

第II部門 河床波上の乱流生成に関する実験的研究

京都大学
京都大学
京都大学
京都大学

学生員
正会員
学生員
正会員

○奥山裕真
山上路生
前口和哉
岡本隆明

1. はじめに

河川乱流の多様な組織構造について理解することは、河川の水域環境にかかわる諸問題の解決のために重要である。そこで本研究では、開水路の河床波上で生じる乱流に注目する。河床波は、河床に存在する砂礫が水の流れによって輸送されることで形成される地形で、河川において局所的な流速変動をもたらす。乱流構造にも大きな影響を及ぼす。河床波については、これまで発達過程などの形状特性や河床波前面に見られる剥離渦などについては様々な研究¹⁾がされてきたが、河床波上の乱流の変調特性については詳細には議論されていない。この特性は、形状特性と相互に影響しあうため、そのメカニズムを詳しく把握することが重要である。そこで本研究では基礎知見を得るべく、河床波流れにおける乱流構造に着目し、河床波模型を用いて実験と考察を行った。

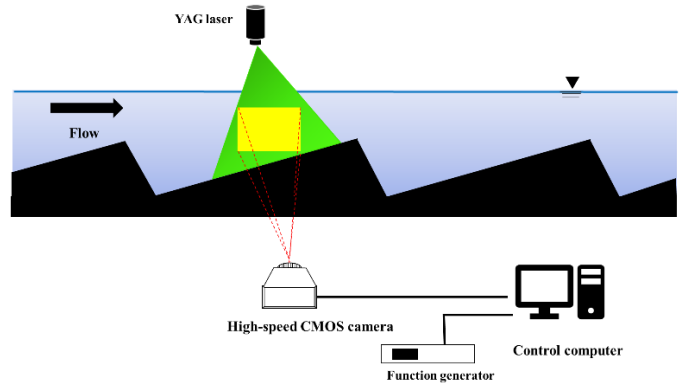


図-1 PIV 実験模式図

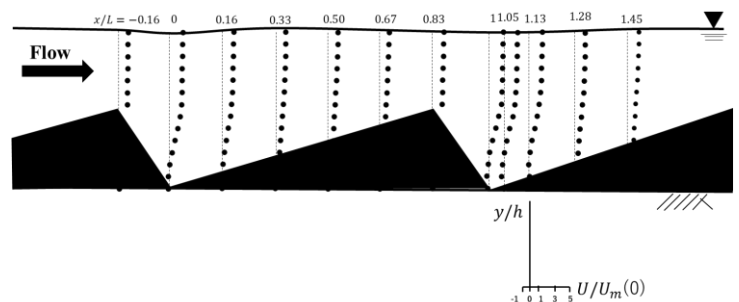


図-2 流速の流下方向分布

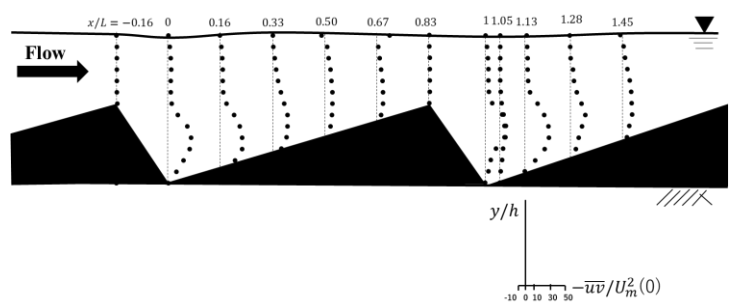


図-3 レイノルズ応力の流下方向分布

2. 実験手法および水理条件

実験には京都大学桂キャンパスの乱流水理実験室に設置されたマルチフェイズ循環式水槽を用いた。水路部の幅は40cm、長さは16mである。

河床波上の乱流構造を調べるために、河床波模型を敷いた流れ場における計測を行った。長辺長さ28.5cm、短辺長さ2.5cm、幅 $B=40$ cm、厚さ1mmの鉄板を、7枚使用し、路床に設置した。流下方向長さは30cm、高さは2cmで、計測対象模型は上流から4番目の模型とした。

座標系は流下方向が x 軸、鉛直方向に y 軸を設定した。 x 軸の原点は河床波模型上流端、すなわち加速区間の始点とした。 y 軸の原点は路床面を原点とし、路床上向きを正とする座標をとった。 U 、 V はそれぞれ x 、 y 方向の時間平均流速を u 、 v は瞬間流速の時間平均からの偏差を表している。

水理条件については、流量は1.6l/sまたは3.2l/sで、平坦部の水深 h は4cmである。平坦部の断面平均流速 U_m は10cm/sおよび20cm/sの2通りを設定した。流れの発達特性を調べるために計測地点を上流から変化させた。計測地点を流下方向に $x/L = -0.16, 0, 0.16, 0.33, 0.5, 0.67, 0.83, 1.0, 1.05, 1.13, 1.27, 1.45$ の12通りに変化させた。

本研究では流れ場の特性を調べるためにPIV (Particle Image Velocimetry) による流速計測を実施する。PIVでは、粒子によって可視化された流れ場

のイメージから、2成分あるいは3成分の速度とベクトルを同時に計測するシステムのことである。

装置の模式図を図-1に示す。フレームレートは500Hzとし、サンプリングレートはパルスジェネレータを用いて30Hzとした。撮影領域のサイズは路床から水面まですべて写せるよう約8cm×8cm、相関窓サイズは2ケースともに約3mm×3mmとした。トレーサーは比重1.02、径100 μ mのポリスチレンパウダーを用いた。

3. 結果と考察

図-2はPIV 計測によって得られた平坦部の平均流速20cm/sにおける時間平均流速 $U(y)$ の流下方向分布である。河床波模型入口($x/L = 0$)の断面平均流速で無次元化した。勾配変化領域で加速された流れが水面付近を通り、河床波模型背後では流速が負になる部分が確認された。

図-3はPIV 計測によって得られた平坦部の平均流速20cm/sにおけるレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の流下方向分布である。剥離せん断層でレイノルズ応力が大きくなっており、剥離した流れが再付着するにしたがって、その変化が抑えられていく。

図-4は、水面流速で無次元化した主流方向乱れ強度 u'/U_s の流下方向分布である。2つの流速で比較した。20cm/sの方が全体的に大きい値をとるが、両ケースとも似た挙動で周期的に変化する。勾配変化領域で u'/U_s が大きくなり、河床波模型の境界付近で小さくなる。これは乱れ強度と平均流速の間の空間的ずれが原因だと考えられる。

加速領域における乱れエネルギーの生成特性に注目して河床波流れの乱流変調について考察する。乱れエネルギーの輸送方程式における生成項を2次元表記すると次式となる。

$$G = -\overline{uu} \frac{\partial U}{\partial x} - \overline{uv} \frac{\partial U}{\partial y} \quad (1)$$

等流では第1項がゼロとなり、第2項のみを考えるが、加速減速流では、主流速の流下勾配が無視できないため、第1項も考慮する必要がある。以後、式(1)の第1項および第2項をそれぞれ G_{uu} 、 G_{uv} とする。式中の偏微分は境界近傍では片側差分をそれ以外の領域では中心差分を用いて離散データより計算した。

図-5は流速20cm/sケースの $x/L = 0.5$ における G_{uu} 、 G_{uv} の水深方向プロファイルである。 U の加速に伴い、 G_{uu} の負値が底面近傍を除いて表れ、乱れの生成が抑制される。これらの領域では全水領域で $\partial U/\partial y$ は正であるが、 G_{uv} は非常に小さい。これは負のエネルギー生成のため $-\overline{uv}$ が減少したためと考えられる。その結果、トータル G は負となりエネルギーが平均流に戻される。

以上の結果より、図-6に示す現象モデルを提案する。勾配変化領域の河床波模型背後では、剥離せん断層により乱れが生成され、渦が生じる。やがて流下するにしたがって、2つの層が混合し、加速によって、乱れが抑制される。

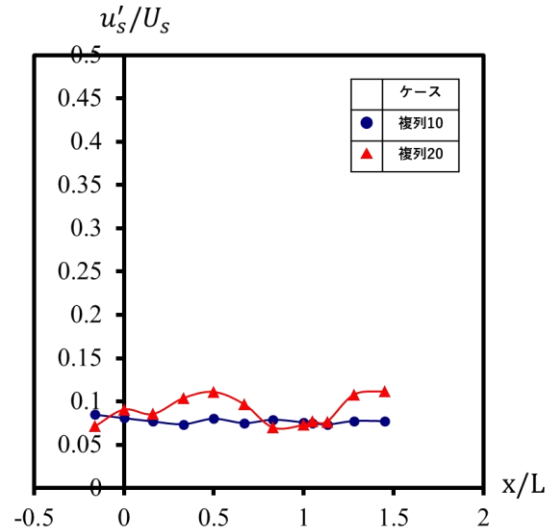


図-4 水面乱れ強度比較

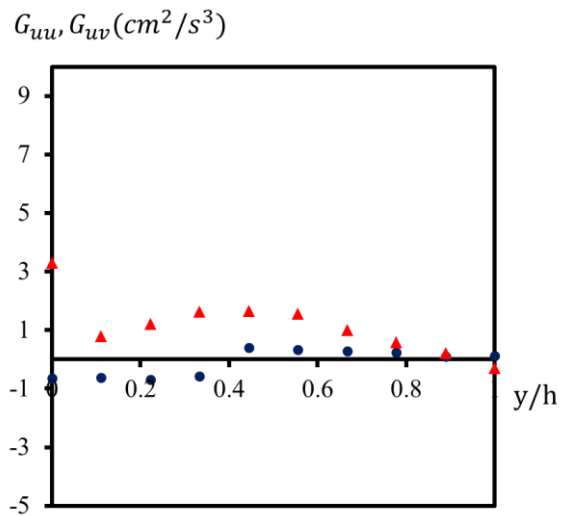


図-5 流速20cm/s, $x/L=0.5$ における乱流生成項

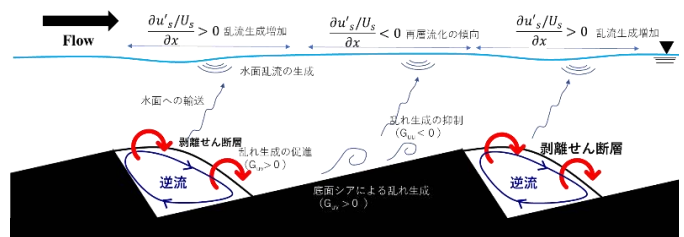


図-6 現象モデル

4. おわりに

本研究では、河床波上の流れを対象として鉛直面のPIV計測を行った。その結果をもとに河床波上の流れの乱流構造について考察を行い、流れ特性を明らかにした。そして現象モデルを提案した。

参考文献

- 例えば、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