

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(2)

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る。両者の水路において、基本単位と考えられるらせん状の2次流構造は同様であるが、生成される数が異なる。その結果、河床に形成される洗掘域・堆積域の列数も異なっている。

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、LDA 速度計測

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。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 (Willett and Hardwick, 1993; Irvine et al., 1993; 福岡ら, 1997; Shiono and Muto, 1998; 石垣ら, 1999)。

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、Willett and Hardwick(1993), Irvine et al.(1993), 福岡ら(1997), Shiono and Muto(1998)および石垣ら(1999)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状の2次流 (以降、らせん流と呼ぶ)

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(1997)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(1989), 福岡ら(1999)および著者ら(石垣ら, 2000a; Ishigaki et al., 2000b)によって行われている。芦田ら(1989)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(1999)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(石垣ら, 2000a; Ishigaki et al., 2000b)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。

Table 1 Hydraulic conditions and channel configuration.

Relative depth Dr	Depth H(cm)	Discharge Q(l/sec)	Hydraulic radius R(cm)	Mean velocity Um(cm/s)	Froude number Fr	Reynolds number Re
bankfull	5.00	4.282	3.81	28.1	0.46	10700
0.15	5.95	4.592	2.14	19.2	0.42	4100
0.50	10.07	21.242	5.42	32.6	0.45	17700

$$SI=1/\lambda$$

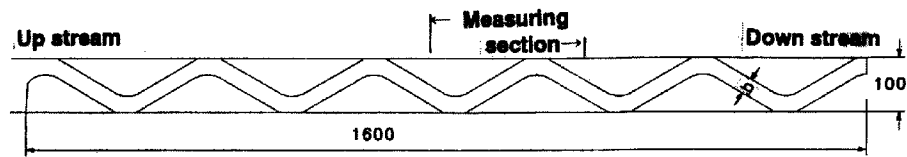
$$=341.4/306.8$$

$$=1.11$$

$$b=30\text{cm}$$

$$l/b=11.38$$

$$b/h=6.0$$

Height of flood plain: $h=5.08\text{cm}$. Bed slope: $I=1/970$ 

以上のように、流れ構造と河床形状は相互に影響を及ぼすことが分かる。本報告は、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、流れの構造に支配的な2次流構造と河床形状との関係について検討した結果をまとめたものである。

2. 蛇行度の小さな水路での検討：蛇行度=1.11

2.1 実験方法

実験は、既報（石垣・武藤，1998）と同様の幅 1m、長さ 16m の直線水路を用い、幅 30cm、初期深さ 5cm（移動床厚さ 3cm）で蛇行度 $SI=1.11$ の低水路を有する複断面蛇行流れを対象に、河床形状の計測、流速計測および流れの可視化を行った。水理条件および水路の諸元は Table 1 に示すとおりである。河床材料には、既報（石垣ら，1999）における掃流力分布の可視化法と同じ球形のスラジライトを用いており、比重は 1.7、平均粒径は 1.6mm ($Dr=0.15$ のケース) および 2.4mm (bankfull および $Dr=0.50$ のケース) である。なお、この材料は、それぞれの水理条件における掃流力と材料の限界掃流力の比が 1.0 前後となるように選定したものである（石垣ら，1999）。この材料を使用した理由は、粒径が大きいために砂漣や砂堆が発生せず中規模河床形態が形成されること、および現象変化が比較的早く、実験時間が節約できることなどである。

河床形状計測には超音波河床計を用い、初期の平坦河床から通水中に 5 分あるいは 10 分間隔で蛇行頂部 ($S1$ ：以下では apex と呼ぶ) から次の apex ($S13$) までの 6 測線 ($S1, S3, S5, S7, S9, S11$ ：測線位置を Fig. 1 に表示) で横断面形状計測を行った後、通水停止後に流

下方向に 4cm 間隔で河床横断面形状を計測した（以下、この結果を最終河床形状と呼ぶ）。なお、各測線に沿っては、自動トラバース装置を用いて 1mm 間隔で河床高を計測し、得られた河床形状をモニタリングしながら実験を行った。この結果に基づき、横断面形状計測結果の経時変化が小さくなったと判断される時点で通水を停止した。

速度計測および横断面流況の可視化は、最終河床形状をセメント粉で固定した後に行った。速度計測は、高水敷高さ付近の 13 測線 ($S1\sim S13$) に沿い、横断方向に 1cm 間隔で 2 成分電磁流速計（I 型、流下方向成分および横断方向成分）を用いて行った。また、横断面流況可視化では、防水型ビデオカメラを水中に設置し、平均粒径 0.45mm、比重 1.05 の中立粒子（ポリスチレン粒子）の挙動を捉え、2 次流構造を直接可視化した。なお、流れへの影響を考慮し、ここでは $Dr=0.50$ の結果のみを用いる。照明には 1500W のハロゲンライトを用い、低水路に沿った約 20cm の範囲を照明した。

2.2 河床形状

Fig. 1 は、低水路のみ流れる Bankfull のケース、相対水深 $Dr=0.15$ および 0.50 のケースにおける最終河床形状の計測結果と速度計測結果を示したものである。Bankfull のケースでは、流れは apex から下流側の外岸に向かっており、それに沿って洗掘域が、その下流側で堆積域が形成されている。これに対し、高水敷上に流れが及ぶ $Dr=0.15$ の場合には、cross-over 部（低水路流れと高水敷上流れが交差する水路中央付近）の低水路中央部に洗掘域が形成され、Bankfull の結果とは大きく異なっている。さらに、高水敷上流れの水深と速度が大きな $Dr=0.50$ の場合には、低水路中央の洗掘域は大きく、深くなるとともに、低水路蛇行頂部 (apex) 付近にも洗掘域が形成されている。また、これらの洗

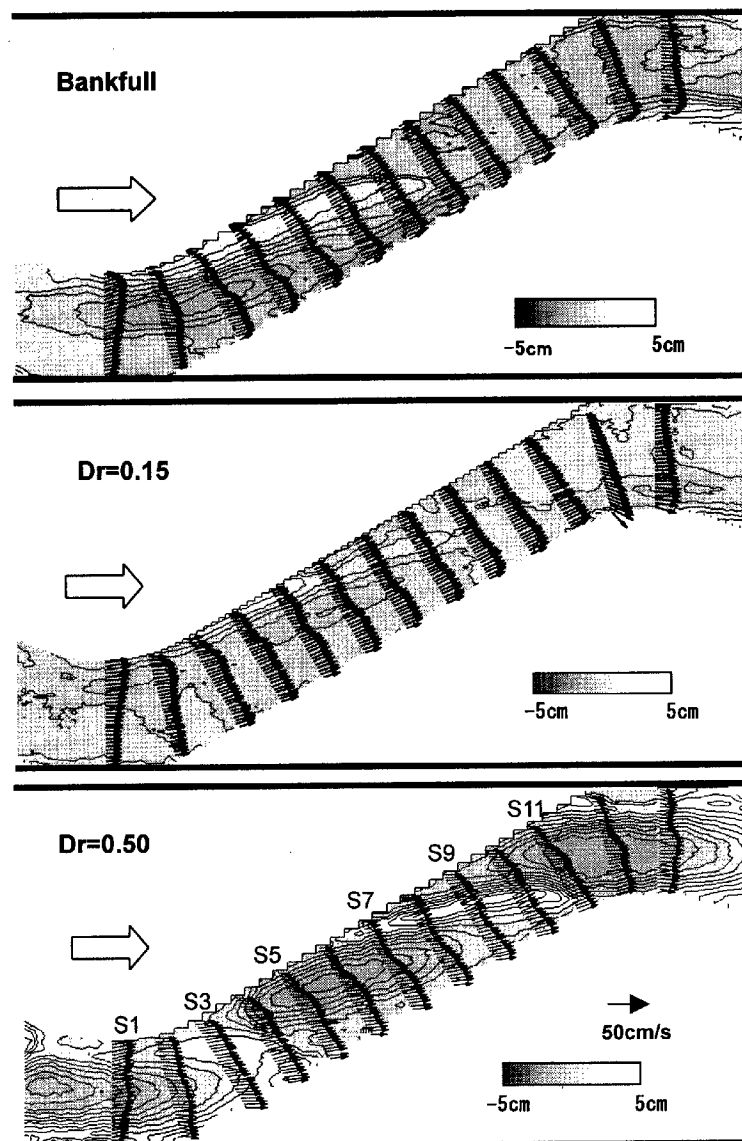


Fig 1 Velocity and bed forms.

掘域は、堆積域で分断されている。この現象について、固定床実験で得られた流れの構造に関する知見（石垣・武藤，1998；石垣ら，1999）に基づいて考察すると、低水路を移動床とした場合には、複列のらせん流によって形成された堆積域が、それぞれの構造を分断するという結論が得られる。

2.3 2次流構造

ここでは、2次流構造を、 $Dr=0.50$ の可視化結果を用いて検討する。Fig. 2 および Fig. 3 は、それぞれ、cross-over 部（S5～S7）および apex 付近（S1）の横断面流況を下流側から可視化した結果であり、図の左が右岸、右が左岸である。また図中に、横断面形状を併示した。

Fig. 2 の cross-over 部では、図の右側から中央に向か

って洗掘域が存在し、その両側に堆積域が形成されている。ここには、右図と中図の黒矢印で示される反時計回りの強いらせん流が存在し、それは、洗掘域を水路中央に向かって形成しながら発達して行く。また、上層の流れは、らせん流の発達を促しながら低水路底面向かい（右図左矢印）、その後、堆積域の斜面に沿って上昇して高水数に乗り上げている（中図左矢印）。なお、左図の破線で示した矢印は、上流側の apex 付近の洗掘域から高水数に乗り上げる流れを示す。

Fig. 3 の apex 付近には、上流側で形成された時計回りに回転するらせん流によって形成された洗掘域と堆積域（図の左側）が存在している。このらせん流は、堆積域の斜面に沿って上昇しながら下流側の高水数に乗り上げ、減衰して行く（左図左矢印）。また、そのカウンターとして反時計回りに回転する強いらせん流が

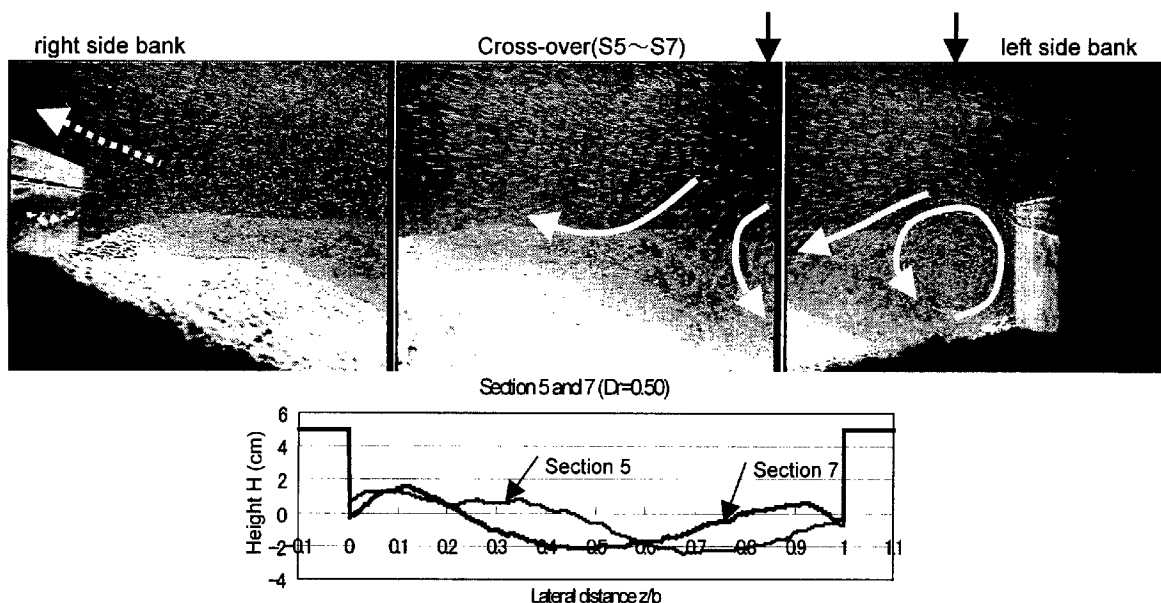


Fig.2 Secondary flows at the cross-over (S5-S7) visualized in the cross-sections.

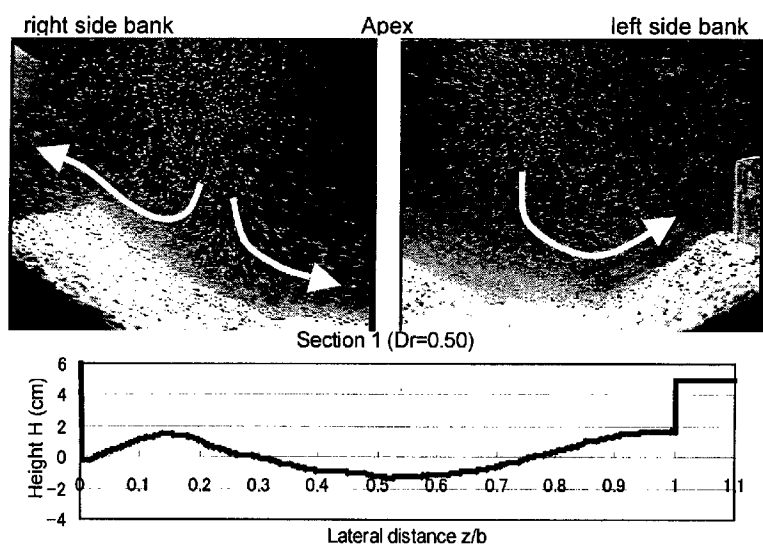


Fig. 3 Secondary flows at the apex visualized in the cross-sections.

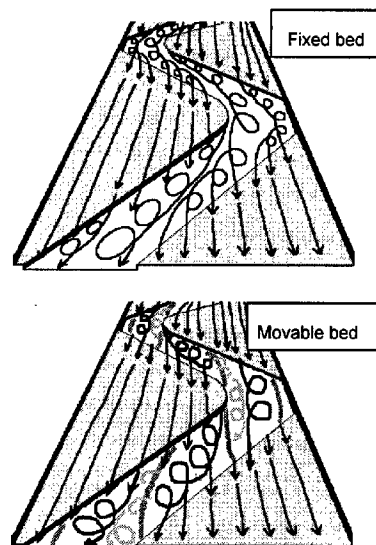


Fig.4 Structure of secondary flow over fixed and movable beds.

右側の斜面に沿って形成されている（右図矢印）。目視によると、このらせん流は、apex 上流側の堆積域を超えて再付着する低水路内の流れと、上流の高水敷上から低水路に乗り入れた流れが作る右岸側のらせん流のカウンターとしての流れが重ね合わさって形成されているのが観察された。

以上のように、低水路を固定床とした場合の流れと移動床とした場合の流れの構造は異なっており、その差異を図化したものが Fig. 4 である。なお、図中、低水路内の矢印付き実線はらせん流を、薄い矢印付きはそのカウンターとして形成されるらせん流を、高水敷に乗り上げた流れを矢印付きの線で表している。

3. 蛇行度の大きな水路での検討：蛇行度=1.38

ここでは、著者らが英国のラブ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場合の河床形状と2次流構造について検討する。

3.1 実験方法

実験は、幅 2.4m、長さ 13m、深さ 0.5m の直線水路内に、Fig. 5 に示した 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。高水敷はポリスチレン製の滑面であるが、低水路は河床に平均粒径 0.85mm の一様砂を敷設した移

Sinuosity	1.38
Floodplain width (m)	2.4
Meander length (m)	3.4
Meander belt width (m)	1.815
Main channel width (m)	0.4
Main channel depth (mm)	40
Valley slope	0.002

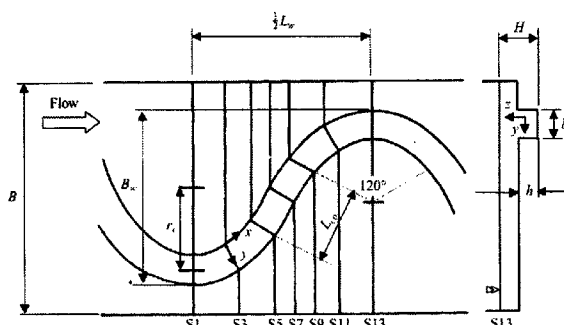


Fig. 5 Channel configuration for meandering channel.

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6時間通水した後、河床形状を写真測量法を用いて計測した。さらに、河床を固定し、2次流の可視化および速度3成分計測を行っている。2次流の可視化では、150Wのスライドプロジェクターを用いて照明した領域を通過する中立粒子の挙動を、30cm下流側の水中に設置したビデオカメラで撮影した。また、速度計測にはファイバー型3成分LDA (TSI社製)を用い、各計測点にて、サンプリング周波数1KHzで1分間の計測をランダムモードで行い、速度3成分の平均値を得た。なお、計測には、2次元トラバース装置(鉛直および水平方向、設定精度0.1mm)を用いている。

3.2 河床形状

種々の相対水深 (Dr) における河床形状計測結果を濃淡で示したものがFig. 6であり、濃い部分が洗掘域、淡い部分(白い部分)が堆積域である。低水路のみ流れる $Dr=0$ では、単断面蛇行流れと同様に外岸側が洗掘されており、内岸から下流に向かって堆積域が発達している。高水敷上水深が小さな $Dr=0.15$ では、 $Dr=0$ の場合と同様に洗掘域が蛇行外岸側に生ずるが、堆積域の形状に変化が認められる。 $Dr=0.30, 0.35$ と水深が増加するにつれて河床波が発生し、小規模河床形態となる。より水深が大きな $Dr=0.45$ では、明確な洗掘域と堆積域が上流側の低水路側壁から対岸まで形成され、2.1節で示した蛇行度が小さな場合と同様の河床形状を呈する。さらに水深を増加させた $Dr=0.50$ では、堆

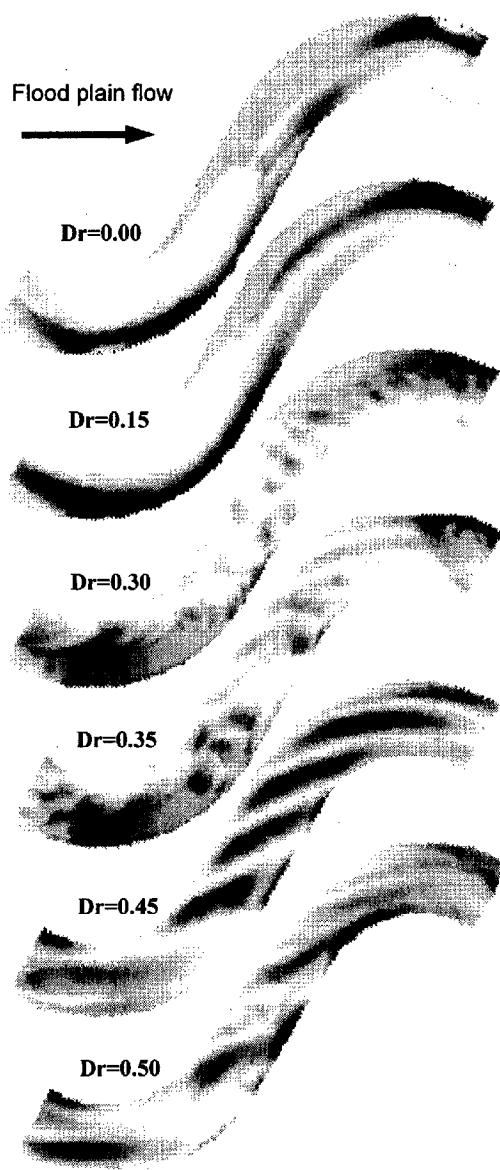


Fig.6 Bed forms with various depth.

積域を形成している粒子が掃流されて平坦化し、洗掘域と堆積域の区別が不明瞭になる。このように、水深の変化に応じて河床の形態が変化することから、洪水時における河床変化も同様の過程をたどるものと考えられる。

3.3 2次流構造

ここでは、2章と同様に明瞭な洗掘域と堆積域が形成される $Dr=0.45$ のケースを対象に、蛇行度が大きな水路における2次流構造と河床形状との関係について検討する。実験では、まず、設定した断面内の2次流を可視化して構造を定性的に把握し、その後に同断面を対象にしたLDAによる速度3成分の計測を行い、

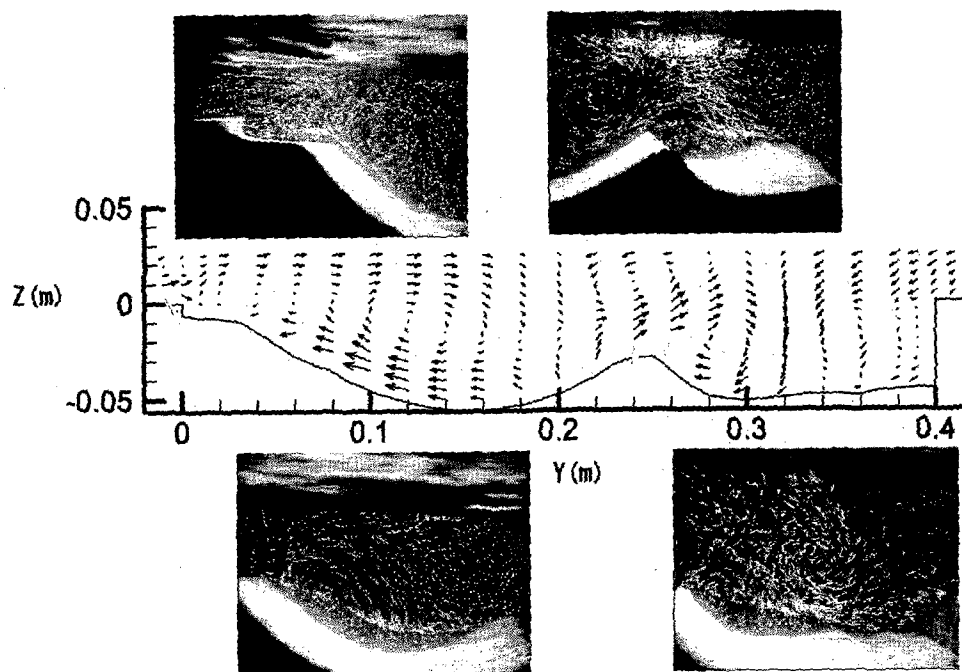


Fig. 7 Visualization and LDA measurement for secondary flow at a downstream bend apex in the test section. ($Dr=0.45$)

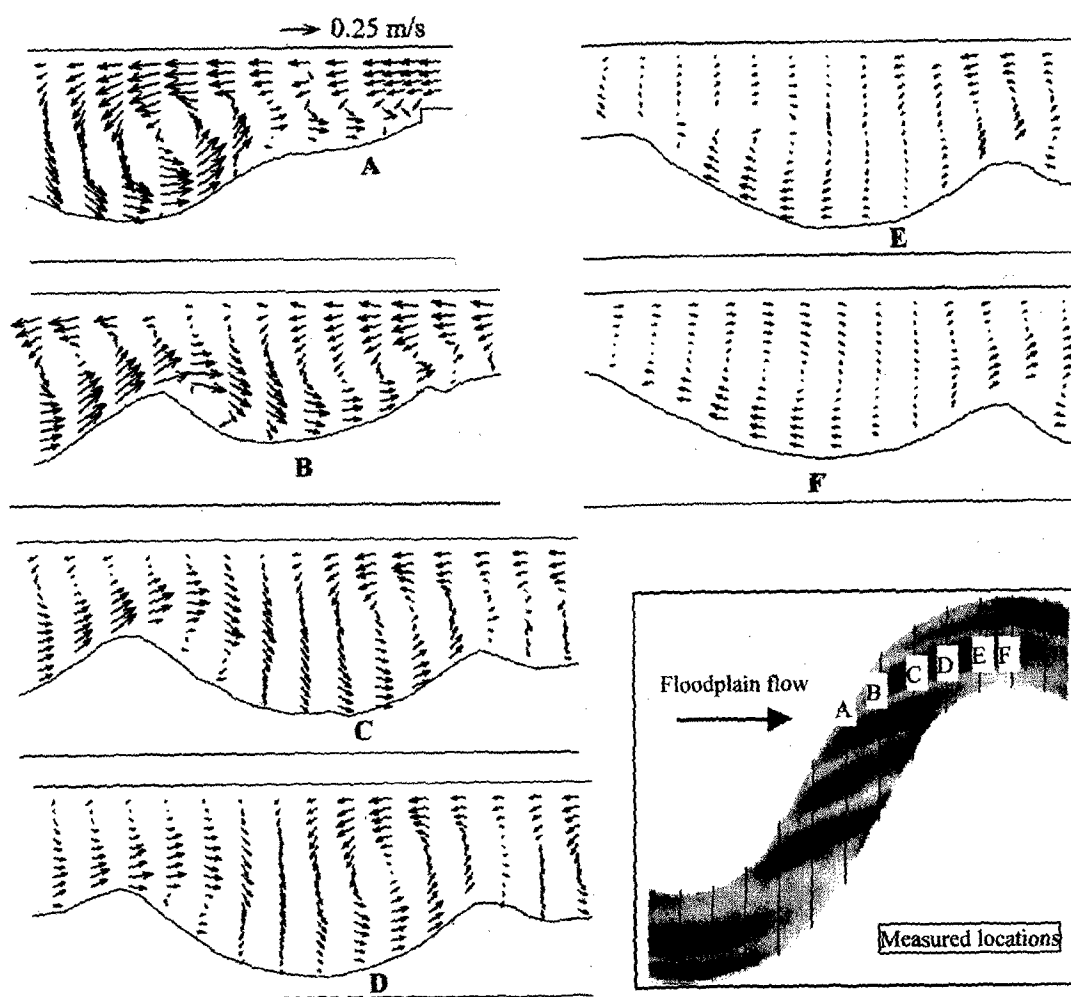


Fig. 8 Secondary flow vectors along a trough, together with locations of LDA measurements ($Dr=0.45$).

定量的に構造を把握することとした。Fig. 7 は、apex における可視化結果と LDA 計測結果を比較して示したものである。図より、可視化と速度計測の結果は同様であり、2 次流セルのスケールおよび形成位置が良い一致を示しており、可視化結果と速度計測結果の妥当性が伺える。河床形状と 2 次流セルを対比させてみると、河床形状を形成する 2 次流セルと、堆積域を越えた流れが形成する 2 次流セルの存在が認められる。前者の 2 次流セルは従来の研究でも指摘されているものであるが、後者のセルは本実験で初めてその存在が指摘されたものである。つぎに、河床形状を形成する 2 次流がどのように発達するのかという観点より、Fig. 8 の付図に示すように、一つの洗掘域に沿った A~F の測定断面で LDA による計測結果を用いた検討を行う。なお、あらかじめ対応する断面における可視化を行った結果でも、図に示した 2 次流セルの存在が確認されており、その結果と比較するため、この図に示した 2 次流ベクトルは可視化断面上の成分で表示している。図より、A 断面で高水敷流れが低水路内に進入することにより形成される反時計回りの 2 次流セルが、B から C 断面の右側（下流側）の堆積域に沿って大きくなり、洗掘深が最大となる D 断面で最も発達した後、E から F 断面にかけて消滅して行くという、セルの発生、発達、消滅過程が確かめられる。一方、B 断面の左側の堆積域を越える流れが形成する時計回りの 2 次流セルが、下流に行くにつれて大きくなり、F 断面で最大となる過程が観察される。

以上の結果は、高水敷流れが低水路に流れ込むことによって形成される 2 次流セルが洗掘域および堆積域を形成するとともに、形成された河床の影響で新たな 2 次流セルが形成されると言う、流れと河床の相互干渉が流れの構造を特徴づけていることを示している。

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) 蛇行度の小さな水路における検討で、福岡ら(1999)の結果と同様、相対水深による河床形状の差異が認められた。これは、流れの構造の水深依存性で説明される。また、高水敷流れが低水路に流れ込むことによって形成される 2 次流セルが洗掘域および堆積域を形成するとともに、形成された河床の影響で新たな 2 次流セルが形成されると言う、流れと河床の相互干渉が流れの構造を特徴づけていることを示した。
- 2) 蛇行度の小さな水路において、水深の大きな場合（複断面的蛇行流れになる場合）には、洗掘域およ

び堆積域が対岸にまで発達し、流れの構造が分断される。この場合、低水路内では、堆積域を越える流れが新たな 2 次流を形成する。

- 3) 蛇行度の大きな水路でも、1) については同様の結果が得られたが、2) については、形成される洗掘域と堆積域の数が異なる。これは、基本単位の 2 次流構造は同じであるが、蛇行度の違いによって、らせん流の数が異なるためである。この結果は、低水路の蛇行度によって、底面せん断力の作用位置が異なることを示しており、河川に自由度を与えながら治水安全度を確保するためには、流れの構造を考慮した低水護岸の配置等が必要であることを示唆している。
- 4) 蛇行度が大きな水路において行った 2 次流セルの可視化結果と LDA による計測結果は良い一致を示し、可視化法および速度計測法の妥当性が確かめられた。

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する試みから得られ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

- 芦田和男, 江頭進治, 劉炳義, 滝口将志(1989): 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.
- 石垣泰輔・武藤裕則(1998a): 複断面蛇行開水路流れの構造と底面せん断力分布について, 水工論文集, 第 42 巻, pp.901-906.
- 石垣泰輔・武藤裕則(1998b): 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.
- 福岡捷二・大串弘哉・加村大輔・平生昭二(1997): 複断面蛇行水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.
- Ervin, 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.(2000b) : 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.
- Shiono, K. and Muto, Y. (1998), "Complex flow mechanisms in compound meandering channel for overbank flow", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 376, pp. 221-261.
- Shiono, K., Ishigaki, T., Muto, Y. and Imamoto, H.(1999) : Bed shear stress in meandering channels for overbank flows, Proc. of 28th IAHR Congress, p.262(on CD-ROM).
- Willetts, 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 2 —

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

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

**Faculty of Engineering, Setsunan University

Synopsis

Over-bank flow in a straight channel with sinuous/meandering main channel is discussed based on experimental results. The experiment was carried out in a compound sinuous/meandering channel with movable main channel. Bed form measurements, velocity measurements and flow visualization in a cross section were conducted

The results indicate that there exists a certain relationship between the secondary flow and eroded and deposited regions on the bed. Two types of secondary flow were observed, one is the spiral motion induced by the shear stress between main channel and flood plain flows, and the other can be observed at the downstream side of the ridge in the deposited region. The separation of main channel flow behind the crest of sand bar produces this latter one.

Keywords : compound sinuous/meandering channel, secondary flow, bed configuration, visualization, LDA