

河床波上の乱流構造と組織渦に関する研究

京都大学工学部 正 員 中川 博次
阪 急 電 鉄 正 員 〇松本 利典

京都大学工学部 正 員 欄津 家久
京都大学大学院 学生員 金澤 文彦

1. まえがき 再付着点を伴う剥離流である河床波上の流れは、河床波クレスト下流の高せん断層において形成される剥離渦と再付着点付近から浮上すると考えられるコルク・ボイル渦の2種類の組織渦を有することで特徴づけられ、その組織構造の解明が重要視されている。本研究は、2成分レーザー流速計を用いて高精度な計測を行い、河床波上の乱流構造を明らかにすると共に、条件付解析手法によってコルク・ボイル渦の発生機構を解明した。

2. 実験方法 長さ10m, 幅40cmの可変勾配型水路全長にわたり、移動床水路で観測される典型的波高勾配1/20の2次元河床波モデル(波高 $H_s=2\text{cm}$, 波長 $L=40\text{cm}$)を連続して設置した。計測区間は流れが十分に発達した上流から約7m下流の地点に設定された。まず、河床波上を一波長にわたって格子状に約300点計測した。さらに、組織渦の挙動を認識し、時空間相関構造を把握するために、レーザー流速計を河床波クレストあるいは再付着点付近に固定し、一方、移動プローブとして、ホットフィルム流速計を用いた2点同時計測を行った。表-1及び表-2に実験条件を示す。

3. 実験結果及び考察 図-1は、平均流速 U 及びレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ 分布の流下方向変化である。平均流速 U は河床波クレストからの剥離に伴って $y/H_s=1$ に高せん断層を形成し再付着点に向かって混合層型の分布が発達している。再付着点から下流に行くに従って内部境界層が発達する。段落ち流れ¹⁾と比較すると、河床波上の場合、河床波背面における流れの縮流効果によって一様分布に近くなる。また、剥離直前の初期断面の流速分布には、段落ち流と異なり流れのhistory効果が見られる。すなわち、連続した河床波上において上流側の河床波クレストから発達した混合層の挙動の影響が下流の河床波クレストでも残存している。レイノルズ応力は、再付着点に向かって急激に増加するが、その流下方向への低減も速い。図-2は、乱れ強度 u', v' の等値線図である。高せん断層に沿って高い値を示し、Kelvin-Helmholtzの不安定波から組織渦が発生する地点と考えられる $x/H_s=2.0$ 付近で最大となる。図-3は、逆流の時間割合を表す間欠係数である逆流率 I_r の等値線図を示す。LAは河床波下流の平坦床上、LBは河床波背面上であり、両者を比較すると河床波背面上では逆流の存在する領域が小さくなり、従って、再付着点距離も短くなることがわかる。これは、河床波背面ではその幾何的形状から剥離泡の体積が小さくなるが、その流下方向への伸縮の規模も小さいために下流側へ急速に逆流率が減少するためと思われる。図-4は、 $y/H_s=1.0$ の高せん断層に沿った測点での流速変動スペクトルの卓越周波数の流下方向変化を示す。 $x/H_s=3.0$ 付近で $f_p \cdot H_s / U_{max}$ は最大値となり、再付着点に向かってその値は小さくなっていく。そして再付着点付近で存在する最小値は再付着点下流でも見られる。これは、せん断層で形成された剥離渦が、合体することによって低周波側に移行しながらより大きなエネルギーをもち、成長した剥離渦は再付着点付近に降下する場合と下流へそのまま移流される場合が存在し、この選択性によって周波数がさらに半減したためと考えられる。この現象は、金沢ら²⁾の可視化実験でも認められた。次に、同時計測データから再付着点付近の固定レーザーにおける瞬間レイノルズ応力に検出基準を設けた条件付サンプリングの結果を示す。これは、 $|uv(t)| \geq H$ なるしきい値 H を導入し、かつ $u < 0, v > 0$ (コルク・ボイル渦は低速流体の浮上と考えられるから)の条件を満たす場合に検出し、 $|uv|$ が最大となる時刻を $\tau=0$ にとった流速変動のアンサンブル平均を求めたものである。なお、しきい値 H はスペクトル解析で得たコルク・ボイル渦の周期 T_b と一致するように与えた。図-5がこうして得た条件付平均 $\langle v \rangle / v'$ の等値線図である。 $\tau=0.0 \sim 0.4$ 秒にかけて、剥離流線に沿って

Hiroji NAKAGAWA, Iehisa NEZU, Toshinori MATSUMOTO & Fumihiko KANAZAWA

$\langle v \rangle < 0$ の流体塊（剥離渦）A が降下して河床に到達すると、その直上流側から $\langle v \rangle > 0$ の上昇渦（コルク・ボイル渦）となる流体塊 B が剥離渦 A の後方の回転に巻き上げられるようにして浮上している。 $\tau = 0.6$ 秒には A は減衰して B は水面に向かって移流されるが、その移流速度は周囲流体に比べてはるかに遅いことがわかった。

4. あとがき 条件付サンプリング手法によって、再付着点付近からの低速流体塊（コルク・ボイル渦）の浮上を確認し、その発生段階において再付着点に降下してきた剥離渦が寄与していると推測された。今後は、上昇渦の3次元性に着目した検討をしていきたい。

〈参考文献〉1. Nezu, I. & Nakagawa, H. (1989): Turbulent Shear Flows, Springer-Verlag, vol6, pp. 313-337. 2. 金沢、中川、禰津(1988): 土木学会年講, II-169, pp. 370-371.

表-1 実験条件表

CASE	h(cm)	U _{max} (cm/s)	Re($\times 10^3$)	Fr ₂	Q(l/s)
LA-1	6.0	27.4	9.2	0.20	3.68
LA-2	8.0	28.2	14.2	0.20	5.67
LA-3	10.0	28.8	18.8	0.20	7.82
LB-1	6.0	26.8	9.2	0.20	3.68
LB-2	8.0	27.6	14.2	0.20	5.67
LB-3	10.0	27.5	18.8	0.20	7.82

表-2 実験条件表

CASE	h(cm)	U _{max} (cm/s)	Q(l/s)	Re($\times 10^3$)	Fr ₂	レ-γ-流速計の測点
HL-1	6.0	27.5	5.67	14.2	0.20	河床直下
HL-2	8.0	29.2	5.67	14.2	0.20	再付着点
HL-3	8.0	30.9	11.34	28.4	0.40	再付着点

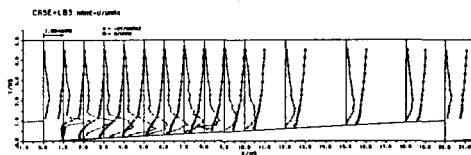


図-1 平均流速 U 及びレイノルズ応力 $-uv$ の分布

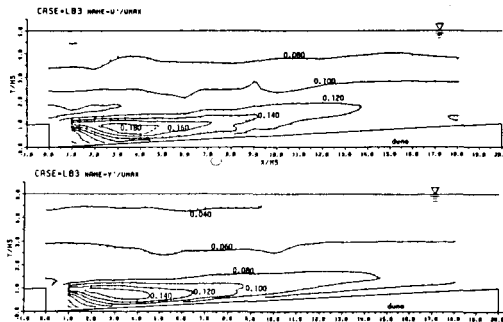


図-2 乱れ強度 u' 及び v' の等値線図

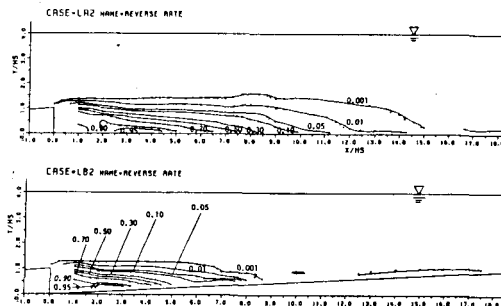


図-3 逆流率 I_r の等値線図

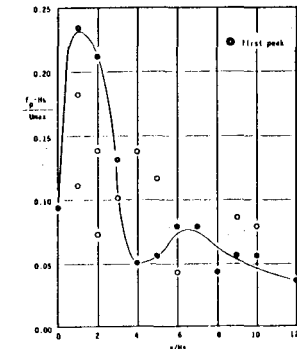


図-4 卓越周波数の流下方向変化 (LB-1)

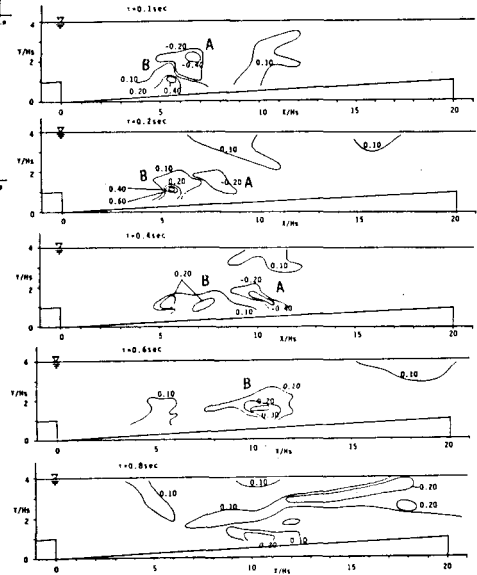


図-5 条件付平均 $\langle v \rangle / v'$ の等値線図 (HL-3)