3	23.2	0.30	0.47	1.13

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.

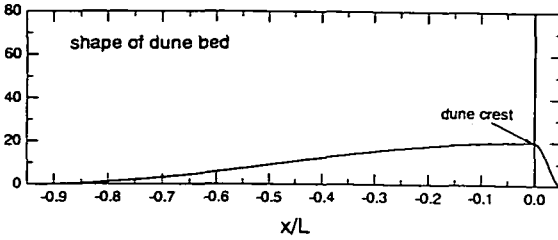


Fig. 1 Shape of dune bed.

速縮・高速縮を有する複雑な渦構造が見られ、特にコルク・ボイル渦は剥離渦と比較して、狭い間隔で配列される渦構造が確認された。本研究は、これらの実験・研究を通じて構築された実験装置、解析手法を活用することで、河床波上の非定常開水路流れにおける平均流特性に関して、流れの非定常性および河床形状の河床波背後に形成される平均流構造に与える効果について、洪水波の増水期・減水期における乱流構造の相違に着目した実験的考察を行うものである。

2. 実験方法および解析方法

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_c (=2cm) に対する水深 h_b (=8cm)、および水深 h_b に対する波長 L (=40cm) の比などを考慮した正弦波から構成される形状で⁶⁾、実河川で見られる典型的な二次元状のdune波形を採用した(Fig.1)。この河床波(滑面固定床)を水路の上流端から連続的に設置した。

点計測実験では、DANTEC社製の水冷(2W)4ビーム後方散乱型アルゴンイオン・ファイバーレーザ流速計(FLDA)を使用し、これを自動トラバース装置(0.1mm以下の誤差)に設置することで各計測点の瞬間流速を測定した(Fig.2)。これらのレーザ流速計周辺のシステムでは、シフト光の位相、バイアス制御などの計測に必要な全ての設定がIBM製のコンピュータ支援で行うことが可能である。さらに、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

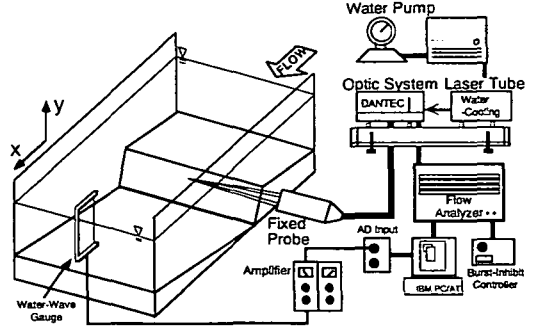


Fig. 2 Measuring system for point-velocity measurement.

行った。波高計の信号は、AD変換器の外部入力信号としてレーザ流速計を制御するコンピュータに取り込まれる。なお、レーザ流速計等の測定周波数は、約300Hzであった。

流量変化には三角波とし、ピークフロー時の流量をベースフロー時(初期定常時)の流量のほぼ3倍になるように設定した(Table 1)。この条件は、非定常波のある時間帯における水流量が、上述の水深比等の条件を満たし、かつ非定常性を著者の滑面を対象とした実験条件⁵⁾にほぼ一致させた。またベースフロー時からピークフロー時までの増水時間は $T_d=60,90$ secの二種類である。 α は乱流特性に与える非定常性の影響を示す指標で、 $\alpha = 2(h_p - h_b) / T_d(U_{mb} + U_{mp})$ で表される⁷⁾。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。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、この原点から1cm間隔で15断面、1鉛直断面当たり約8点、計120点の計測を行った。1計測点当たりの計測時間は、ベースフロー時30sec、増減水時間120~180sec、減水後の100secの計250~310secである。

非定常流れの乱流構造を考える上で重要な点である平均流速成分の定義には、実験条件により差が出ないこと、長時間の計測を要しないことからこれまで用いられた周波数領域法を採用した⁵⁾。フーリエ項数 $m=7$ とし、これにより決定される平均流速は0.01Hz以下の周波数成分から構成され、乱れのバースト周波数より

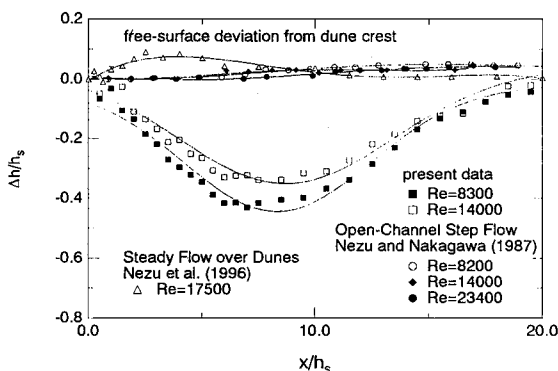


Fig. 3 Free-surface profile at base-flow ($T=0$).

も十分小さいために、低周波の平均流速成分と高周波の乱れ成分とを合理的に分離できた。

3. 実験結果および考察

(1) 水面形の空間分布特性

Fig. 3は、ベースフロー時 ($T=0$) の水面形を、河床波クレストにおける水位 ($=h_s+h_c$) からの差 Δh として示したものである。図中、比較のために、Nakagawa & Nezu (1987)⁹⁾によるステップ流に関する水面形の実験結果およびNezuら (1996)⁸⁾の河床波上定常流の結果も併示した。河床形状の不連続性による減速の効果を受けるクレスト直下部において、急激に主流方向に従って $x/h_s=7.0$ 前後まで低下し、その後一定の変化を示す傾向が現れている。さらに、前方の河床波による加速の影響を受けると考えられる下流部では、これより上流側の急激な水面勾配と比較して緩やかな勾配を保ちながら変化し、再び次のクレスト上 ($L/h_s=20$)で回復していることが分かる。Re数の大きなNezuらの結果と比較すると異なった水面形状を示しているが、これはRe数の大きな流れほどクレストからの急激な減速効果を受けるため水面が主流方向に上昇し、その効果をさらに下流側まで維持するという、いわゆる急激な河床形状の変化に対して水理特性が直ちに反応しない開水路特有の「遅れ」の現象を示していると考えられる。本実験の水面形状は、Fr数の小さな実験ケースであることから、上流側にあるクレストからの急激な減速効果より、むしろ下流側からの影響が大きく、前方の河床波の上り勾配の影響から、結果として上記のような水面形の降下現象が見られるものと考えられる。一方、急激な段落ち部からの減速の効果を受けるステップ流では、水面形が一度上昇するものの、その減速効果が徐々に弱まり一定値に落ちつく様相を呈している。また、本実験データやNezuらの結果と比較して、剥離点からの減速効果による水面形の上昇がさらに下流側に

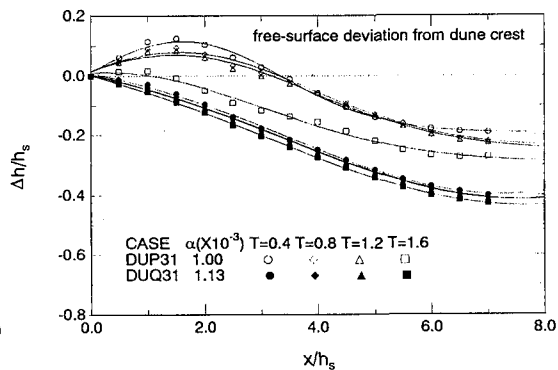


Fig. 4 Time variation of free-surface profile ($T>0$).

あることから、比較的大きな「遅れ」が存在することが分かる。

一方、ベースフローからの水面形の時間変化を同様にFig. 4に示した。なお、 T は T_d で無次元化された時間で $0 < T < 1$ が増水期、 $1 < T < 2$ が減水期に相当する。上述したベースフロー時における水面形との対応から、ベースフローから増水期にかけてのRe数の増加にともない、Fig. 3に併示したRe数の比較的大きな条件下で行ったNezuら(1996)⁸⁾の水面形状と相似な水面形状と相似な分布を示すようになる。特にピーク時においてRe数の大きくなる実験ケースDUP31では、クレスト直下の剥離領域における空間的減速流の効果が現れ、水面形がこの付近において一度増加し、その後前方の河床の効果によって減少する傾向が現れている。一方、Re数の変化が増減水時に少ないケースDUQ31では、上記した傾向がほとんど現れず、水深そのものが増減水時にわたって上昇・低下するのみであり、一定の形状を相似に保ちながらあまり変化しないことが分かる。例えば、クレスト直下での $x/h_s=1-3$ で両ケースの比較を行うと、DUP31の方がその減速効果が明確に表れていることが分かる。

(2) 底面せん断応力の変化特性

摩擦速度 U_* は対数則や運動方程式の積分により評価されることが一般的であったが、不連続な境界形状の存在する剥離流れに関しては、対数分布の領域が小さくなるなどの理由でこれらの方法による評価は困難となる。本研究では、これまで三角波や正弦波など、様々な不等流について各種の評価方法による検討を行ってきた。その結果、次式で表される形状係数 H を用いたLudwig-Tillmannの実験公式が非常に良く一致していると判断した¹⁰⁾。なお、段落ち流れのような不連続点を有する流れにおいても次式が適応可能であることが確認されている。

$$C_f = 2(U_* / U_{max})^2 = 0.256 \times 10^{-0.678H} Re_0^{-0.268} \quad (1)$$

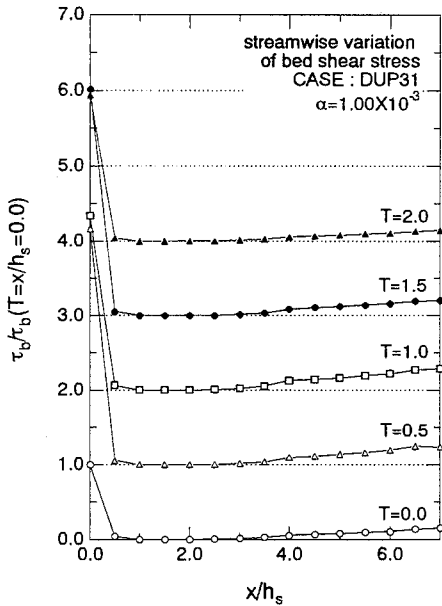


Fig. 5 Streamwise variations of bed shear stress.

ここで、形状係数 $H = \delta^*/\theta$, $Re_\theta = U_{max}\theta/\nu$. また、 δ^* は排除厚および θ は運動量厚である。Fig. 5は、上式によって評価した底面せん断応力 $\tau_b = \rho U^2$ の変化を示したものである。なお、この図に示した底面せん断応力は、河床波クレスト上の初期計測断面($x/h_s=0$)におけるベースフロー時($T=0$)の値で無次元化されている。また、各無次元時間 T の変化を縦軸方向に1ずつシフトさせて表示してある。クレストの直下($x/h_s=1$)で τ_b がゼロに近い値をとり、逆圧力勾配の大きな剥離を伴った急激な減速流においても上式が妥当であることを示している。その時間変化に関しては、最も増減水の影響を受ける断面がクレスト上 $x/h_s=0$ であり、それから流下方向では剥離の影響により時間変化の度合いはごく小さく、再付着点付近($x/h_s=4$)から再び増減水区間にわたって変化する傾向にある。

次に、これらの底面せん断応力 τ_b の変化を詳細に検討するために時間軸に対して Fig. 6 に示した。ここでは、 τ_b の変化を各断面のベースフロー時の値 $\tau_b(T=0)$ で無次元化してある。 $x/h_s=0$ における底面せん断応力の時間変化は、ピーク時 $T=1$ 以前で一旦ピークを示すといったこれまでの平坦滑面上の非定常流れと同様な傾向⁹⁾を示すものの、さらにこのピーク時以降に二度目のピークが現れることが分かる。これは、上流からの履歴である加速流の効果で、他の下流側の断面とは異なった変化を示していると考えられる。すなわち、圧力勾配の変化特性を考慮すると、時間的に流量の増加する増水期は空間的に見れば減速流であり、一方減水期は空間的加速流であるから¹¹⁾、クレストより上流側のより勾配を伴った河床波形状による加速の効果に増

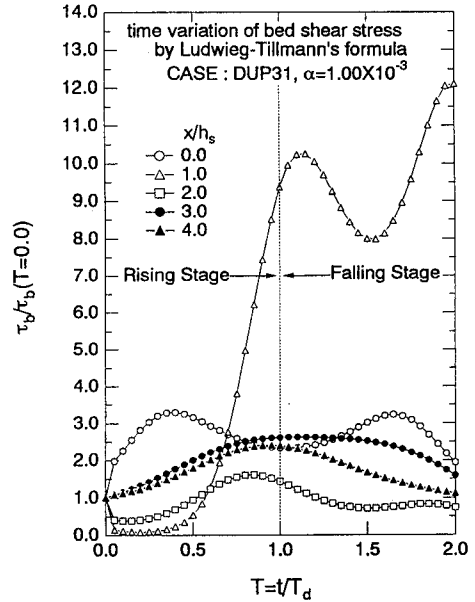


Fig. 6 Time variation of bed shear stress.

長されて、減水期の順圧力勾配の最も大きいと考えられる時間帯($T=1.5$)に底面せん断応力が増加傾向を示すものと考えられる。また、水深ピーク時より流量が小さくなるにも関わらず、減水期に極大値を示すのは非定常性が生み出す水面形の変化によるものが大きいと考えられる。クレストの直下流部($x/h_s=1$)では、流れが剥離するために大きな減速流域に入るため底面せん断応力の絶対値は小さくなるものの、その変化特性に関しては、増水期における空間的な減速流の効果によって摩擦速度が一度減少し、その効果が弱まるにつれて、あるいは減水期における空間的加速の効果によって再び増加し、減水期でピークを示すクレスト上と同様の傾向を示している。さらに $x/h_s > 2$ では、 Re 数の増加に比例して変化していることから、水深ピーク時以前に最大値を示すといった平坦滑面上の非定常流と同様な変化特性を示しており⁹⁾、水深・底面せん断応力間の位相差が認められる。

Fig. 7に、ベースフローからの水深差 $\Delta h = h - h_b$ に対して底面せん断応力 τ_b の変化を示した。Fig. 6に示した底面せん断応力の時間変化に対する水深変化の位相差のために、全ての計測断面に対して時計回り、あるいは反時計回りのループ特性を示していることが分かる。クレスト上の $x/h_s=0$ の水深に対する変化では、上述した上流からの加速の影響のために、増水期・減水期それぞれに二つのピークが現れ、これによって水深ピーク時付近の一部の時間帯に対して増水期から減水期にかけての僅かな時計回りの変化を示していることが分かる。増水直後と減水期からその後の定常時における比較を行うと、同一水深時に対して増水期の方が大き

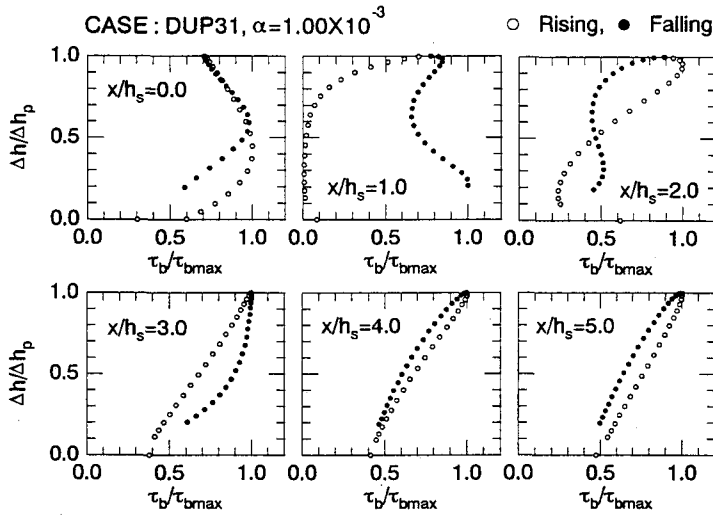


Fig. 7 Bed shear stress against for depth variation $\Delta h = h - h_b$.

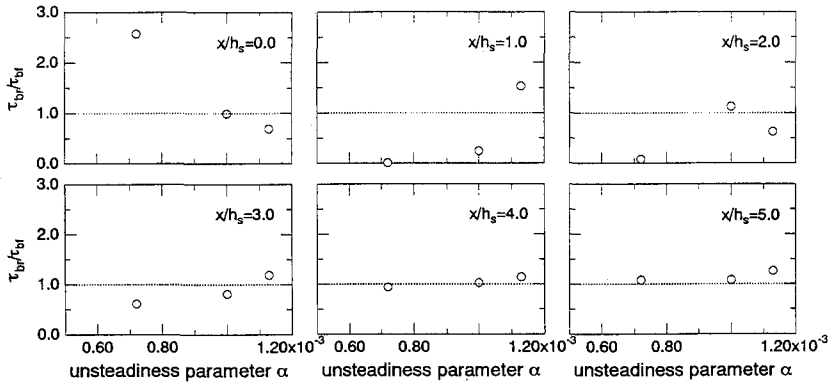


Fig. 8 Ratio of averaged bed-shear stress in rising stage to falling stage.

くなる事が分かる。また、剥離直後の $x/h_s=1$ の地点では、明らかに底面せん断応力が減水期において大きくなり、この時間帯において上昇傾向を示すことから、水深変化に対して時計回りの変化を示す。このような時計回りの傾向は、再付着点($x/h_s=4$)より上流側まで同様であり、再付着点付近の逆流域の複雑な構造と、剥離による底面せん断応力そのものの絶対値がごく小さくなること、さらに非定常性によって引き起こされる空間的な加速・減速の効果が絡まった複雑な様相を示している。一方、再付着点より下流側では、従来より得られている平坦滑面上の非定常流と同様な反時計回りの変化を示し、底面せん断応力が水深変化よりも前にピークを示す事が分かる。上記の底面せん断応力の変化特性より、実河川の観測で得られた乱れ特性量のループ特性と同様に、同一水深時では増水期、減水期間の相違が現れ、河床形状の効果と併せて非定常性による影響も存在することが分かる。

Fig. 8は、増水期における底面せん断応力 τ_b の平均値

の減水期のそれに対する比を、点計測に関する全ての実験ケースについて、非定常パラメータ α の関数として示したものである。これまで述べた底面せん断応力に関する傾向が、非定常性が大きくなるにつれて顕著になる事が分かる。特にクレスト上($x/h_s=0$)の増水期・減水期間の比は、非定常性が大きくなるにつれて空間的加速の効果を受ける減水期の方が大きくなる。一方、再付着点付近までの逆流域では、先述したように河床形状や増減水の効果などの複雑な要因によって、非定常パラメータ α に対して一意に決定されない事が分かる。これより下流側では、やはり非定常性によって右上がりの傾向を示すことから、減水期と比較して増水期における底面せん断応力が大きくなる特性がある。

(3) 点計測実験による再付着点距離の変化特性

実河川に発生する大規模組織渦の一つであるボイル渦の動的特性を把握する上で重要な点は、その発生源

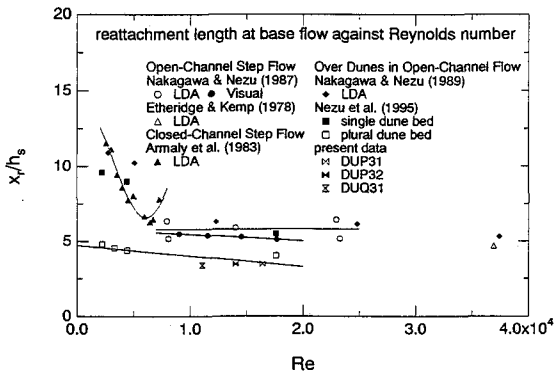


Fig. 9 Retachment length x_r at base flow.

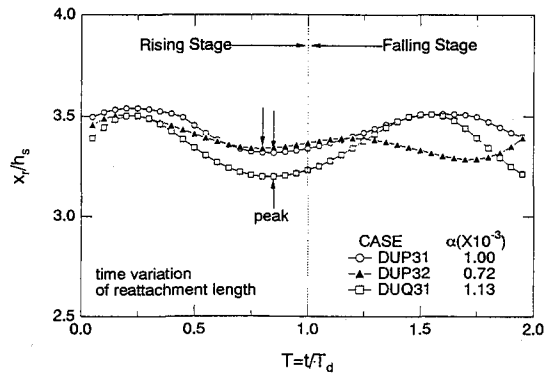


Fig. 10 Time variation of reattachment length.

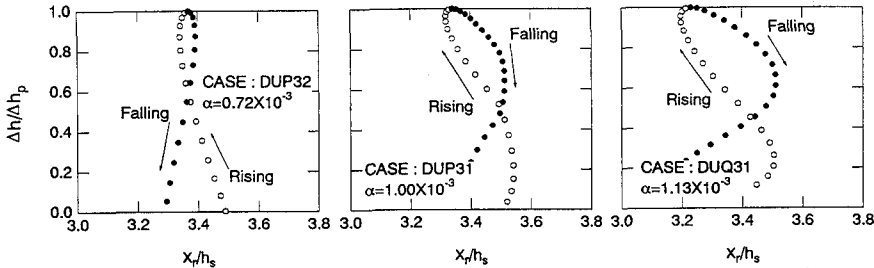


Fig. 11 The reattachment length x_r against for depth variation $\Delta h(x/h_s=0)$.

となる再付着点距離を正確に評価することであり、河床波クレスト背後における逆流域の高精度な計測が前提条件となる。本実験における再付着点距離 x_r の評価には、点計測から得られた時系列データを基に逆流率(全時系列データに対する負の流速の割合)や流線の分布から総合的に行われた。

Fig. 9は、ベースフロー時の再付着点距離 x_r を、ステップ流に関するNezu & Nakagawa(1987)¹²⁾, Etheridge & Kemp(1978)¹³⁾, Armalyら(1983)¹⁴⁾および単一・連続河床波に関するNezuら(1996)⁸⁾のデータも併せて示したものである。ステップ流および単一・連続河床波の場合、それぞれについて各々の特徴が現れていることが分かる。単一河床波の場合、ステップ流とほぼその形状が同一であると考えられるため、低 Re 数領域において再付着点距離が急増する。一方、連続河床波では、前方の河床波が存在するためにその傾向が現れず、河床波クレストから発生した剥離渦が衝突する再付着点は、ステップ流と比較して短く、 Re 数に対する変化特性が若干減少傾向にある程度である。また、本実験で用いた連続河床波における再付着点距離の変化も、これと同様の变化特性を示していることが確認できる。

Fig. 10はベースフロー時以降($T>0$)の再付着点距離 x_r の時間変化を示したものである。増水開始直後は全てのケース間に差異は見られないものの、水深が増加するにつれて大きな変化を示していることが分かる。最

小値は、水深ピーク時($T=1$)以前に存在し、水深変化に対して位相差を伴った変化を示している。また、非定常パラメータ α の大きなケースほど、水深ピーク時において再付着点距離が短くなる傾向がある。

この水深変化に対する再付着点距離の位相差を議論するために、無次元時間 T をパラメータにし、クレスト上の水深変化 $\Delta h(x/h_s=0)$ に対してFig. 11に非定常パラメータ α の小さなケースから順に示した。上述した x_r の水深ピーク時以外の増水直後および減水期後の変化が、それぞれ極大値を示すために、この付近では増水期の方が再付着点距離が長くなる。一方、水深ピーク時前後では、逆に増水期の方が再付着点距離が短くなるのが分かり、河床波クレストから再付着点に向かう剥離渦の、河床波面に対する角度が急になっていることが推測される。これは、伊勢屋・池田(1986)¹⁵⁾が大型水路において観測した、増水期における浮遊砂濃度の増加とこれに伴うボイル渦の顕著な発生と対応しているものと考えられる。また、その付近のループの面積は非定常性の大きなケースにおいて大きくなり、その傾きも負の方向に急となる。このことは、同一水深でも増水期と減水期とでは逆流域の様子が異なっていることを示している。Fig. 12は、非定常パラメータ α の関数として、減水期の平均値に対する増水期の比 $(x_r)_f/(x_r)_f$ 、再付着点距離の最大と最小値の差 $(x_r)_{base} - (x_r)_{peak}$ を示したものである。これより、 α に対して一意の関係が得られることが分かる。

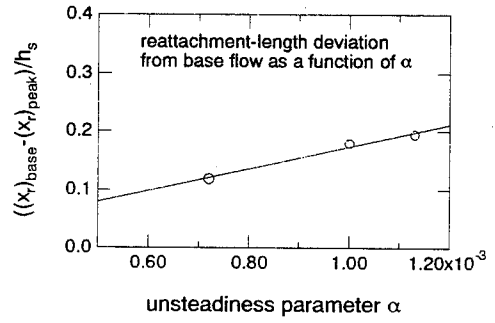
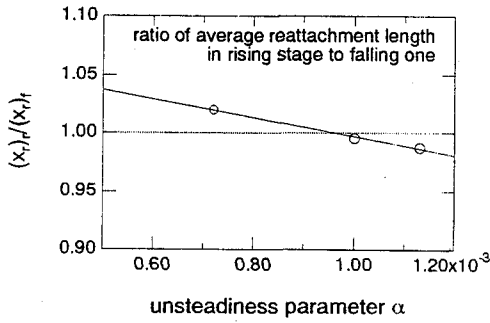


Fig. 12 The ratio of averaged reattachment-length $(x_r)/(x_f)$ and difference between max. and min. values $(x_r)_{base} - (x_r)_{peak}$.

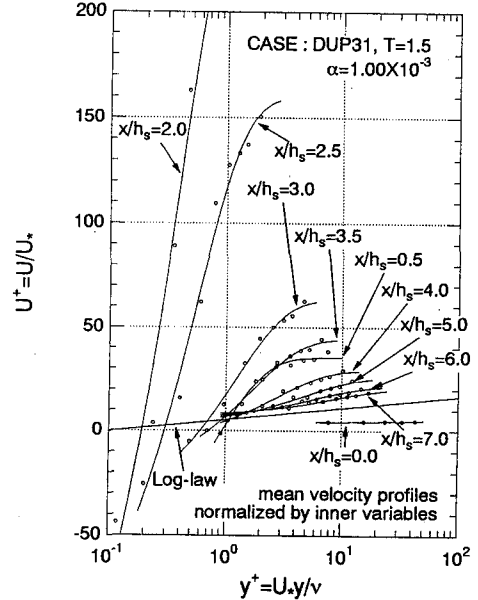
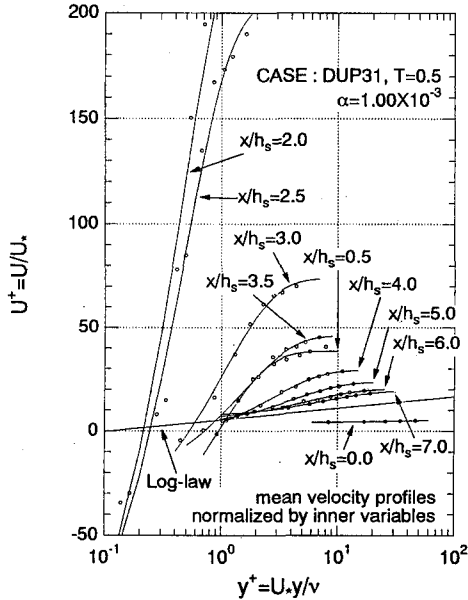


Fig. 13 Streamwise variations of mean velocity profiles (left : rising stage, right : falling stage).

(4) 平均流速およびその他の高次相関の分布

実験公式(1)により評価した摩擦速度 U_* で無次元化した平均流速、乱れ強度およびReynolds応力の基本的乱流統計量の分布・時間変化特性について考察する。これらの統計量は、洪水区間($0 < T < 2$)を40分割し、各区間の乱れ変動量の算術平均から定義している。

Fig. 13は、ケースDUP31の平均流速分布の主流方向変化を増水期($T=0.5$)および減水期($T=1.5$)の二つの代表的な時間帯について示したものである。図中、等流時に成立する対数則分布も実線で併示した。図より、増水期・減水期ともに、クレスト上($x/h_s=0$)の分布は、先の底面せん断応力の増水期あるいは減水期において二つのピークを伴った増加傾向に応じて、上流からの加速流の影響により対数則分布から下方に逸れることが分かる。一方、急激な減速の影響を受け、剥離流れの発生するクレスト直下流部では、摩擦速度がゼロに収束するために、内部変数表示の平均流速分布は定常等流時の分布より大きく上方に逸れる。さらに再付着

点付近($x/h_s=4$)から下流部では、前方の河床波の漸縮による加速効果によってクレスト直下流部の急激な減速効果が弱まり、対数則分布へと漸近していく様子が伺える。このように、クレスト上あるいは再付着点より下流部では、増水期・減水期間であまり相違が見られず、内部変数表示された平均流速分布が時間的に相似形を伴った普遍性を示していることから、摩擦速度の変化に応じて流速分布も変化していると考えられる。ところが、逆流域に相当する $x/h_s=2.5-3.5$ 付近の分布は他の分布よりも増水期・減水期間で比較的変動が大きく、先述した逆流域における非定常性と再付着点との変化特性との絡みで引き起こされる底面せん断応力(摩擦速度)のループ特性と密接に関係している。

増水期・減水期における主流方向乱れ強度 u' およびReynolds応力 $-\overline{u'v'}$ の鉛直方向分布の変化を、それぞれFig. 14およびFig. 15に片対数表示した。図中の実線は、等流時に成立する乱れ強度に関する普遍分布¹⁾、Reynolds応力の三角形分布である。

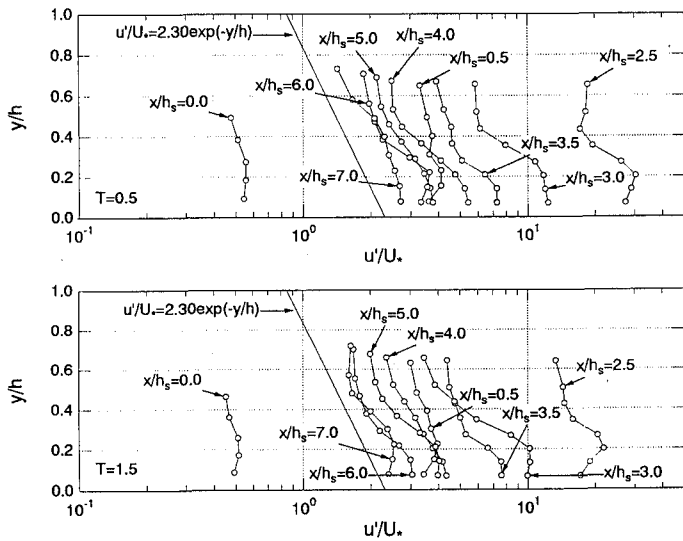


Fig. 14 Streamwise turbulence-intensity u' (above : rising stage, below : falling stage).

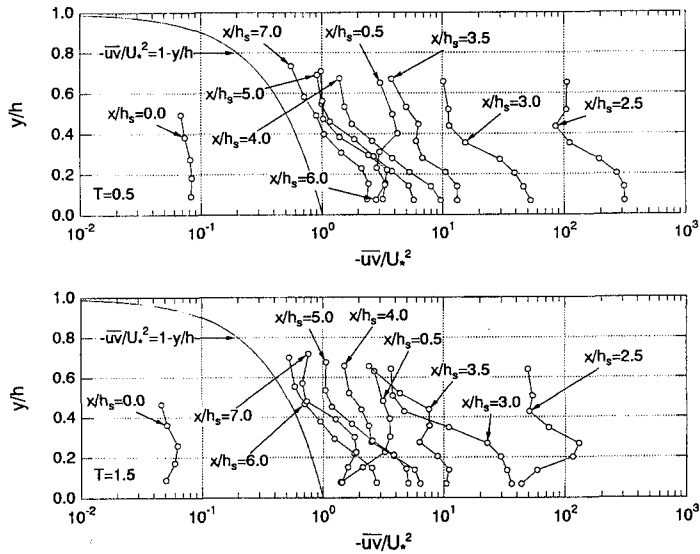


Fig. 15 Streamwise turbulence-intensity u' (above : rising stage, below : falling stage).

乱れ強度、Reynolds応力ともに平均流速同様、クレスト上の分布が定常等流時の実線より小さく空間的加速流の特性が認められる。その地点より下流側では急激な減速の効果が現れ、やがて前方の河床波の影響により等流時の分布に収束する。ここでも同様に、増水期・減水期間の差が大きいのは $x/h_s=2.5\sim 3.5$ の分布である。減水期でのReynolds応力の鉛直方向の分布形状に着目すると、剥離直後($x/h_s=0.5, 2.5$)の底面付近($y/h < 0.4$)の分布に極大点(分布形の膨らみ)が観察され、一方、再付着点距離手前よりやや下流側($x/h_s > 3$)では

その点が顕著に見られないことから、それらの点を通ってできる軌跡が、大きなせん断層が形成され剥離渦が再付着点付近に衝突するまでの道筋となると推測できる。また、 $x/h_s=2.5$ における極大点が増水期と比較して顕著となることから、水深ピーク時前後で減水期の方が再付着点距離が長くなる傾向と対応しているものと考えられる。

Fig. 16は、同様にベースフローからの水深差 Δh に対して平均流速 U 、乱れ強度の主流・鉛直成分(u' , v')、Reynolds応力の変化を、クレスト上および再付着点周

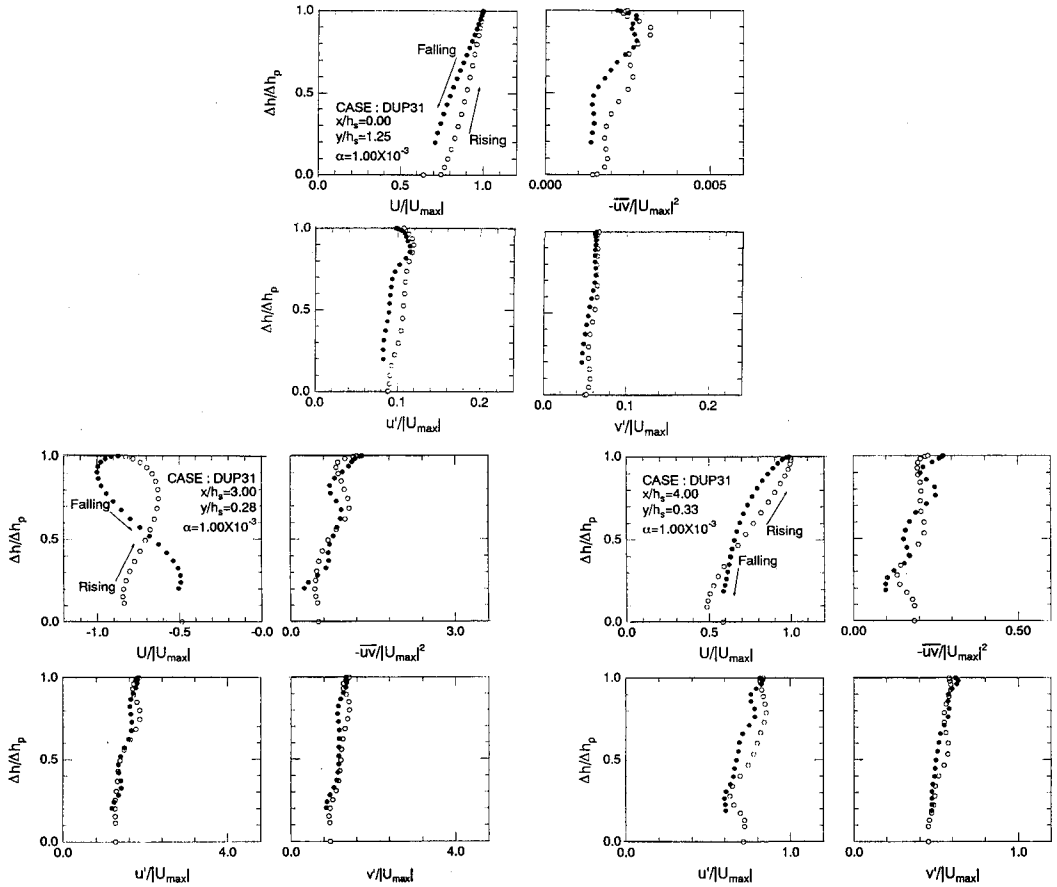


Fig. 16 Turbulence intensities u' and v' and Reynolds stress for depth variation Δh (left : rising stage, right : falling stage).

辺の底面付近からそれぞれ代表的な点について示したものである。各乱流統計量は、各点における最大平均流速 U_{max} で無次元化されている。

水深変化に対する変化は、明らかに水深変化に対して位相差を伴ったループ状の変化特性を示し、非定常性の影響が現れている。また、これらの特性は洪水河川で観察される事実でもある。同一水深に関してその変化を見ると、先のせん断応力のループ特性も併せて、増水期・減水期間で乱流特性も大きく異なることになる。クレスト上 ($x/h_s=0$) におけるこれらの変化は、右側に傾いた、いわゆる Re 数の増加に従って増加する傾向、さらに反時計回りの変化特性を示していることから、増水期・減水期の空間的減速・加速効果が、それぞれの区間における乱れの増加・減少に寄与していると考えられる。相対的に $x/h_s=4$ のループ特性と比較して小さいのは、クレスト上流側の加速区間の影響、すなわち上流からの履歴の影響であると考えられる。ループの描く面積の大きな、非定常性の影響を大きく受ける地点は、再付着点付近の $x/h_s=3$ の変化でありクレスト上の変化と比較してかなり大きくなる。

また、他の地点の変化と比較して、乱れ特性量の変化はほぼ同様なループ特性を示しているが、平均流速の変化がやや左に傾き、かつ反時計回りの変化特性を示す。これは、再付着点距離が最も短くなる時間が水深ピーク時以前に存在すること、あるいは水深ピーク前後で増水期よりも減水期の方が再付着点距離が長いことが理由として挙げられる。すなわち、再付着点距離がこの図に示す断面 ($x/h_s=3$) より遠ざかり、その分負の流速が増大するためと考えられる。この再付着点を境にして、さらに下流側の断面 ($x/h_s=4$) では、平均流速の変化は右よりの反時計回りのループを示している。一方、乱れの絶対値は異なるものの、再付着点の上流側や下流側で乱れ統計量の変化は同様な変化特性を示していることから、水深の上昇・降下といった非定常性の影響が、平均流速および乱れ特性量の増水期・減水期間の差を形成していると考えられる。

4. 結論

本研究では、流れの非定常性と河床形状の形成する

空間的非一様性が乱流統計量の分布特性や時間変化特性に与える影響について実験を行い、水面形、底面せん断応力、再付着点距離および基本的乱流統計量の分布特性に関して、従来のステップ流や河床波上の定常流で得られた実験結果と比較することによって考察を行った。

水面形の時間変化から、増水期における Re 数の増加に伴い、河床波クレスト直後に急激な減速効果が現れた。また、 Fr 数の小さなケースでは、下流側に存在する前方の河床波の影響によって、水面形状自身は相似で時間的に変化しないことが分かった。底面せん断応力に及ぼす非定常効果に関する考察では、ループ特性は普遍であるものの、水深変化に対する変化特性が空間的に大きく異なる傾向が現れ、河床形状による効果と水深の上昇・降下といった非定常性の影響、 Re 数の増加・減少の効果が絡まった現象が、特にクレスト直後の逆流域において存在した。この傾向は、水深変化に対する平均流速、乱れ特性量についても同様であった。この結果、底面せん断応力の増水期に対する減水期の比については、非定常パラメータ α に対して一意に決定されない結果が示された。また、摩擦速度によって内部変数表示された基本的乱流統計量の分布は、この逆流域付近において最も非定常性が現れ、それ以外の計測断面の分布はほぼ普遍性を示していた。

参考文献

- 1) Nezu, I. & Nakagawa, H. : *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR-Monograph, Balkema, Rotterdam, 1993.
- 2) 木下良作 : 航空写真による洪水流解析の現状と今後の課題, 土木学会論文集, 第345号, pp.1-19, 1984.
- 3) 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.
- 4) 林泰造, 大島正憲 : Kinematic Wave としての非定常性が水流の乱れ構造に及ぼす影響の研究, 第32回水理講演会論文集, pp.607-612, 1988.

- 5) Nezu, I., Kadota, A. & Nakagawa, H. : Experimental study on turbulent structures in unsteady open-channel flows, Proc. of Fundamentals Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation, ASCE, Buffalo, pp.185-194, 1994.
- 6) Song, T. : Velocity and turbulence distribution in non-uniform and unsteady open-channel flow, Doctoral Dissertation, No.1324, Laboratoire de recherches hydrauliques, École Polytechnique Fédérale, Lausanne, Switzerland, 1994.
- 7) 金子, Tu, 河原, 玉井 : Dune 上の非定常空気乱流に関する実験的研究, 水工学論文集第40巻, pp.749-754, 1996.
- 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) Nakagawa, H. & 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.
- 10) Ludwig, H. & Tillmann, W. : Investigations of the wall shearing stress in turbulent boundary layers, NACA 1285, 1950, : Translated from Ing. Arch., vol.17, pp.288-299, 1949.
- 11) Kadota, A. : Significant difference between turbulence characteristics of unsteady flows in open-channels and pipes, Proc. of XXV Congress of IAHR, Student Paper Session, pp.49-56, 1993.
- 12) Nezu, I. & Nakagawa, H. : Evaluation of shear stress in open-channel step flows, Fluvial Hydraulics, ed. by W. R. White, 22nd Congress of IAHR, Lausanne, pp.219-220, 1987.
- 13) Etheridge, D. W. & Kemp, P. H. : Measurements of turbulent flow downstream of a rearward-facing step, J. Fluid Mech., vol.86, pp.545-566, 1978.
- 14) Armory, B. F., Pereira, J. C. F. & Schonung, B. : Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow, J. Fluid Mech., vol.127, pp.473-496, 1983.
- 15) 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.

(1997.2.20 受付)

THE MEAN-FLOW STRUCTURES UNDER EFFECTS OF DUNE-BED SHAPE AND UNSTEADINESS

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

In open-channel flows, anisotropic turbulence is observed due to the existence of free surface. Open-channel flow has its own peculiar coherent structures and turbulence characteristics. In actual flooded rivers, the kolk-boil vortex is often observed on the water-surface and generated behind discontinuous boundary such as dunes and steps. It is important to examine the interaction between non-uniformities by unsteadiness effect and streamwise variation of bed shape. In the present study, the turbulent structures in unsteady open-channel flow over dunes were measured by means of fiber-optic LDA system. The mean-flow structures such as time variation of free-surface profile, bed shear stress and the turbulence statistics were discussed by comparing with backward-facing step flows. As the results, such mean properties can be explained by the effects of unsteadiness and spatial acceleration/deceleration which is caused by the shape of dune bed.