

複断面蛇行開水路流れの構造と低水路の河床形態に関する研究 (3)

石垣泰輔・武藤裕則・Koji SHIONO*・澤井健二**

*ラフバラ大学土木建設工学科

**摂南大学工学部

要 旨

流れが高水敷に及ぶ洪水時の流れを対象に、低水路を移動床とした複断面蛇行水路において、2次流構造とそこに形成される河床形状との関係を、流れの可視化結果および速度計測結果を用いて検討している。対象とした流れは、直線水路内に設置した低水路の蛇行度 SI (=蛇行長/蛇行波長) が 1.11 と 1.38 の2種類の複断面流れであり、本報告では、高水敷粗度の影響について検討した。その結果、高水敷上に一様粗度を設置した場合は、同様の河床形状が滑面高水敷の場合より大きな相対水深で観察される、帯状粗度を流れの構造を考慮して配置した場合は粗度の影響で河床形状に局所的な違いが見られる、などの知見が得られた。

キーワード：複断面蛇行流れ、2次流、河床形態、流れの可視化、高水敷粗度

1. はじめに

複断面蛇行流れは複雑であり、その構造に影響を及ぼす要素は、河道、低水路および高水敷に関するもので多種多様である。河道に関する要素は、蛇行度で表される平面形状、水路幅・水深比や法面勾配で規定される断面形状であり、低水路では、平面形状に関する蛇行度と堤防法線との位相差、断面形状および河床形状である。さらに、高水敷の形態に関連し、その平面形状と断面形状、そして粗度高や粗度配置といった粗度の条件も流れに影響を与える。著者らは、低水路が緩やかに蛇行する複断面蛇行流れについて実験的検討を行って来た(石垣・武藤, 1998; 石垣ら, 1999; 石垣・武藤, 2000a)。これらの一連の研究では、河道および低水路の平面形状を一定(直線水路内に蛇行度 1.11 の低水路を設置)とし、流れの構造およびそれが低水路河床形状に与える影響についての知見が得られているが、高水敷の粗度に関する検討が残されていた。

ここに挙げた要素の選び方は研究者により異なるが、本研究で対象としている直線水路内に蛇行低水路(固定床)を設置した場合の流れに関する研究で得られて

いる知見をまとめると以下のとおりである。流れの構造に関する研究では、相対水深 (D_r =高水敷水深/低水路水深)により構造が変化すること、流れの構造に支配的な現象が2次流であること、などが固定床水路における実験結果より指摘され、その構造図が示されている(石垣ら, 1999; Willetts and Hardwick, 1993; Ervine et al, 1993; 福岡ら, 1997)。多少の違いはあるものの、共通している知見はつぎの3点である。すなわち、1)低水路が蛇行する複断面開水路流れには、遠心力が成因の2次流と、高水敷上の流れと低水路内の流れの鉛直シアアが成因の2次流が存在する、2)低水路蛇行頂部(apex)付近で発生したらせん流が高水敷上から低水路に向かう流れに加速されながら発達し、その後下流側の高水敷へ乗り上げる、3)これらの構造が水路の幾何形状や粗度分布に大きく影響される(福岡ら, 1997)。

一方、低水路を移動床とした研究では、福岡ら(1999)によって、 $D_r=0.30$ 以下では蛇行頂部の外岸側が洗掘される単断面的蛇行流れ、それより大きな水深では内岸側が洗掘される複断面的蛇行流れになることが指摘され、実際の河川での調査結果と実験結果が対応する

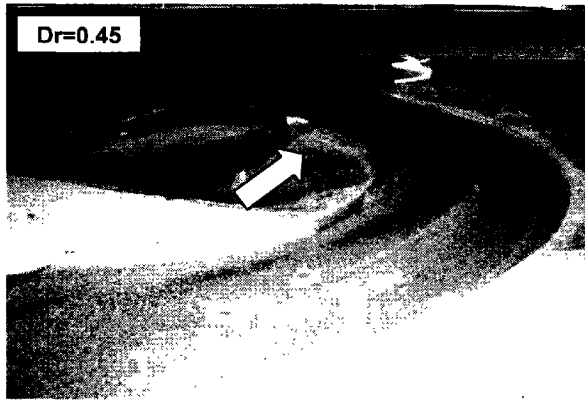


Photo.1 Bed form in the case of smooth flood plain.
($Q=30.78$ l/s, $U_m=32.5$ cm/s, $h_f=3.28$ cm)

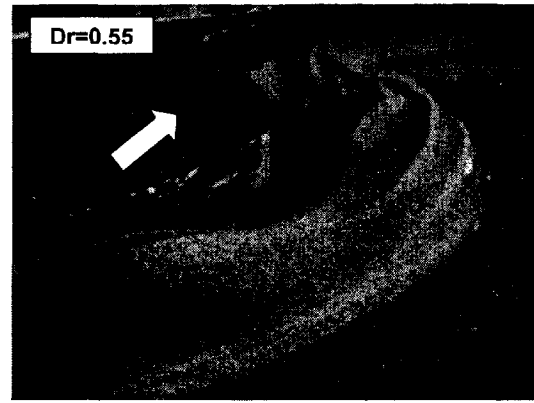


Photo.2 Bed form in the case of rough flood plain.
($Q=35.33$ l/s, $U_m=26.3$ cm/s, $h_f=4.94$ cm)

ことが示されている。また、著者ら(石垣・武藤, 2000b; Ishigaki et al., 2000c) は 2 次流構造と河床形状との関係について検討し、2 次流が堆積域と洗掘域を形成し、その形成された堆積域を越える流れが新たな 2 次流を形成することなどを指摘している。しかしながら、高水敷に粗度を設置した研究は少なく、本研究のように流れの構造を考慮した粗度配置を用いたものはあまり見られない。

本報告では、研究所内の水路を用いて行った低水路の蛇行度が小さな複断面蛇行流れに関する実験結果と、英国のラフバラ大学の水路を用いた低水路の蛇行度が大きな複断面蛇行流れに関する実験結果を用い、高水敷上の粗度が、流れの構造に支配的な 2 次流構造および河床形状に及ぼす影響について検討する。なお、著者ら(石垣・武藤, 2000b) は、相対水深 $Dr=0.50$ の流れを対象に、低水路が固定床の場合、低水路が移動床の場合、および低水路が移動床で高水敷上に粗度を設置した場合の境界条件のみを変化させた 3 種の実験結果を用いて行った河床形状と高水敷粗度が流れの構造に及ぼす影響の検討を行っており、本報告では、この結果を含めてとりまとめている。

2. 高水敷上に一樣粗度を設置した水路での検討： 蛇行度=1.38

ここでは、英国のラフバラ大学で行った実験結果に基づき、低水路の蛇行度が大きな水路において、高水敷上に一樣粗度を設置した場合の河床形状に与える粗度の影響について検討する。

2.1 実験方法

実験は、幅 2.4m、長さ 13m、深さ 0.5m の直線水路内に、 120° の円弧部と 0.75m の直線部からなる蛇行する低水路を設置した複断面蛇行水路で行った (Ishigaki

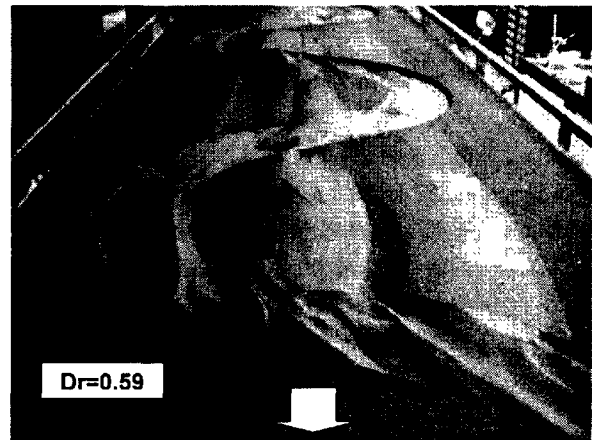


Photo.3 Bed form in the case of rough flood plain.
($Q=45.56$ l/s, $U_m=29.8$ cm/s, $h_f=5.69$ cm)

et al., 2000c). 高水敷はポリスチレン製の滑面であるが、全面に人工芝(高さ 8mm)を貼り付けて粗面としている。低水路は、河床に平均粒径 0.85mm の一様砂を敷設した移動床である。なお、砂層の厚みは、初期の高水敷高さが 4cm になるようにしており、水路幅水深比 b/h は 10 である。サンドポンプを用いて下流端で採取した砂を上流端に供給するシステムを用い、初期状態から 60 時間通水した後、河床形状を撮影した。

2.2 河床形状に関する検討

Photo.1 および Photo.2 は、蛇行頂部付近(以下、apex と呼ぶ)の通水停止後における低水路河床形状を上流側から撮影したものである。Photo.1 は高水敷が滑面の場合、Photo.2 は粗面の場合であり、流れ方向に連なる堆積域と洗掘域が交互に形成されるケースの結果を示している。写真より、異なる相対水深で同様の河床形状となることが知れる。これは、高水敷上の粗度による影響で水位が上がることで、低水路内の流速が同程度となるのは相対水深が滑面の場合よりも大きなケ

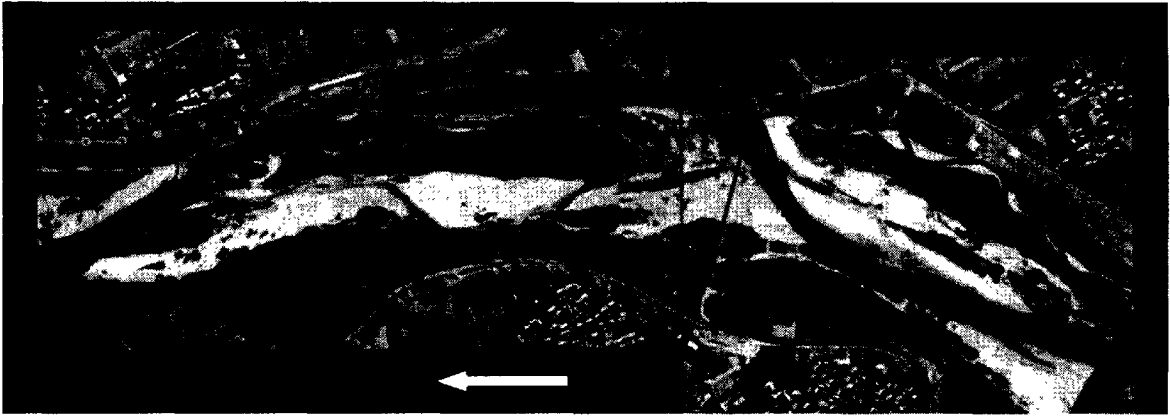


Photo. 4 Kizu river (4.7km – 6.5 km, Dec. 1984)

一スとなるためである。流れの構造から考えると、相対水深が同じ場合には粗面高水敷上のながれの速度が小さくなるために低水路内の2次流の流速が小さくなり、同様の河床形状が形成されない、という説明ができる。Photo.3は、さらに相対水深が大きな $Dr=0.59$ における通水停止後の状況を示している。写真より、低水路内から高水敷上へ乗り上げた砂の堆積域が流下方向に連なり、高水敷上を掃流された後、下流側の低水路内に堆積するという掃流過程が見られる。なお、低水路内に堆積した砂は、2次流により再度、洗掘・掃流され、下流側の高水敷上へ運ばれるという過程が観測された。

この掃流過程は、水路上流端から始まり、下流側へと伝播してゆくが、高水敷上では、砂が堆積・掃流される領域と砂が全く存在しない領域が横断方向に交互に形成された。この結果は、2次流により形成される複列のらせん流が堆積域と洗掘域を形成し、下流側の高水敷上へ乗り上げて行く、という流れの構造で説明できる。また、この結果は、高水敷におよぶ洪水時の流れにより、高水敷上の植生が掃流される領域と、掃流されずに残る領域が存在することを示唆している。

Photo. 4は、1級河川木津川の4.7km～6.5kmの航空写真である（国土交通省近畿地方整備局京都国道工事事務所提供、昭和59年12月）。写真を見ると、Photo.3と同様に、高水敷上に堆積領域が流下方向に連なり、その両側に植生が繁茂する領域が流下方向に続いていることが分かる。これは一例であるが、高水敷上の粗度について検討する場合には、流下方向に連なった粗度を考慮する必要があることを示している。次章では、この点を考慮し、帯状粗度を配置した場合の実験結果について検討する。

3. 高水敷上に帯状粗度を配置した水路での検討： 蛇行度=1.11

ここでは、帯状粗度を高水敷に設置した場合について、粗度の存在が水面流況、河床形状および2次流構造に与える影響について、低水路の蛇行度が小さな水路における実験結果を用いて検討する。

3.1 実験方法

実験に用いた水路は、Table 1に示すように、幅1m、長さ16m、勾配1/970の直線水路内に、幅30cmで蛇行度（=蛇行長/蛇行波長）1.11の低水路を有する複断面蛇行水路である。流れの構造は、水理条件、水路の幾何形状、および河床と粗度の条件に影響されることから、本研究では、水理条件および水路の幾何形状を同一とし、河床と粗度の条件のみを変化させ、それらが流れの構造に与える影響を検討することとした。用いた条件は、低水路および高水敷が固定床滑面のケースF、低水路が移動床で高水敷が固定床滑面のケースM、および低水路が移動床で高水敷に帯状粗度を設置したケースRである。

移動床水路で用いた河床材料は、粒径2.4mm、比重1.7のスラジライトである。これは、掃流力分布を検討するため、対象とする水理条件の掃流力と粒子の限界掃流力がほぼ同程度となる材料として選定したものである。これにより、掃流力が大きな領域を可視化することが可能となるとともに、実験時間が節約された。なお粒径は、砂堆などの小規模河床形態が発生しないことを考慮して選定した（石垣ら、1999；石垣・武藤、2000a）。

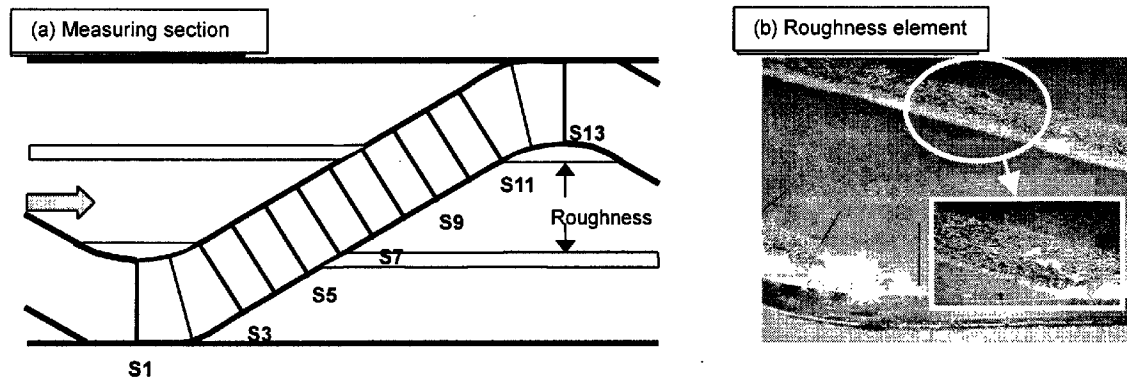
ケースRで用いた粗度要素は、Table 1の付図(b)に示した厚み2cmのステラシートを幅5cmの短冊型にしたものであり、1mの水路幅を3等分するように水路の両側壁より30～35cmの位置に帯状の透過性粗度として配置した。このように高水敷に非一様に透過性粗度を配置した理由は、実際の河川で高木等の高粗度域が流下方向に連なっていて帯状に存在する例があること

Table 1 Hydraulic condition and channel geometry

Case	Main channel	Flood plain	Channel	Hydraulic conditions
Case F (Fixed bed)	Fixed	Smooth	Width: B=1m Length: 16m	Relative depth : $Dr=0.50$ Depth(main channel): $H=10\text{cm}$
Case M (Movable bed)	Movable	Smooth	Bed slope: $l=1/970$ Width of main channel: $b=30\text{cm}$	Depth (flood plain): $hf=H-h=5\text{cm}$ Discharge: $Q=21.24\text{ l/s}$
Case R (Movable bed & Roughness)	Movable	Rough (partial)	Height of flood plain: $h=5\text{cm}$ Sinuosity of main channel : $s=1.11(s=l/\lambda, \text{Length: } l=3.41\text{m}, \text{Wave length: } \lambda=3.07\text{m})$	Mean velocity: $V=33\text{cm/s}$ Froude number: $Fr=0.45$ Reynolds number: $Re=17700$

Bed material in Case M and Case R : $d_m=2.4\text{mm}$, specific gravity=1.7

Roughness element in Case R : width=5cm, height=2cm



(Photo.4), また前著 (石垣・武藤, 2000a) で複断面蛇行流れにおいて流れが3等分され高速域と低速域が交互に存在することを指摘したが, この低速域の出現位置と粗度帯位置との相関が高いことである。なおこの帯状粗度は対象とする水理条件では完全に水没する。

実験は, アルミ粉末を塗布したおが屑を用いた水面流況の可視化, 河床形状計測, 防水型ビデオカメラを用いた横断面流況の可視化 (石垣ら, 1999) である。水面流況の可視化では水路上方よりビデオ撮影し, 1/30 秒間隔で得られた2枚の画像に PIV 法を適用し, 可視化結果を定性的に説明する補助として速度分布の瞬間値を得た。PIV 法に用いたソフトは, 市販のソフト (VISIFLOW) であり, 2フレームの画像を相互相関解析して速度ベクトルを計算している。掃流力分布の可視化は固定床水路を対象に, 河床形状計測は移動床水路を対象に行い, 後者では超音波河床計を用いた。横断面流況の可視化では, Table 1 の付図(a)に示した計測断面を対象に, 1500W のハロゲンライトを用いて蛇行軸に沿った約 20cm 幅を照明した領域の流況を, 下流側約 40cm の水中に設置したカメラ (カメラヘッドのみ: $W50\text{mm} \times H65.5\text{mm} \times L103\text{mm}$) で撮影した。なお, トレーサには, 粒径 0.45mm, 比重 1.05 のポリス

チレン粒子を用いた。また, 横断面可視化結果についても2次流セルが観察される領域の可視化結果を定性的に説明する補助として PIV 法を適用して2次流ベクトルの瞬間値を計算した。

ここでは, 全ケースについて相対水深 $Dr=0.50$ の流れを対象とした。また, 水路下流端で堰上げ状態で実験を実施し, 対象としている区間で水深が一樣になるように設定している。

3.2 水面流況および速度分布

Fig.1 は, 水面流況の可視化結果および PIV 法により得られた水面における速度ベクトル分布であり, 流れは左から右である。なお, 移動床の場合, 河床変化がほぼ定常となる通水後 15 ないし 20 分の時点で可視化を行った。水面に撒いたトレーサは高速部に集中するため, 高速域の位置が知れるとともに, 3次元構造を考慮することで流体が下降する位置, すなわち, 2次流セルの下降部が分かる。このような観点より Fig.1 を見ると, 固定床水路のケース F では, 楕円で囲んだ部分に見られるように, 上流側の蛇行頂部 (以後 apex と呼ぶ) から下流側の apex にかけてトレーサが集中し, 高水敷に乗り上げていることが分かる。これに比して,

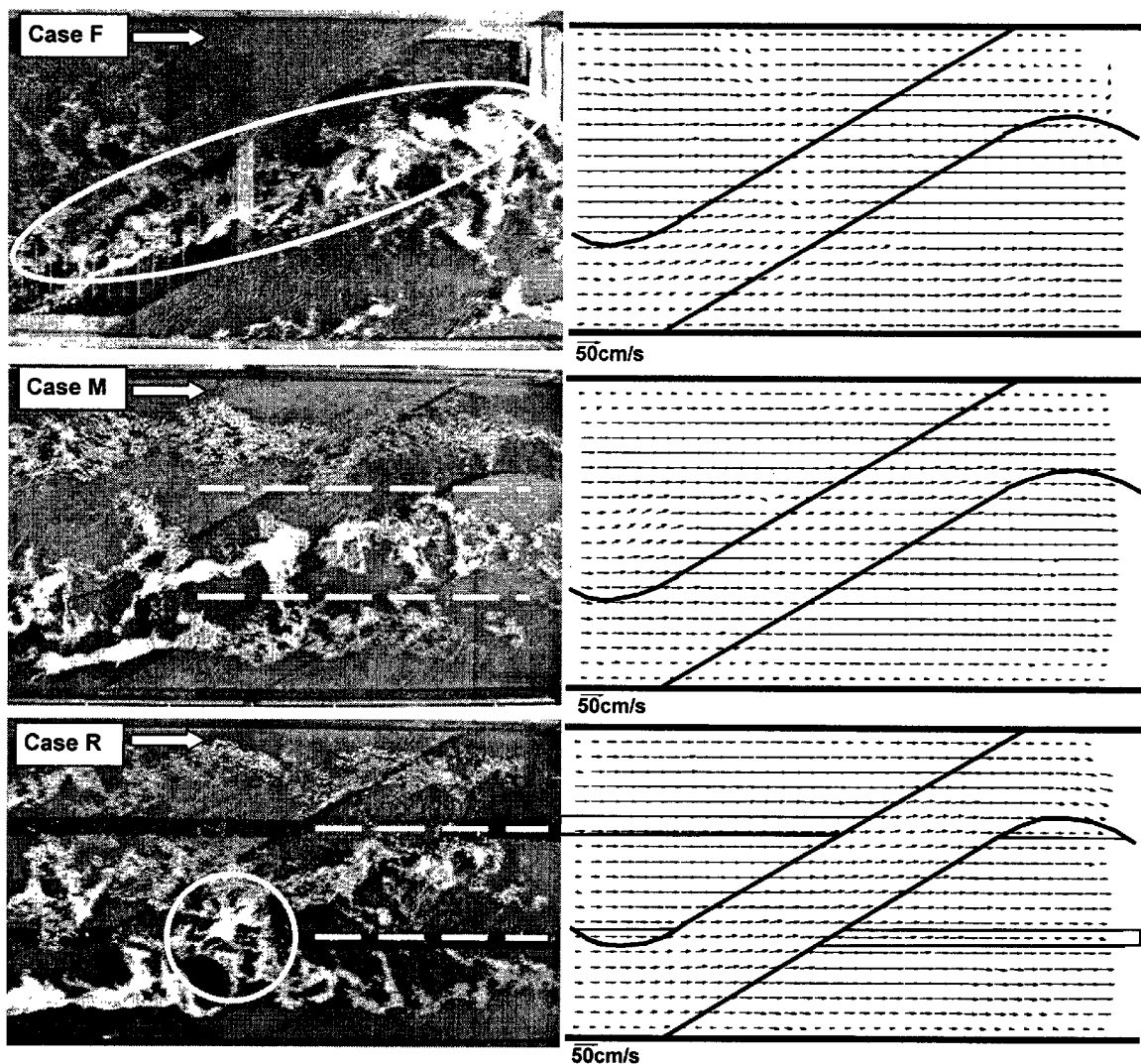


Fig. 1 Flow patterns on the water surface and velocity vectors obtained by PIV method.

移動床水路のケースMでは、破線による補助線で示すように流下方向に連なる3列のトレーサ集中領域が存在し、流れの構造が変化していることが分かる。また、移動床で粗度を配置したケースRでは、3列の集中領域と（破線による補助線）、帯状粗度の上流端付近での集中（円で囲んだ部分）が見られる。このことは、帯状粗度は、流れ全体には大きな影響を及ぼさないものの、粗度周辺に局所的な影響を及ぼしていることを示している。速度分布からは、いずれのケースでも、高水敷上では流下方向の流れが卓越するのに対し、低水路部分では低水路内を蛇行に沿って流下する流れの影響を受け速度ベクトルの方向が変化していることが読みとれる。以上の結果から、河床形状により流れの構造が変化すること、および、低速域に存在する帯状粗度により流れの構造がより明瞭に分離されて高速域に流れが集中することなどの点を指摘することができる。

3.3 河床形状に関する検討

河床形状と流れの構造は相互に影響を及ぼすことが分かっており、帯状粗度が流れの構造を変化させ、その結果、河床形状に影響する。以下では、この点に着目した検討を行うこととする。

帯状粗度を設置した場合の河床形状計測結果を設置しない場合と比較して示したものがFig.2である。なお、ここに示した河床形状は、一定流量で通水を開始し、5分から10分毎に河床横断形状の計測を続け、形状の時間変化が小さくなった時点で通水を停止した後計測した結果である。また、流れが高水敷に及ばないBankfullのケースは粗度の影響がないため、粗度なしの結果を示している。水位が粗度天端より低い $Dr=0.15$ の結果を比較すると、①粗度ありの場合の洗掘深が大きい、②apexに設置した粗度の下流側に堆積域が形成される、といった違いが見られる。これは、低水路内

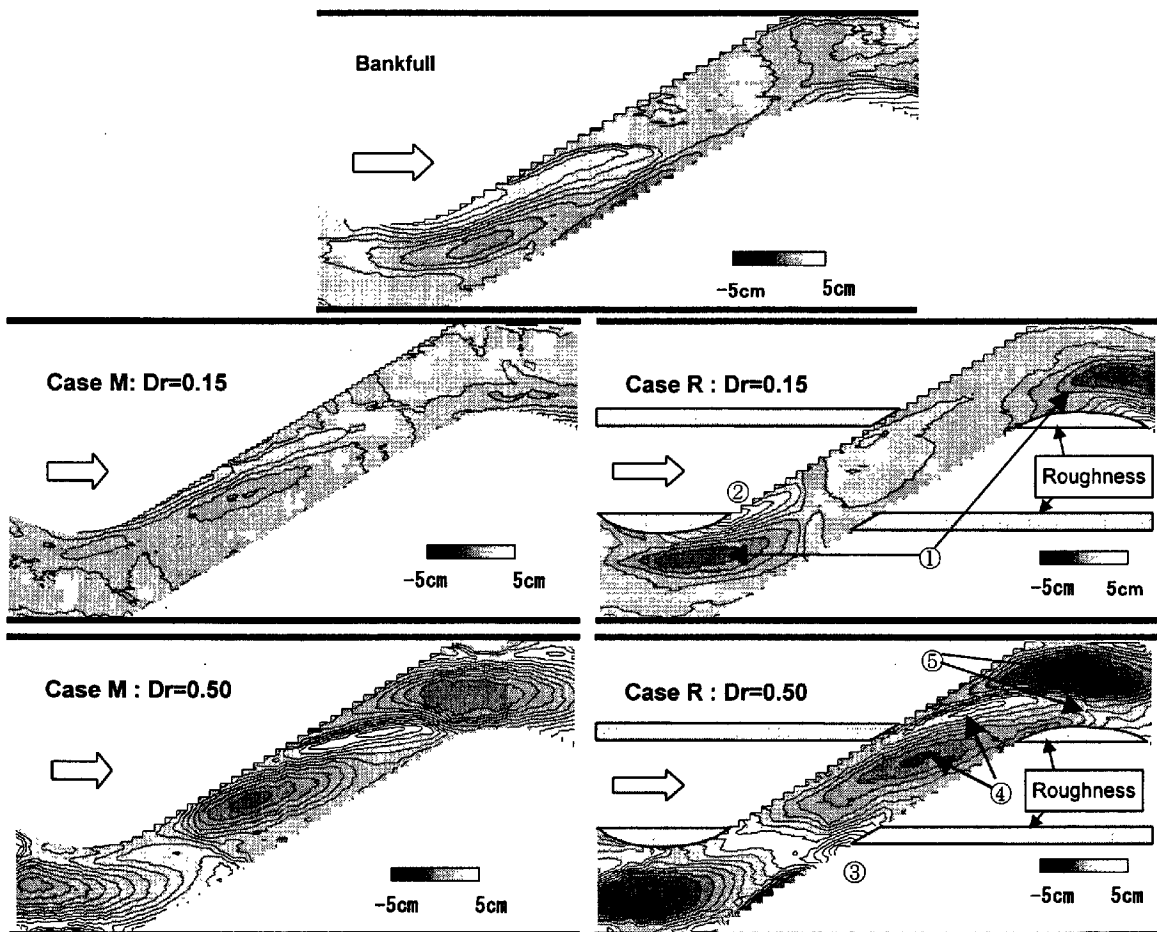


Fig. 2 Bed form

の流速が増加したことを示しており、高水敷上の流速が粗度の影響を受けた小さくなったことを意味している。

$Dr=0.50$ の結果を、それぞれ、比較して見ると、洗掘域および堆積域の形成は同様であるが、いくつかの相違点がみられる。すなわち、带状粗度がある場合、③右岸側高水敷上の粗度帯上流端では、その上流側の低水路右岸の洗掘域から供給された河床材料が停止して堆積する、④crossover部の低水路左岸側から発達する洗掘域と堆積域が下流側にシフトする、⑤その結果、apex付近ではテラス状の堆積域が形成され、洗掘域は湾曲外岸部へと移動する（各説明文の番号は図中の○付番号で示した位置を参照している）。これらの現象は、带状粗度周辺およびその上・下流側の速度が低減して掃流力が小さくなるために起こるものと考えられる。

3.4 2次流構造に関する検討

複断面蛇行流れでは、2次流が流れの構造を特徴づける支配的な現象である。以下では2次流が最も発達する低水路直線部（以下、crossover部と呼ぶ）と apex

付近で行った横断面可視化と PIV 法によって得られる2次流ベクトルの計算結果を用い、2次流セルの特性について検討する。ただし、3次元構造を有する2次流をビデオ撮影によって得られる2次元画像から計算した速度ベクトルを用いて検討することには定量的な問題が残る。しかしながら、動画で観察される2次流の挙動と矛盾しない程度の限られた領域を選択することにより、2次流セルの回転方向、大きさなどの定性的な検討が可能であると判断し、PIV法による2次流ベクトル計算結果を用いて検討を行うこととした。

Fig.3は、crossover部における横断面可視化結果とPIV法による2次流ベクトル計算結果（可視化画像の白枠内を対象）である。前述したように可視化は視点（カメラ）を下流側において行っており、したがって画像右側に上流側（低水路左岸側）高水敷、左側に低水路中央部が撮影されている。なお、可視化画像は連続した3フレームにおける粒子を抽出して重ね合わせたものである。また可視化断面位置は、Fig.2に示したように、大きな掃流力が作用して洗掘域が形成される領域であり、ケースMはS5断面、ケースRではS7断

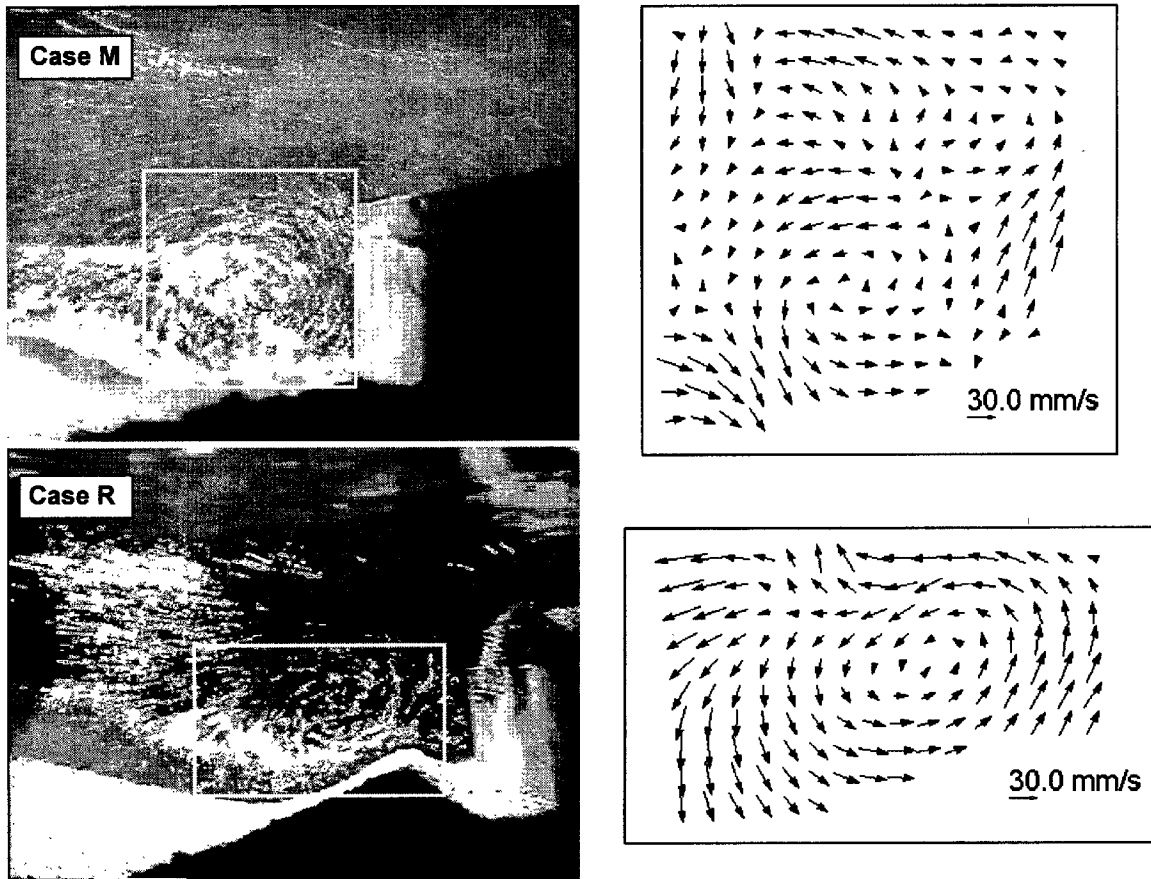


Fig. 3 Secondary flows visualized in a cross section and secondary flow vectors by PIV method in the crossover section (Case M :S5 section, Case R : S7 section).

面である。前章で述べたように、ケースRでは帯状粗度の影響により crossover部の洗掘域と堆積域が下流側に移行するため、このケースでは断面 S5 より下流側の S7 断面での結果を用いて比較することとした。図より、いずれのケースにおいても、反時計回りの2次流セルの存在と、低水路中央側の底面に向かう強い流れの存在が明確に認められる。2次流セルは、強い下降流と弱い上昇流で形成されている。この強い下降流は、高水敷上の流れが高水敷先端で剥離して低水路内に潜り込むために形成されるものであり、セルの回転を加速するとともに、底面に衝突して大きな掃流力を発生させて河床を洗掘する。また、移動床では、洗掘された粒子が2次流セルによって洗掘域の斜面に沿って輸送されて下流側に堆積域を形成する。ケースMに比べて帯状粗度があるケースRの2次流セルは、扁平になるとともに低水路側岸より離れた位置に形成される。これは、帯状粗度の影響による周辺の水速低減効果により低水路左岸側に沿って堆積域が形成されるため、らせん流が十分発達できないことが要因と考えられる。

Fig.4 は、apex 近傍の横断面可視化結果と2次流ベクトル計算結果をケースMとケースRについて示したも

のである。可視化断面は、apex 付近で S1 断面を挟む区間である。また、低水路は図の右奥よりこの断面に達し、右手前に続いている。図のようにケースRの河床形状は、前章でも述べたように、crossover部のらせん流によって形成される洗掘域と堆積域が下流側に移行するため、apexの内岸側には図にみられるようなテラス状の堆積域が形成され、洗掘域が外岸側に寄っている。このようなテラス状の堆積域の形成には、apexに設置した帯状粗度の影響で周辺の水速が低減されて粒子の輸送が緩慢になることも影響している。

図より、いずれのケースにおいても、内岸側(図の右側: Inner と表示)では反時計回りの2次流セル、外岸側では時計回りの2次流セルが存在する。ケースRにおける内岸側の2次流セルは、堆積域の頂部で剥離した流れが洗掘域斜面に形成するものである。これに対し、ケースMで見られる内岸側の大きな2次流セルは、上流側に形成された堆積域を越えた流れによって形成された2次流セルが、この断面に達するまでに大きく発達したものである。一方、いずれのケースにおいても、外岸側のセルは、上流側の高水敷から低水路に流入した流れによって形成されたものであり、この

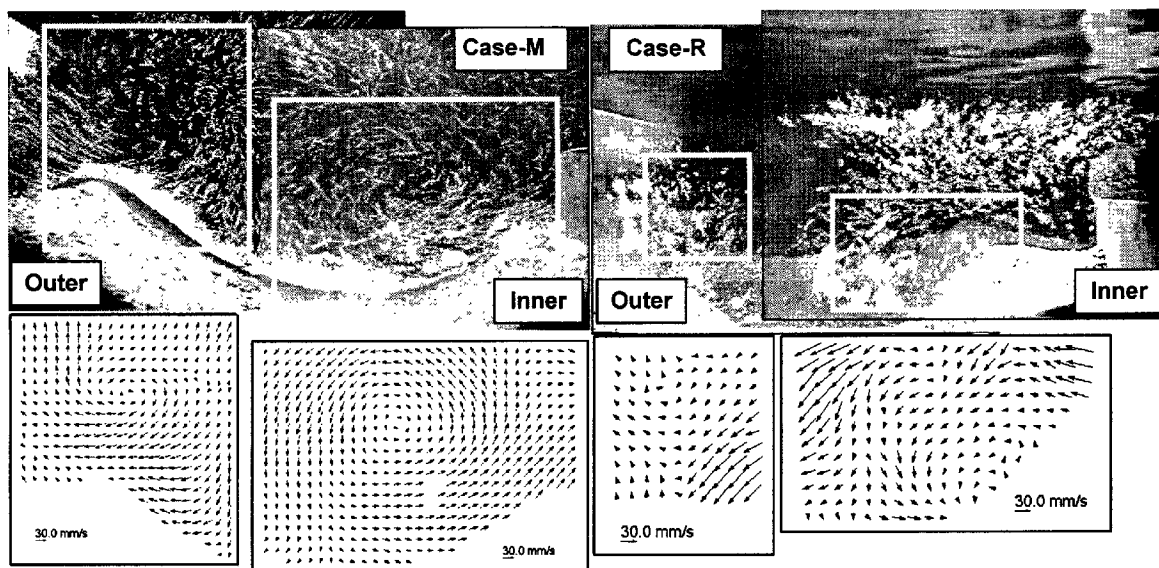


Fig. 4 Secondary flows visualized in a cross section and secondary flow vectors by PIV method at the apex (S1 section).

断面に達するまでに内岸側の強いセルによって外岸側へと押し出され、下流側の高水敷に乗り上げて行く、と言う過程をたどる。

4. おわりに

本研究で得られた主な結果を列挙すると以下のようである。

- 1) 高水敷上に一樣粗度を設置した場合は、同様の河床形状は、滑面高水敷の場合より大きな相対水深で観察される。これは、粗度による堰上げ効果により、低水路内が同程度の流速となる相対水深が大きくなるためである。
- 2) 帯状粗度の影響は、水面流況の可視化結果および速度分布では顕著に認められず、河床形状に見られる。これは、帯状粗度周辺の局所的な速度低減が河床形成に影響を及ぼすことによる。
- 3) 帯状粗度が河床形状に与える影響は、相対水深が小さな $Dr=0.15$ のケースで流れが低水路に集中するために洗掘深が大きくなる、 $Dr=0.50$ の場合の洗掘堆積位置変化や粗度上流端の堆積現象に見られる、などである。

1章で述べたように、複断面蛇行流れに影響を及ぼす要素は多種多様であり、今後、多くの条件の組み合わせから重要な要素を抽出して検討を行う予定である。

本報告は、研究所内の施設および英国のラフバラ大学の施設を用いて一つの現象を実験的に検討した結果をまとめたものであり、今後も、この共同研究をさらに進めて行く予定である。最後に、ラフバラ大学で協力していただいた方々に感謝いたします。

参考文献

- 石垣泰輔・武藤裕則(1998)：緩やかに蛇行する低水路を持つ複断面開水路流れに関する実験的検討，水工論文集，第42巻，pp.943-948。
- 石垣泰輔・武藤裕則・澤井健二(1999)：複断面蛇行開水路流れの2次流構造と掃流力分布に関する実験的研究，水工論文集，第43巻，pp.329-334。
- 石垣泰輔・武藤裕則(2000a)：複断面蛇行開水路流れの2次流構造と河床形状に関する実験的検討，土木学会，水工学論文集，第44巻，pp.855-860。
- 石垣泰輔・武藤裕則(2000b)：河床形状と高水敷粗度が複断面蛇行流れの構造に及ぼす影響について，土木学会，応用力学論文集，Vol.3，pp.821-828。
- 福岡捷二・大串弘哉・加村大輔・平生昭二(1997)：複断面蛇行流路における洪水流の水利，土木学会論文集，No.579，II-41，pp.83-92。
- 福岡捷二・小俣篤・加村大輔・平生昭二・岡田昭治(1999)：複断面蛇行河道における洪水流と河床変動，土木学会論文集，No.621/II-47，pp.11-22。
- Ervine, DA, Willets, BB, Sellin, RHJ and Lorena, M.(1993)：Factors affecting on conveyance in meandering compound flows, J. Hydr. Eng., Vol.19, No.12, pp.1383-1399。
- Ishigaki, T., Shiono, K., Rameshwaran, P., Scott, C. F. and Muto, Y(2000c)：Impact of secondary flow on bed form and sediment transport in a meandering channel for overbank flow, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, VOL.44, pp.849-854。
- Willets,B.B. and Hardwick,R.I. (1993): Stage dependency for overbank flow in meandering channel, Int. Conference on River Flood Hydraulics, pp.45-54。

Flow Structure and Bed Configuration in Compound Sinuous/Meandering Channel — Part 3 —

Taisuke ISHIGAKI, Yasunori MUTO, Koji SHIONO* and Kenji SAWAI**

*Department of Civil and Building Engineering, Loughborough University, UK

**Faculty of Engineering, Setsunan University

Synopsis

Structure of overbank flow and bed form in compound sinuous channel with roughness on the flood plain are discussed based on experimental results. Visualization and measurements of velocity and bed form were conducted. Uniform roughness and a strip of roughness set on the bases of the flow structure were used. Secondary flow is most important in this flow. Uniform roughness affects on the water level, but not on the bed form. And then, a strip of roughness affects on the bed form, but not on the flow pattern on the water surface and velocity distribution. In the latter case, roughness on the flood plain reduces the surrounding velocity and this reduction causes the local modification of bed. The effect can be observed more clearly in the shallower case.

Keywords : compound sinuous/meandering channel, secondary flow, bed form, visualization, roughness