

II-159 移動床上の三次元乱流構造と河床形状に関する研究

京都大学工学部 正員 中川 博次
 京都大学工学部 正員 禰津 家久
 京都大学大学院 学生員 〇光成 政和

1. まえがき 直線状河川には水深程度を直径とする並列した縦渦群が存在し、これが流れの三次元流速分布の主因であり、主流方向に剥離を伴わない水理条件では縦渦に対応した河床形状が形成されるであろうことが航測写真や可視化実験から推測されている¹⁾。しかし、縦渦の流速は主流速の2~3%であり、これを直接計測し、その実態や河床形状との関係を解明することは不可能であった。そこで、筆者らは、風洞を用い、縦筋河床を底面に模倣すると河川で観察されるような縦渦が安定して発生することを発見し、縦渦と縦筋との密接な関係を論じた²⁾。近年、レーザ流速計システムの高精度化が進み、二次流の実測が可能になってきた。禰津らは、滑面開水路の二次流をこのレーザ流速計で計測することに成功し、自由水面の存在で側壁近くの自由水面側に偏平な縦渦が発生することを見出したが、水路中央領域には安定した縦渦は存在しなかった³⁾。以上のこれまでの研究成果を総括すると、開水路の縦渦群の発生、維持には河床との密接な相互作用が必要であり、側壁二次流によって第一の縦筋が発生し、この縦筋によって次の縦渦が発生するといった相互作用が推測される⁴⁾。本研究は、流れの三次元構造と河床形状との相互作用を解明する手始めとして、平坦移動床で縦筋が形成されることを観測し、次にこの十分に発達した縦筋上での乱流構造をレーザ流速計で詳細に計測したものであり、縦筋と縦渦との関係を検討するものである。

2. 実験装置及び方法 実験水路は全長8m、幅30cmの勾配可変水路であり、上流端から1mまで固定床の遷移区間を設けて、それより下流をケイ砂4号（平均粒径0.7mm）で厚さ5cmの平坦な移動床とした。まず等流条件で、河床勾配及び流量を系統的に変化させ、縦筋の形成条件を研究した⁵⁾。これによると、移動限界を過ぎ、rippleなどの流れの剥離が卓越しない領域で縦筋が整然と発生した。この現象の再現性は良好であり、流れと河床形との相互作用系が存在すると示唆された。そこで、縦筋が発生した代表的な水理条件（水路勾配=1/570、流量=2.3 l/s、水深h=2.64cm）での流速分布を偏光2成分レーザ流速計で詳細に計測した。計測断面は上流端から5.2m下流であり水深方向(y軸)に9点、水路横断方向(z軸)に20点の計180測点を計測した。レーザ光の制約で自由水面近傍やz方向の流速成分Wは計測できなかった。計測中も河床には掃流砂はあるが、縦筋は安定しており、乱流の平均流構造はほとんど変化しないと考えられるから連続式を使って $W = -\int_0^z \partial_y^2 v \, dz$ を計算し、水路横断面内の二次流成分 (V, W) が解析された。水路下流端には格子状の堆砂装置があり、縦筋形状は超音波測深器を用いて x-z面内を連続計測された。

3. 移動床上の縦渦構造 図1は、二次流成分 (V, W) のベクトル図で、移動床上で得られる結果である。比較のため図2に滑面固定床で得られた (V, W) の分布を示した³⁾。二次流速の最大値は、固定床、移動床ともに最大流速 U_{max} の約3%であり、縦筋を人工模倣した流れのそれとも一致する。乱れの非一様性に起因するこれらの Prandtlの第二種の二次流の最大値には境界条件によらない限界値があると考えられる。しかし、固定床と移動床の縦渦パターンにはかなりの相違が見られる。固定床の場合は、側壁隅角部に向う二次流が卓越し、また自由水面によって乱れの非一様性が促進されるため偏平な縦渦が発生するが、水路中央部には縦渦は見られない。一方、移動床上では隅角部に向う二次流は弱い、縦渦群が水路全断面に見られる。隅角部への二次流が弱いのは、隅角部で流砂がなく、河床が山形になるためである。図3は鉛直成分Vのコンタ図である。z/h=0.5, 2.0, 3.5, 5.0付近に上昇流が存在する。この間隔は1.5から2程度であり、後述するように上昇部は縦筋の峰の部分に相当することがわかった。図4は、乱れ強度 u' を平均摩擦速度 U_* で無次元化して示した横断分布であり、 v' に関しても同様な結果が得られた。上昇流部で乱れ強度が増加し下降流部で減少する特性がよく見られる。浮遊砂があればこの強い乱れのため間欠的に土砂の

巻き上げが起り、高濃度のボイルが観測されるのであろう。

4. 河床の縦筋形状と流れとの関連性 図5は、河床形状高を (x, z) 平面上で示した。河床高低差は最大でも 2mm 程度であるが、横断方向にかなり規則的に配置され、また縦筋は下流にかなり持続して形成されることがわかる。図6は、流速計測断面 $(x/h=0)$ を挟む位置で河床変動高の自己相関を計算したものであり、横断方向の周期特性が理解される。この波長 λ は $\lambda \approx 5\text{cm}$ すなわち $\lambda/h=1.9$ であり、実河川で観測された結果⁶⁾ とよく一致し、また図3の流速分布とよく対応する。図7は、流砂量と摩擦速度 $U*$ 、及び y 軸の原点補正量 Δy を示すものである。 $U*$ 、及び Δy は、平均流速 U が対数則に合致するように最小二乗法で求めた。 $z/h=1$ 及び3付近で下降流が卓越し、摩擦速度は大きく、河床が洗掘され凹部となり、逆に $z/h=2$ などの上昇流の卓越する位置では摩擦速度は小さくなり、河床は凸となることがわかる。補正量 Δy は凹部ほど大きく、実際の河床高の計算結果とよく一致している。流砂量は下流端で採砂したから、これが河床形状や $U*$ に鋭敏に対応しているとは即断できないが、流砂量の横断方向変化は縦筋や流れの三次元性に起因するものと考えられる。

5. あとがき 流れの影響が生じない移動床にはかなり整然とした縦筋が形成され、これに対応して縦渦が生じ、流れは三次元となる。今後、混合砂で実験を行ない、縦渦による、ふるい分け現象(粗、滑ストライプ現象)を解明したい。

参考文献 1) 木下 良作 (1984) 土木学会論文集 pp.1-19
 2) Nezu, Nakagawa (1984), ASCE, J. Hydr. Eng Vol. 110
 3) 禰津, 中川 (1985) 水理講演会論文集 pp.769-774
 4) Nezuら(1985) Turbu. Shear. Flow 4 pp.240-280
 5) 中川ら(1988), 土木学会関西支部, II-21
 6) Culbertson (1967) USGS, D214-D218

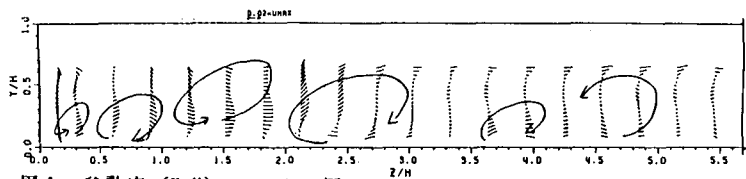


図1 移動床 (V, W) ベクトル図

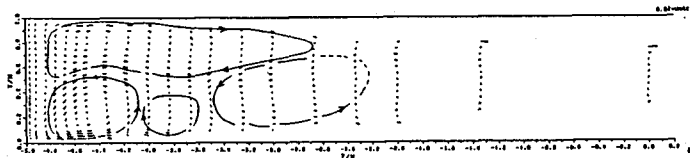


図2 滑面固定床 (V, W) ベクトル図

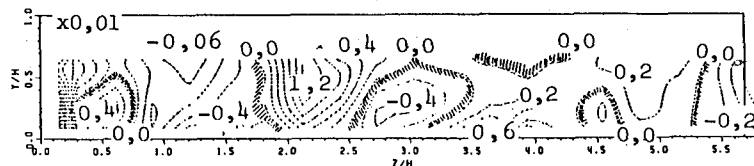


図3 V-コンタ図 (等値線表示)

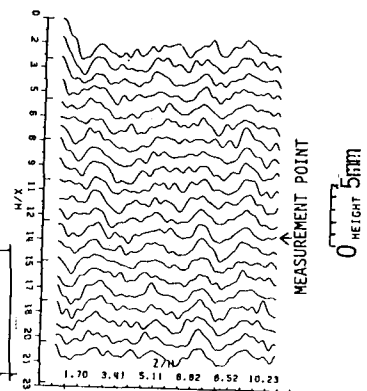


図5 河床形状

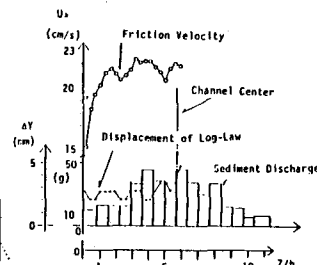


図7 流砂量、摩擦速度 $U*$ 及び原点補正量 Δy

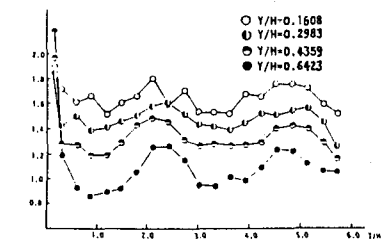


図4 乱れ強度無次元化表示横断分布図

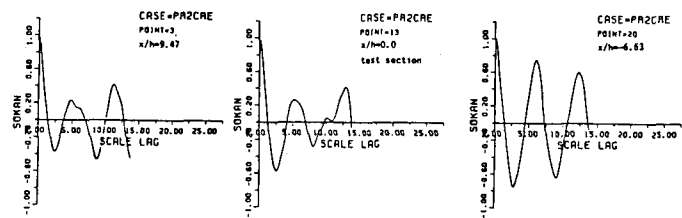


図6 横断方向自己相関