

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

Effect of Bed Form and Roughness on Flow Structure in Compound Sinuous Channel

石垣泰輔*・武藤裕則**

Taisuke ISHIGAKI and Yasunori MUTO

*正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

**正会員 Ph.D 京都大学助手 防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

Structure of overbank flow in compound sinuous channel is discussed based on experimental results obtained by visualization methods. Secondary flow is most important in this flow. In this paper, the influences of bed form and roughness on the flow structure are investigated by using same conditions of channel and flow except for the bed and roughness. Scouring and deposition of bed are induced by the secondary flow and vice versa. Roughness on the flood plain reduces the surrounding velocity and this reduction causes the local modification of bed. From these results the interaction between secondary flow and bed configuration can be explained.

Key Words : compound sinuous channel, secondary flow, bed form, roughness, PIV

1. はじめに

本研究で対象とする流れは、直線水路内に設置した低水路が蛇行する複断面蛇行流れである。複断面水路は、平常時の安定した流水と洪水時の充分な河積の確保の両立を目指して低水路と高水敷から構成され、わが国の沖積平野の大河川ではよく採用されている。一般に複断面流れでは低水路・高水敷間に流体交換が存在するが、低水路が蛇行した場合には速度分布の歪みが大きく、その構造はさらに複雑である。この流れの構造では2次流が支配的であり、主流の歪みに起因する第1種2次流と乱れの非一様性に起因する第2種の2次流の両者が存在することが知られている^{1)~4)}。

複断面蛇行流れに関する研究は、主に固定床水路を用いた流れの構造に関するものと移動床水路を用いた河床形状に関するものに分けられる。前者の研究では、相対水深 (Dr =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、などが指摘され、その構造図が、Willettts & Hardwick¹⁾, Irvine etc.²⁾, 福岡ら³⁾, および著者ら⁴⁾ によって示されている。多少の違いはあるものの、共通している知見はつぎの2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。また、福岡ら³⁾ が指摘しているように、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ことも共通した知見と考えられる。一方、後者の移動床水路を用いた研究は、芦田ら⁵⁾, 福岡ら⁶⁾ および著者ら⁷⁾ によって行われている。芦田ら⁵⁾ は、in-bank および over-bank の流れを対象に実験を行い、流れの構造や河床変動に相違が認められることを指摘しているものの、over-bank の流れでも相対水深が小さいため、複断面蛇行流れ特有の蛇行頂部の内岸側が洗掘される河床形状とはなっていない。一方、福岡ら⁶⁾ は、相対水深を広範囲に変化させ、 $Dr=0.30$ 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を指摘するとともに、実際の河川での調査結果と実験結果が対応することを示している。また、著者ら⁷⁾ 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た。

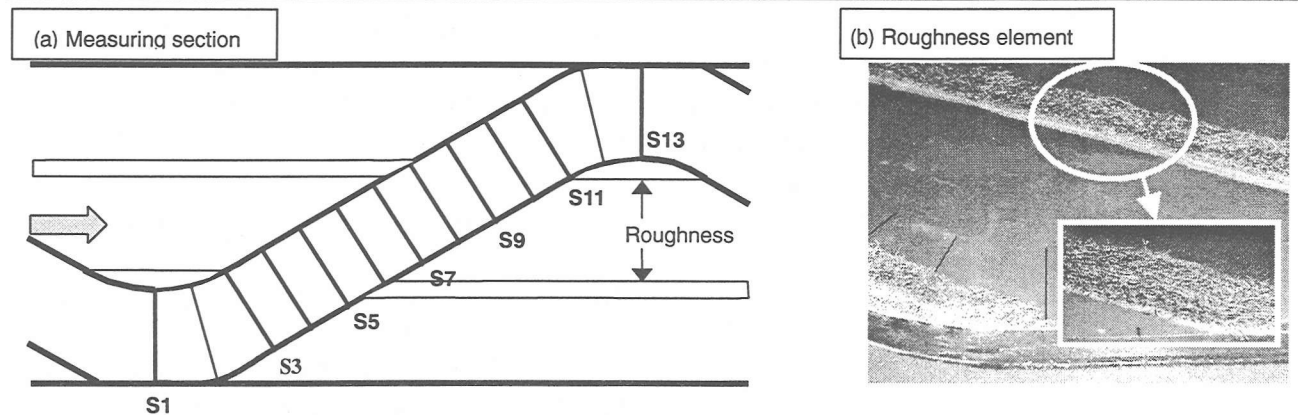
本研究では、河床形状に加えて高水敷粗度が流れの構造に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。実際の河川に見られる帯状の高木群を模して高水敷に透過性粗度を配置し、低水路は移動

表－１ 実験条件

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

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



床の条件で新たに実験を行った。なお、粗度の配置条件によって流れの構造が大きく変化することが予想されるが、今回は実際の河川における高木群の配置を参考に、従来指摘した複断面蛇行流れにおける低速域⁷⁾に一致させて透過性粗度を帯状に配置した。今回の実験結果と、低水路が固定床の場合⁴⁾および低水路が移動床の場合⁷⁾の実験結果を合わせて用い、平面形状が同一の条件の下で境界条件のみを変化させることで、河床形状と高水敷粗度が構造に及ぼす影響を検討した。

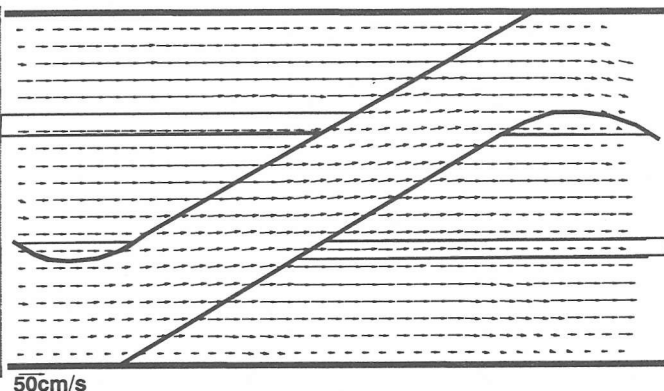
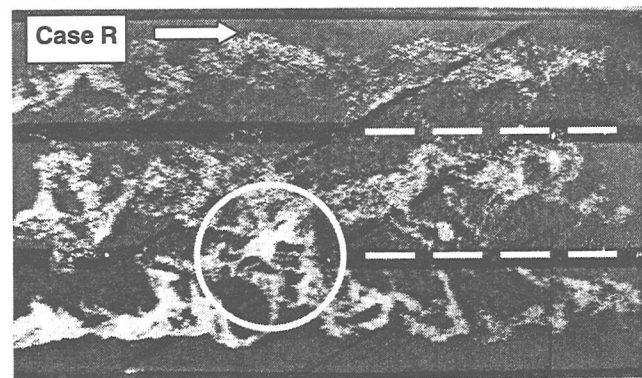
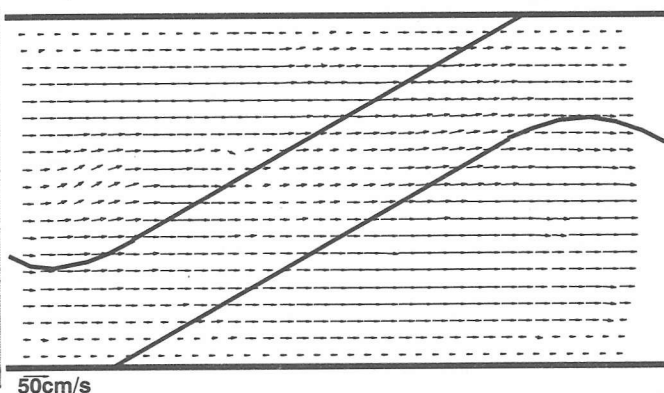
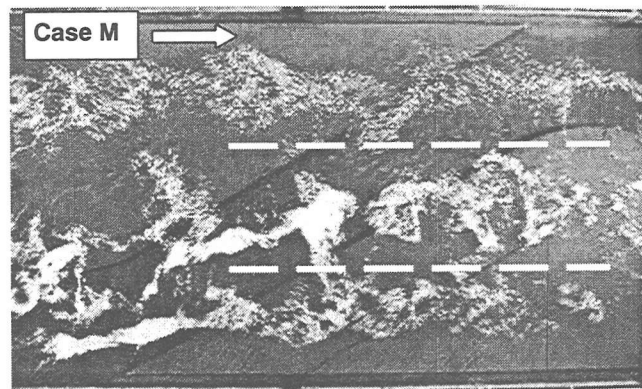
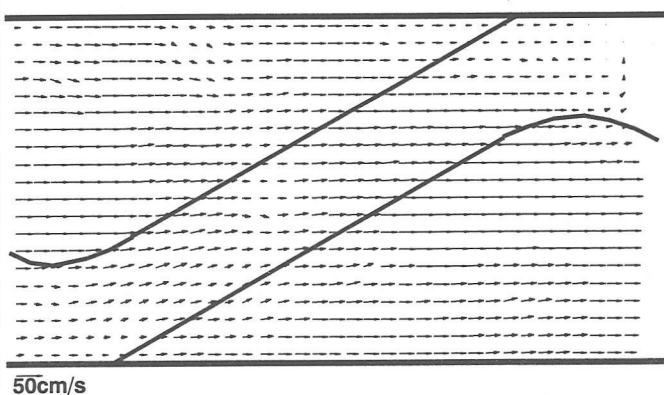
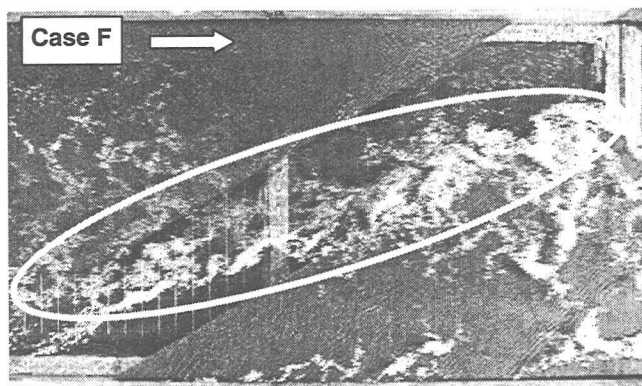
2. 実験方法

実験に用いた水路は、表－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⁸⁾。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^{4), 7)}。

ケース R で用いた粗度要素は、表－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（木津川下流部）、また前著⁷⁾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高木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。



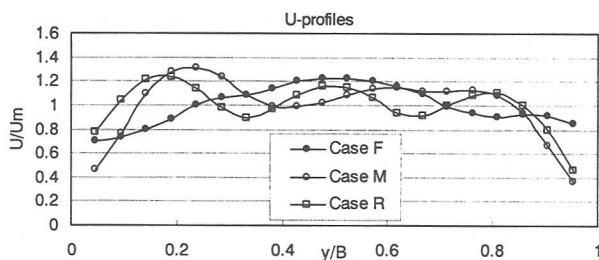
図－１ 水面流況

図－２ 速度ベクトル分布

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、掃流力分布の可視化⁴⁾、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⁴⁾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、表－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: W50mm × H65.5mm × L103mm) 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。

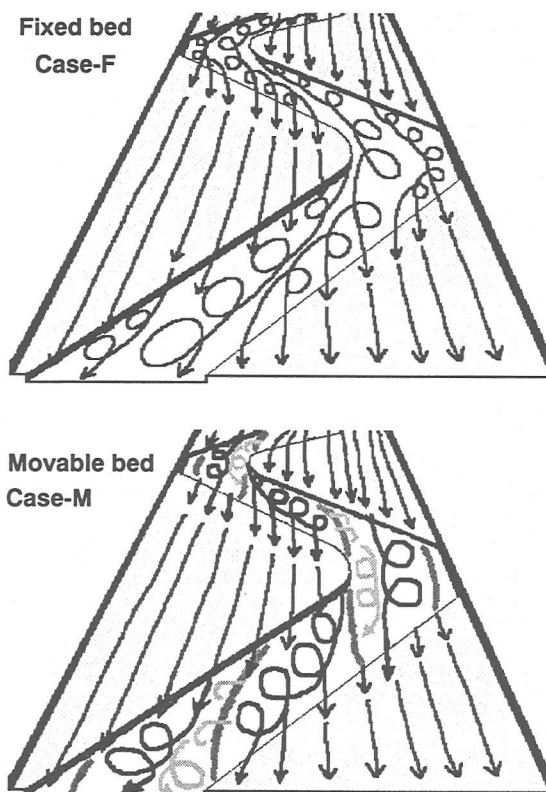
なお、1. はじめにで挙げた研究より、相対水深が大きな流れにおいて複断面蛇行流れの特徴が顕著に見られることが分かる。本研究では、全ケースについて相対水深 $Dr=0.50$ の流れを対象とした。また、水路下流端で堰上げ状態で実験を実施し、対象としている区間で水深が一樣になるように設定している。



図－3 流下方向の平均速度横断分布

3. 水面流況および速度分布

図－1は水面流況の可視化結果、図－2は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図－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、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。図－2の速度分布からは、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。しかしながら可視化結果に見られるような構造を明瞭に確認することはできない。図－3は流下方向に半波長のデータを平均した速度の横断分布であり、ケースごとの差異が明らかに認められる（図中 U_m は対象領域全体の速度の平均値）。すなわち、ケースFでは、高速域が水路中央に存在するのに対し、ケースMやケースRでは水路中央と両岸の3カ所にあって、ケースRでは各高速域の区分がより明確になる。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

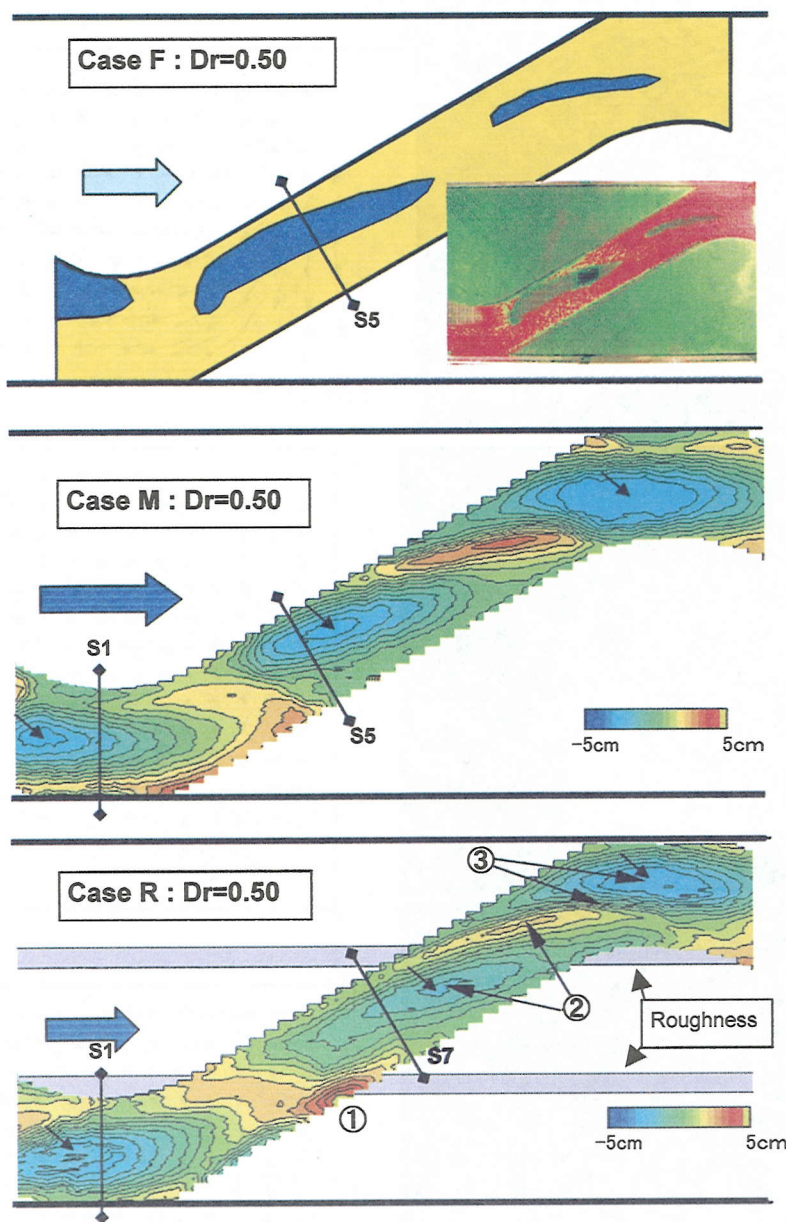


図－4 流れの構造

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。

4. 流れの構造と掃流力分布・河床形状

前章で示した結果は流れの構造を反映したものであり、その構造は2次流（らせん流）で特徴づけられる。著者らは、ケースFおよびケースMの構造を、横断面流況の可視化結果などに基づいて図－4のように表している^{4), 7)}。すなわち、ケースFの固定床水路においては、らせん流は apex 付近で発生し、低水路直線部を流下するにつれて高水敷上から低水路に流れ込む流れによって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て行く。このようならせん流の発生・発達・消滅の基本パターンが低水路の左右両岸で交互に繰り返されている。前章で示した図－1の水面流況でトレーサが集中する位置は、らせん流の沈み込み位置に相当する。一方、ケースMの移動床水路では、上述したらせん流の発生・発達・消滅の基本パターンは変わらないが、流れに応じて形成される河床形状、特に堆積域（図－5中段参照）が領域を分断し、基本パターンは堆積域によって分断された湾曲部内および蛇行直線部（以降 crossover 部と呼ぶ）内でそれぞれ完結する。複断

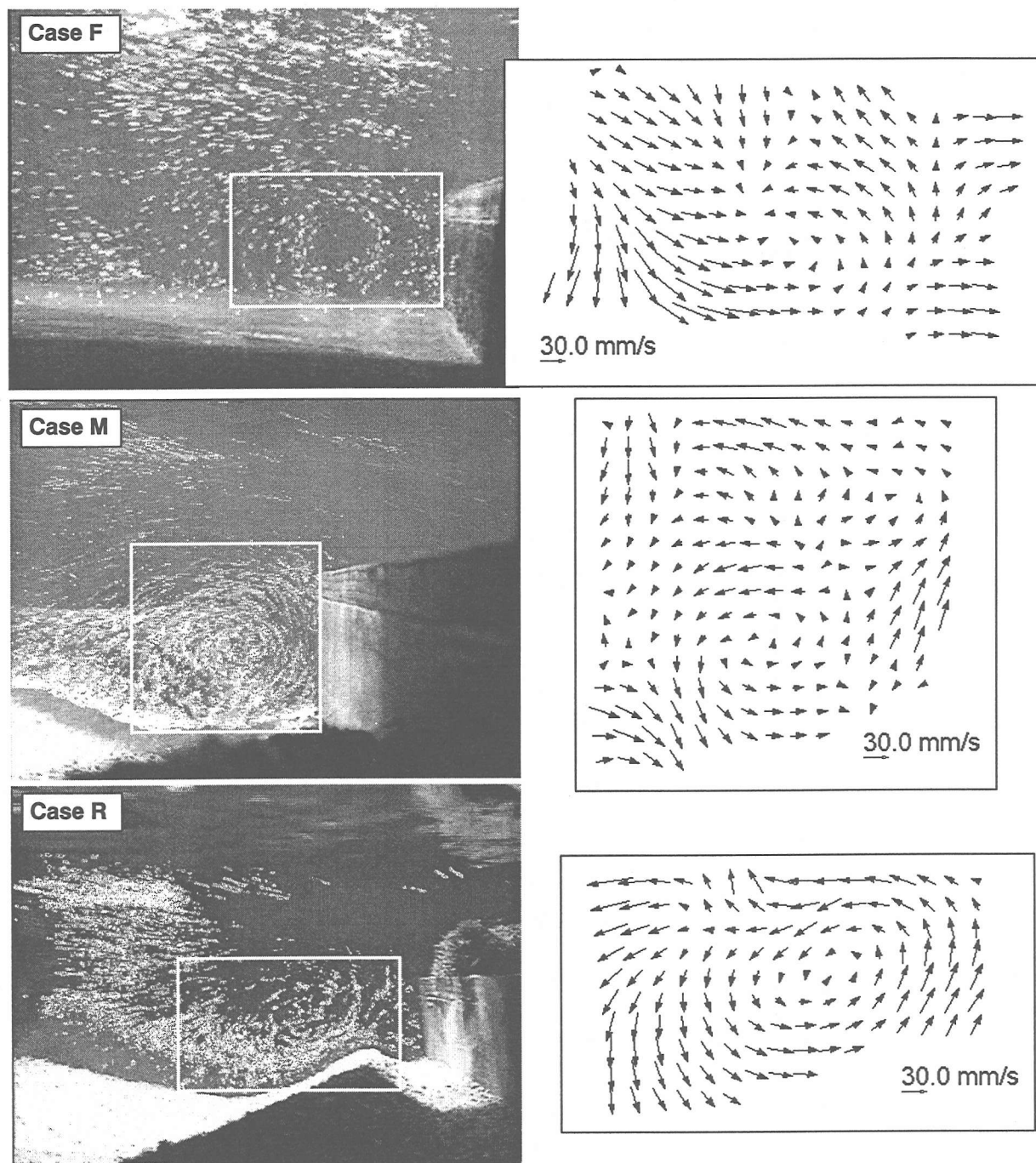


図－５ 掃流力分布および河床形状

面水路全体としては、結果的に水路中央部付近と左右側岸沿いに分離された３列の構造が形成される。また、低水路内では堆積域を越える流れが生じ、その剥離域に新たな２次流が形成される。この新たな２次流は上述のらせん流とは逆向きの回転を持つため、相互に干渉しあい勢いを強めながら発達する。なお、図中、低水路内の矢印付き実線はらせん流を、薄い矢印付き実線は剥離域に新たに形成される２次流を、高水敷に乗り上げた流れを矢印付きの線で表している。

以上の構造は、低水路底面の掃流力分布に影響を与え、移動床の場合は洗掘・堆積現象を引き起こす。そこで、図－５に示した結果に基づいて、流れの構造と掃流力分布について検討する。なお、

ここに示した河床形状は、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に計測した結果である。上段の図は、ケースＦ（固定床水路）における掃流力分布の可視化結果^{４)}であり、参考のために実画像を併示している。低水路内のブルーに着色した部分（添付の画像では水路の底面が露出した部分）が河床材料が掃流された領域であり、蛇行低水路の直線部（crossover部）と湾曲部のapex付近の２箇所に見られる。これと図－４で示した流れの構造を比較してみると、河床材料が掃流された領域とらせん流により高速流体が底面まで輸送される領域がほぼ一致し、この高速流体によって相対的に大きな掃流力が作用していることが分かる。また、そのような領域が crossover 部と apex



図－6 Crossover 部の2次流セル

付近とに分離して存在することから、らせん流が複列化していることが知れる。この現象は、中段に示した移動床水路での結果（ケースM）において、より明確にみられる。移動床の場合には、河床材料の輸送が伴うため、洗掘域から輸送された粒子が堆積域を形成し、それにより流れの構造が分離される。このケースでは、蛇行部内岸側が洗掘され、福岡ら⁶⁾の結果と一致する。この結果に比べ、下段のケースRでは、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、帯状粗度が有る場合、①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、②crossover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、③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、帯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

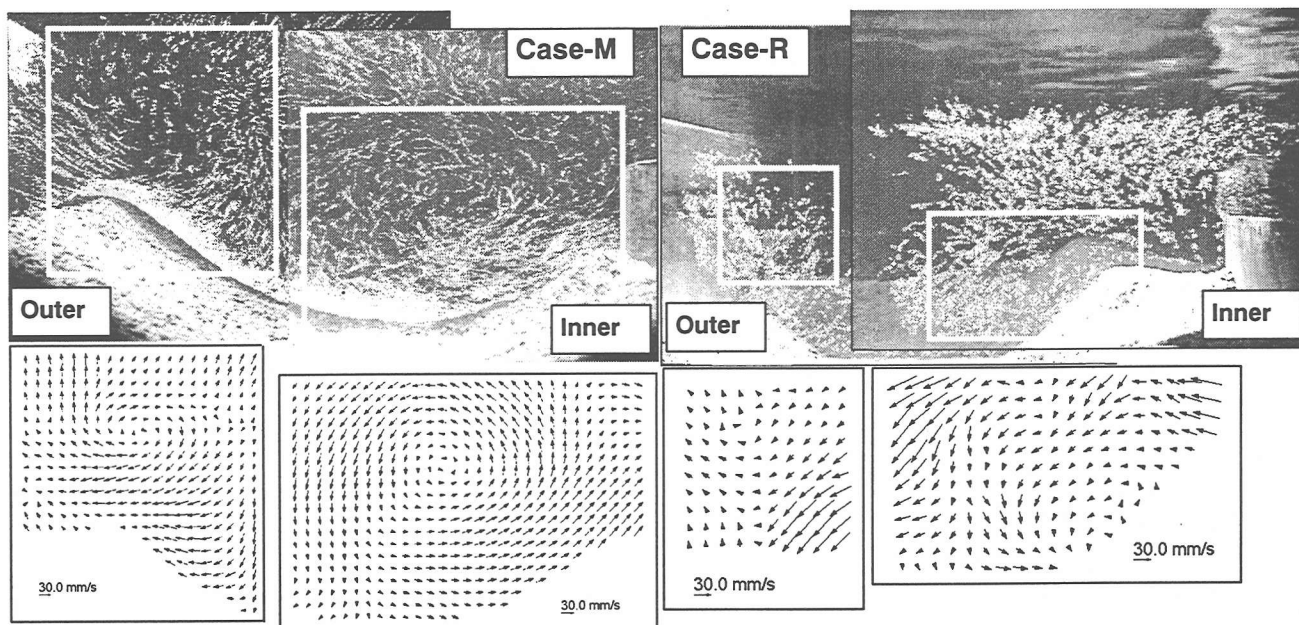


図-7 Apex 付近の2次流セル

るために起こるものと考えられる。この結果より、流れの構造を検討する際には、局所的な高粗度域の影響を考慮する必要があることが指摘される。

5. 2次流セルの特性

図-4の構造が示すように、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 crossover 部と 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。

図-6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、図-5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FとケースMはS5断面、ケースRではS7断面である。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速度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。

図-7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、図-5に示した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。

6. おわりに

本研究は、同一の平面形状を有する複断面蛇行水路における同一の水理条件の下で、低水路の河床条件と高水敷の粗度条件のみを変えた実験で得られた結果を用い、これらの条件が流れの構造に与える影響について検討したものである。得られた主な結果をまとめると以下のようである。

- 1) 固定床水路を用いたケースFと移動床水路を用いたケースMで得られた結果の比較より、2次流によって河床に洗掘域と堆積域が形成され、その河床形状によって2次流構造が変化する、という流れの構造と河床形状との相互作用が確認された。
- 2) ケースMと移動床水路で高水敷状に帯状粗度を配置したケースRの比較より、帯状粗度の影響は流れ全体には及ばないものの、帯状粗度の周辺に形成された低速度域の影響により、周辺に堆積域が形成される。その結果、crossover部で形成される洗掘域と堆積域が下流側に移行するとともに下流側のapexまで達し、テラス状の堆積域が形成される。これにより、apexの洗掘域が外岸側に移動する。
- 3) crossover部の2次流セルは、いずれのケースにおいても同様に形成されるが、ケースRでは帯状粗度周辺の速度低減域の影響を受け、他のケースに比べてセルが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。一方、apex付近におけるケースRの2次流セルは、

ケースMに比べて強さやスケールが小さくなる。これは、帯状粗度の存在で変化した河床形状の影響である。

- 4) 以上の結果より、高水敷に設置した帯状粗度は、局所的な粗度の変化にもかかわらず、河床形状や流れの構造に影響を及ぼすことが知れた。このことは、複断面蛇行流れを検討する上で、局所的な高粗度域の影響を考慮する必要のあることを意味している。
- 5) 横断面可視化結果にPIV法を適用する場合、2次流セルが安定して観察される領域に限定すれば、動画像での2次流観察結果と矛盾しない結果が得られ、それによる定性的な検討が可能であることが確認された。

本研究で対象とした流れは、1章で述べたように、蛇行度などの水路幾何形状の影響を受けることが知られており、その影響について検討することが今後の課題である。

参考文献

- 1) Willetts, B.B. and Hardwick, R.I. : Stage dependency for overbank flow in meandering channel, Int. Conference on River Flood Hydraulics, pp.45-54, 1993.
- 2) Ervine, D.A., Willetts, B.B., Sellin, R.H.J. and Lorena, M. : Factors affecting on conveyance in meandering compound flows, J. Hydraulic Eng., Vol.19, No.12, pp.1383-1399, 1993.
- 3) 福岡捷二、大串弘哉、加村大輔、平生昭二 : 複断面蛇行水路における洪水流の水理、土木学会論文集、No.579、II-41、pp.83-92、1997.
- 4) 石垣泰輔、武藤裕則、澤井健二 : 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検討、土木学会、水工学論文集、第43巻、pp.329-334、1999.
- 5) 芦田和男、江頭進治、劉炳義、滝口将志 : 蛇行低水路を有する複断面水路における流れの特性と河床変動機構、京都大学防災研究所年報、第32号B-2、pp.527-551、1989.
- 6) 福岡捷二、小俣篤、加村大輔、平生昭二、岡田昭治 : 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、1999.
- 7) 石垣泰輔、武藤裕則 : 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、水工学論文集、第44巻、pp.855-860、2000.
- 8) 石垣泰輔、武藤裕則 : 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、水工学論文集、第42巻、pp.943-948、1998.

(2000年4月21日受付)