

低水路および外郭堤防法線がともに蛇行し位相差を有する複断面蛇行流路内の流れ

EXPERIMENTAL STUDY OF FLOW STRUCTURES IN A DOUBLE MEANDERING COMPOUND CHANNEL

小林健一郎¹・玉井信行²・G.M. Tarekul Islam³

Kenichiro KOBAYASHI¹, Nobuyuki TAMAI² and G.M. Tarekul Islam³

¹ 学生会員 東京大学工学系研究科 修士課程2年 (東京都文京区本郷7-3-1)

² フェロー会員 工博 東京大学工学系研究科教授

³ 学生会員 東京大学工学系研究科 博士課程2年 (東京都文京区本郷7-3-1)

Flow structures in a double meandering compound channel were studied experimentally. The double meandering compound channel is referred to as a channel whose levee alignment is meandering as well as main channel alignment. In this research, the levee alignment goes ahead of the main channel alignment by 32 degrees. The experiment was carried out varying the flow depth over the floodplain. The structures of the primary flow, secondary currents were detailed in this paper. As a peculiar phenomenon in the double meandering channel, dead water area was observed over the floodplain at different locations according to the flow condition.

Key Words: double meandering compound channel, primary flow, secondary currents, dead water area

1. はじめに

日本では1990年に多自然(近自然)型川づくりの通達が出され、1994年以降すべての治水工事はこれに従うこととなった。生態系にとって、河道内の流れ場の多様性はきわめて重要であり、その意味で蛇行河道内の流れ場は、直線河道内のそれよりも多様性が高い。また洪水の主流部を堤防から遠ざけて、流れによる浸食を防ぐことにより堤防の安全度を高め、洪水流を安全に流下させるなどの治水上の理由から、特に大河川の中下流域では複断面化が進んでいる。複断面蛇行河道内の流れ場の研究は、1960年代¹⁾にも見られるが、特に1980年代後半あたりから急速に増加してきたように思われる。たとえばヨーロッパではGerard Kiely²⁾あるいはB. B. Willettsら^{3,4)}の研究が複断面蛇行水路内の基本的な流れの構造を明確に捕らえている。またHR Wallingfordでは“Series B”^{5,6)}と呼ばれる大規模実験施設を用いての研究が展開された。日本では、芦田、江頭らが1989年に、蛇行流路曲線を基本とした複断面蛇行流路における流れ場の構造、および河床洗掘機構に関する研究を報告し⁷⁾、1992年には二層モデルを用いた流れ場の数値計算⁸⁾を試みている。また、京都大学の

武藤らも複断面蛇行流路に関する研究をおこなっており¹⁰⁾、最近では耐水性ビデオによる2次流構造の可視化などを行っている¹¹⁾。また同じころから、広島大の福岡¹²⁾らは、精力的にこの分野の研究を進めており、最近では実際の河川計画に際しての提言なども行っている。こうした研究により、複断面蛇行河道内の流れの構造は相当程度わかってきている。しかし複断面蛇行河道内の流れは、その流れ場に影響を与える因子が非常に多く、抵抗則による水位推定などに関しては、いまだ困難な点が多々見られ、様々な条件下での、より多くのデータの蓄積が望まれている。

現実の河川では低水路法線と堤防法線がともに蛇行し、かつその間に位相差を有する事が多い。この点に着目した研究は、1988年に木下らが最適複断面河道の提案¹³⁾を、その後、福岡らが別の視点での研究を行っている。こうした現状をふまえ、筆者らは低水路法線と堤防法線がともに蛇行し、かつ堤防法線が、低水路法線よりも32度先行している複断面蛇行水路による実験をおこなった。本稿ではその結果が示されている。

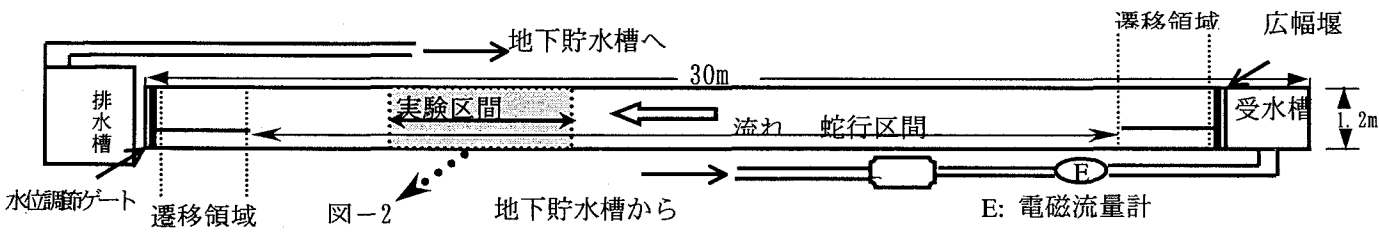


図-1 実験装置平面図

表-1 実験条件

	水深 m	流量 × 10 ⁻³ m ³ /s	相対水深	平均流速 m/s	レイノルズ数 × 10 ⁴	フルード数
Case1	0.05	5.74	0.000	0.383	1.44	0.63
Case2	0.06	7.50	0.167	0.326	0.82	0.66
Case3	0.10	26.3	0.500	0.479	2.63	0.65

表-2 水路諸元

外枠全長	30.0m	外枠全幅	1.2m
低水路幅	0.3 m	高水敷高さ	0.05m
蛇行波長	2.72m	蛇行長	2.86m
水路床勾配	1/1000	蛇行度	1.05

2. 実験方法

東京大学工学部1号館の地下実験室に設置された回流型実験水路の平面図を図-1に示す。可変勾配水路全長は30m、全幅1.2mで内側に塩化ビニル製の複断面蛇行水路が設置されている。循環型の実験水路であり、ポンプと受水槽をつなぐパイプの途中には電磁流量計が設置されており、この流量計はさらにADボードを通してコンピュータに接続されている。この流量計の値により、ポンプを制御するインバータの周波数が調節され、装置全体の流量が決まる。今回の一連の実験の開始前に、排水槽を計量槽として電磁流量計の校正を行った。

複断面蛇行水路の蛇行部は、中心角30度の二つの円弧部の間に、直線部(0.07m)をはさむ単位を半波長としている。全体では蛇行部を9波長設置し、上流から6番目の蛇行を実験区間に選んだ。1蛇行波長は2.72mである。ここでいう蛇行波長とは一蛇行単位の縦断方向の直線距離である。実験区間の拡大図を図-2に示す。図-2に見られるように、この実験水路においては、低水路、外郭堤防ともに蛇行しており、また外郭堤防法線の蛇行曲線は、低水路法線の蛇行曲線よりも32度先行している。本稿では、今後この水路を二重蛇行水路と称することにする。低水路の断面形状は長方形で、横幅0.3m、深さ0.05mであり、その両側に高水敷を配している。堤防法線も蛇行しているため、高水敷幅は縦断方向に変化する。蛇行度は1.05である。ここに蛇行度は、蛇行長/蛇行波長であらわされる。蛇行長は一蛇行単位の中心線上に沿う曲線距離である。

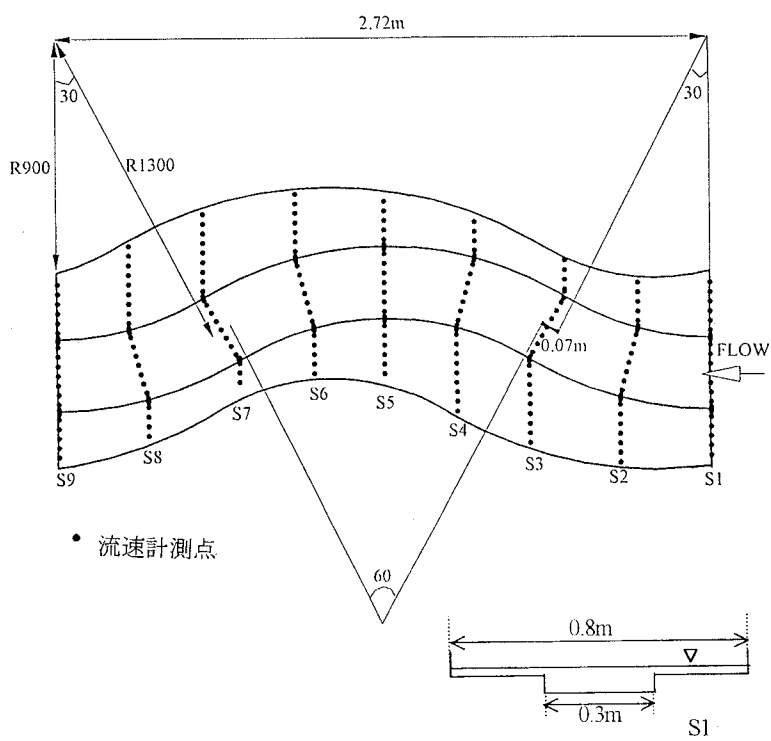


図-2 実験区間平面図、および横断面図

Leopold, Langbein は、自然蛇行河川の平面形状を分類した結果、蛇行流路の中心線の接線が水平線となす偏角が正弦波として変化するということを見出した¹⁴⁾。偏角を θ 、最大偏角を θ_0 、水路中心線に沿う曲線距離を s 、その一蛇行分の曲線距離を蛇行長 L とすると、以下の関係が成立する。

$$\theta = \theta_0 \sin\left(\frac{2\pi s}{L}\right) \quad (1-1)$$

この関係を満たす曲線は一般に Sine Generated Curve (蛇行流路曲線) と呼ばれる。今回の実験で用いた水路はこの Sine Generated Curve で近似できる。実験水路の諸元は、蛇行長 $L=2.86m$ 、最大偏角

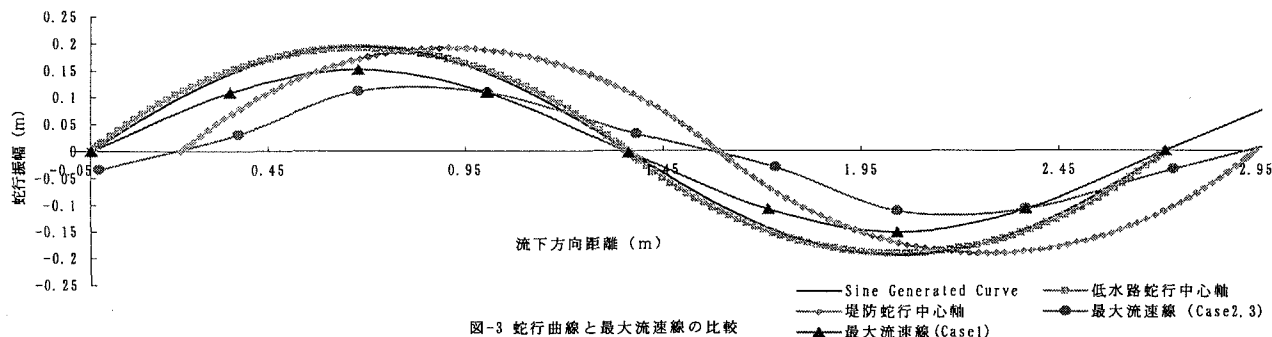


図-3 蛇行曲線と最大流速線の比較

$\theta=30$ 度、であるが、実験水路が厳密には直線と円弧の組み合わせで構成されるため、思考錯誤的に値を変化させた結果、最大偏角 $\theta=25$ 度で実験水路の蛇行中心曲線と、Sine Generated Curve が一致することが示された。その結果を図-3 に示す。

流速は電磁流速計を用いて測定された。I 型、L 型、2 種類の電磁流速計を用いており、これによって流速 3 成分が計測可能である。流速計測地点は図-2 の平面図に黒丸で示されている。実験条件は表-1、水路諸元は表-2 に示している。蛇行水路においては、低水路中心軸に沿う勾配は、水路床勾配よりも緩やかになるが、ここでは水路床勾配を記述している。相対水深は、高水敷上水深/全水深で定義されている。今回の実験では、比較のために単断面蛇行流を想定した水深 (Case1)、高水敷上に水が乗り上げた直後を想定した水深 (Case2)、さらに洪水時の最高水深を想定した水深 (Case3) の 3 通りについて実験を行った。

3. 平面流速ベクトルの分布について

相対水深の変化による、高水敷高さ付近の主流速分布の変化を見るために図-4 を示す。図-4 は Case1 に関しては低水路底面より 4cm、Case2, 3 に関しては低水路底面より 5cm (高水敷高さ) の位置の平面内の流速ベクトルを表したものである。Case1 の場合、高水敷上に流れが存在しないため、単断面蛇行水路内の流速ベクトルということになる。Case1 では、主流部が低水路中心軸上から、若干、低水路内岸側に寄っているのがわかる。これは固定床単断面蛇行水路内の流れ場の一般的な挙動を示しており、圧力勾配が最大になる方向、つまり流路内の最短距離を通る方向に主流部が移動している。しかしながらこの水路では湾曲の影響が比較的少なく、曲率半径方向への遠心力がそれほど大きくないことも予想される。一方 Case2, 3 に関しては、Case1 と比べて、主流部がより低水路内岸寄りに移動しているのがわかる。これはより強い 2 次流の存在を示していると思われるが、2 次流の詳細は次節に譲る。Case2, 3 を比べてみると、その主流部の発生位置は、今回の実験では相対水深によっていない。前述した図-3 にはさらに、この主流部の中央の曲線 (最大流速線) と、低水路と外郭堤防それぞれの蛇行中心曲線を示して

いる。図-3 から、まず Case1 の場合、最大流速線の位相が低水路中心曲線の位相に一致しているのがわかる。Case2, 3 の場合には、堤防中心曲線と最大流速線の位相が一致しているのがわかる。これは言いかえると、今実験で高水敷上に流れが存在する場合、最大流速線の発生位置は、外郭堤防の形状、位相に規定されており、逆に言えば、外郭堤防の形状、位相を適当にとることにより、主流部の発生位置を制御することが出来る可能性を示唆していると思われる。木下らが主張する最適複断面河道の提案によると、最大流速線 (主流部) が低水路法線内に含まれる法線配置が最適ということになる。その場合、今実験のような固定床二重蛇行水路においては、堤防法線と低水路法線の位相を一致させるのが最適ということになる。無論、今実験のみでの結論は早計ではあるが、本報告は固定床での法線配置に関するひとつの示唆になると思われる。次に図-5 に Case2 における低水路底面より 1cm と 5cm (高水敷高さ) の位置の流速ベクトルを示す。この図-5 から高水敷高さの流れの流向が、水路床付近の流向と異なること。また水面付近の流速が、水路床付近の流速よりも小さいことがわかる。これは低水路流れが高水敷上に乗ることにより、高水敷高さ付近の低水路流れの流向が、堤防法線に沿う高水敷流れの流向に近づくこと。また流速の速い低水路流れと、流速の遅い高水敷流れとの間に運動量の交換が生じるため、高水敷高さ付近の低水路流れが運動量を失って、流速が遅くなることを示していると思われる。また図-3~4 からは、高水敷流れが、断面 S8 (前波長) ~S3 の右岸側、S4~S7 の左岸側付近で、低水路に戻り、また逆に低水路流れが、断面 S8 (前波長) ~S3 付近の左岸側、S4~S7 付近の右岸側で高水敷に乗り上げている様子がわかる (矢印)。この厳密な位置は流況により、縦断方向に変動があることが予想される。よって今後更に細かく調べる必要があるが、ここでも大まかな流れの挙動は読みとれる。さらに図-6 には、Case3 での異なる 2 水深における流速ベクトルを示す。この図から Case2 の場合と同様に、低水路底面付近の流れは低水路法線に沿って、低水路より 8cm の位置の流れは、外郭堤防法線に沿うようにして流れているのがわかる。

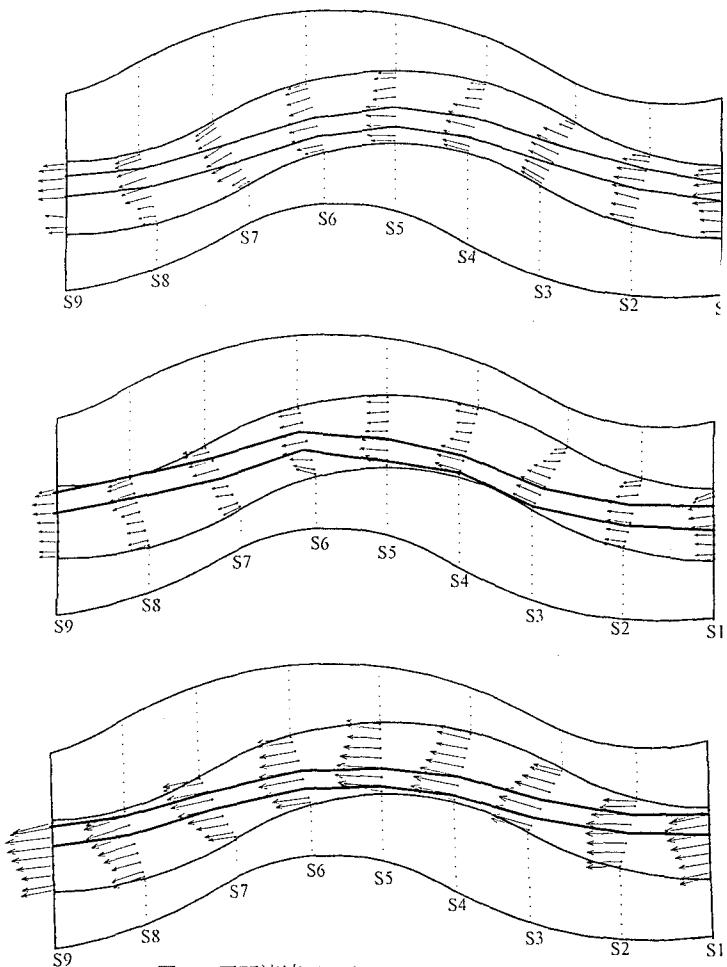


図-4 平面流速ベクトル

Case1 (上): 低水路底面より 4cm

Case2 (中): 低水路底面より 5cm

Case3 (下): 低水路底面より 5cm

60cm/sec

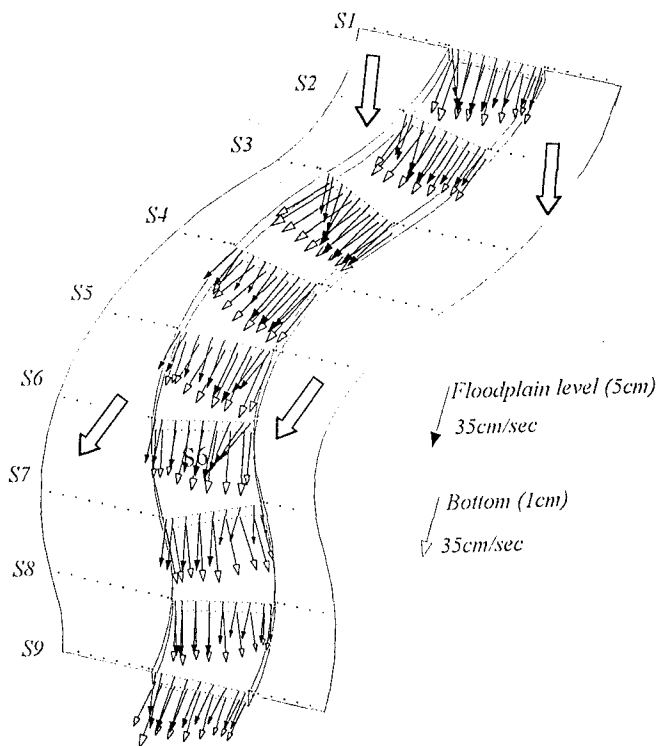


図-5 Case2における、低水路底面より 1cm および 5cm の流速ベクトル

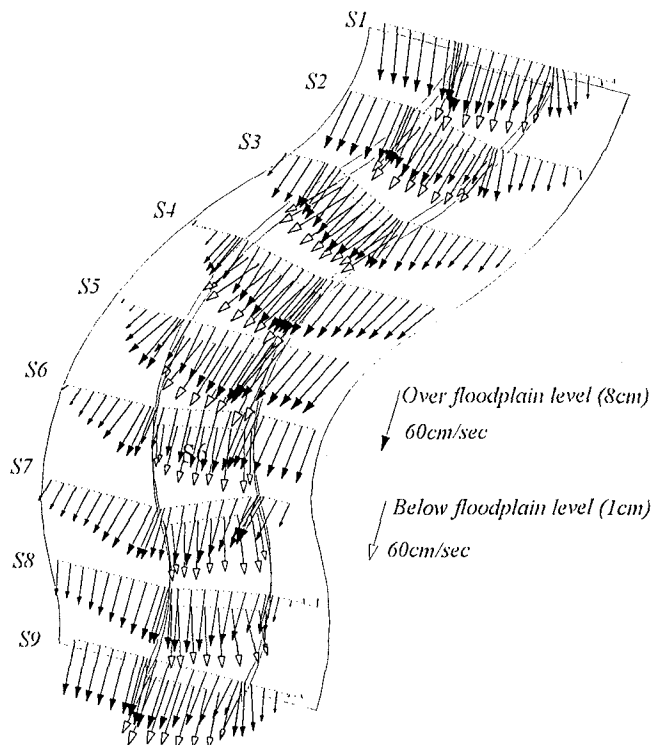


図-6 Case3における、低水路底面より 1cm および 8cm の流速ベクトル

4. 2 次流について

図-7 に Case2, 3 における横断面内の二次流構造を示す。ここでは流れの対称性を考慮して半波長分、断面 S1 から S5 までの横断面図を示している。断面位置については、図-2 を参照されたい。断面 S5 から S9 における 2 次流構造は、断面 S1 から S4 までのそれと、ほぼ左右対称な構造を示すことが確認されている。断面 S1 では左岸水面付近で時計回りの 2 次流。右岸水底隅角部で流速分布変化が見られる。左岸水面付近の 2 次流は、1 つ前の湾曲部で発生した 2 次流の残存成分であると思われる。断面 S1 においては、右岸水底付近の明確な 2 次流の構造は見えにくい、この位置で、右岸から低水路内に戻る高水敷流れと、低水路流れとの間に運動量の交換が起こり、それにより流速場の変化が始まっていると思われる。Case1 のような、単断面蛇行流路に一般に見られる遠心力に起因する 2 次流も無論生じていると思われるが、複断面蛇行流路では、高水敷流れと低水路流れとの間での、運動量の交換による二次流の影響がより顕著であると思われる。図-7 においてはまた、低水路右岸付近で、高水敷からの流れが低水路へ戻り、左岸で高水敷へ流れが乗り上げる様子がわかる。これらの一連の現象により、主流部の

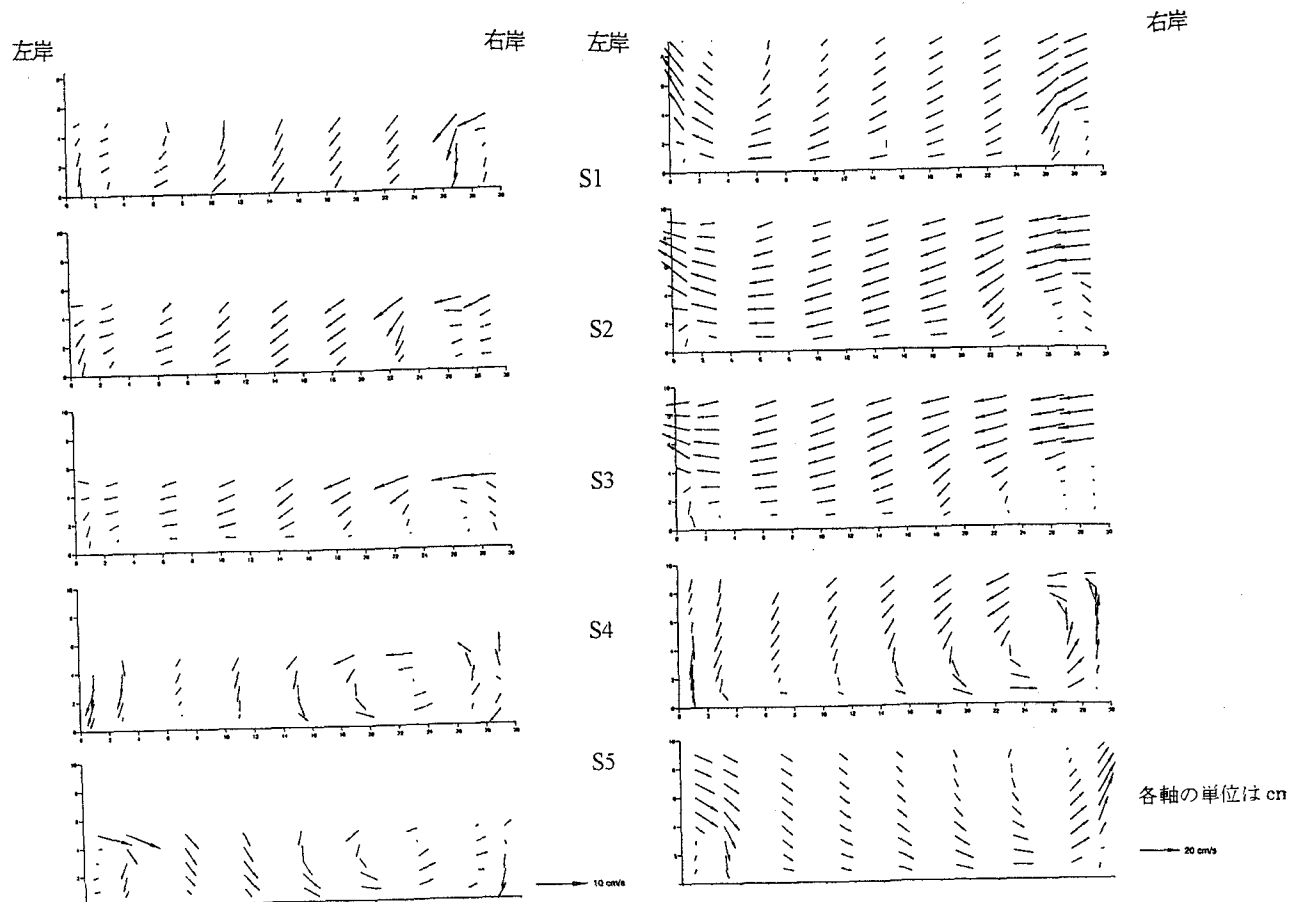


図-7 低水路上の2次流構造

左: Case2, 右: Case3

低水路内岸側への移動が起こっていること、つまり左右岸での運動量の交換に伴い、主流部の位置が変化していることが予想される。その後、流下するに従い断面 S1 で発生し始めた2次流はその大きさを拡大し、断面 S4 まで発達したのち、断面 S5 において、断面 S1 とは逆方向から進入してくる高水敷流れによって次第に打ち消される。その後の半波長はそれ以前とほぼ左右対称な流況を示す。これは Case2, 3 とともに、似たような傾向として見られる。このように二重蛇行水路においても、既往の堤防直線複断面水路の報告に見られる一連の2次流の発生、消散過程が見られるが、堤防直線複断面水路のそれとは異なり、両法線の配置により、高水敷流れと低水路流れの相互作用位置や方向などを制御し、それにより2次流の位置や強度を制御することが可能であると思われる。その意味で今後さらに研究が進められるべきであると考え。一方、2次流の水深方向の分布形に着目してみると、水面付近流速が最大となる分布形と、水深中央付近、あるいは水底付近で流速が最大となる樽型の流速分布形が混在している。Case2 に関してみると、右岸水底付近で発生している2次流を含む領域では、おおまかには水面付近に最大流速をもつ分布形が見られる。これは高水敷流れの進入によって、横断方向の水面付近流速が加速されているためと思われる。その後左岸側に近づくにつれて、反対方向から進入してくる高水敷流れに

より、水面付近の横断方向流速が減速され、樽型の流速分布を持つに至ると考えられる。同様に Case3 でも各種分布形が混在しているが、全体として水深中央付近で最大流速をとる樽型の分布形が目立つ。

5. 死水域について

次に堤防蛇行水路に特有と思われる現象を示す。図-8 に示すように、Case2, 3 では、高水敷上に死水域が発生している。死水域は、Case2 においては、高水敷上、断面 S2~S3, S6~S7 の間に発生し、Case3 では、高水敷、断面 S4~S5, S8~S9 の間に発生している。Case2 の場合は、図-5 に見られるように、断面 S1~S2 付近では、堤防壁面が凸に曲がっているため、高水敷上の流れが急縮し低水路へ戻っていく。その結果、断面 S2~S3 の間に急激な水深の減少と、それに伴う圧力低下による一種のキャビティが生じていると思われる。逆に Case3 の場合は、流量が多く、その流速が速いことから、断面 S1~S2 付近で水位の低下は見られるものの明確に死水域の存在は見られない。しかし Case3 の場合、断面 S3 以降、高水敷幅が漸拡することによる流速の減少と、低水路流れの乗り上げにより、下流方向へ向かって圧力勾配が増加し（逆圧力勾配）、最終的に死水域が発生していると思われる。例えば Case3 の場合、断面 S3 と S4 においての高水敷上の流れの平均流速がそれぞれ、40.9cm/s, 22.7cm/s であり、上述した現象に

適合している。より厳密な位置を特定するためには、さらに詳細を調べる必要がある。図-8 には、Case3 における死水域付近の流速ベクトルを示す。この図にも明確な死水域の存在が見てとれる。

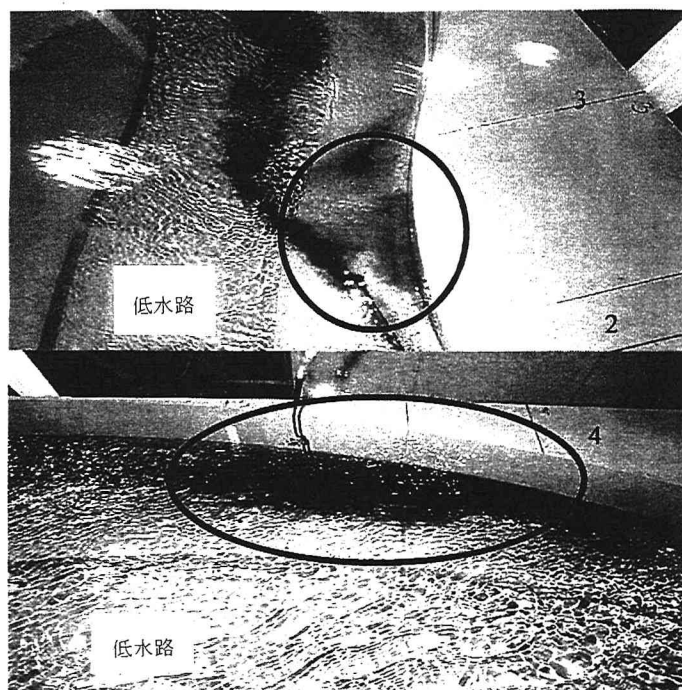


図-8 死水域の発生：Case2（上）、Case3（下）

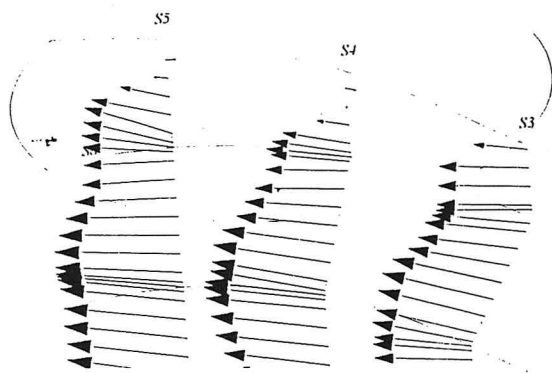


図-9 死水域付近の流速ベクトル

6. 結論

低水路法線、堤防法線が、共に蛇行する二重蛇行水路による今回の実験について、以下の事がわかった。

- 1) 今実験において、高水敷上に流れが存在する場合、最大流速線の発生位置は外郭堤防蛇行中心曲線と同位相の位置であり、またその位置は相対水深によっていない。これは低水路法線と堤防法線の配置いかんによっては、常に一定の位置に主流部を制御できる可能性を示していると思われる。
- 2) 高水敷流れと低水路流れの運動量交換による、横断面内の流速分布を示した。
- 3) 低水路法線の位相が先行する今回の二重蛇行水

路では、相対水深の相違により、異なる位置に死水域が発生し、その発生要因も異なることがわかった。

参考文献

- 1) Toebes G.H and Sooky A.A.: Hydraulics of Meandering Rivers with Flood Plains, J. Waterways and Harbors Div.Am.Soc.Civ.Engrs,WW2, May, PP213-236, 1967.
- 2) Kiely G.K.: Overbank Flow in Meandering Compound Channels, The Important Mechanisms, Int. Con. on River Flood Hydraulics,17-20 September, PP207-217, 1990.
- 3) Willetts B.B and Hardwick R.I.: Model Studies of Overbank Flow from A Meandering Compound Channel, Int. Con. on River Flood Hydraulics,17-20 September, PP197-205, 1990.
- 4) Willetts B.B and Hardwick R.I.: Stage Dependency for Overbank Flow in Meandering Channels, Proc .Inst Civ. Eng. Wat.Marit and Energy, 101Mar, PP45-54, 1993.
- 5) Sellin R.H.J, Irvine D.A and Willetts B.B.: Behavior of Meandering Two-Stage Channels, Proc. Inst.Civ Engr Wat.Marit and Energy, 101June, PP99-111, 1993.
- 6) Sellin R.H.J, Irvine D.A, Willetts B.Band and M.Lorena.: Factors Affecting Conveyance in Meandering Compound Flows, Jr. of Hydra Eng, vol119, No.12 .PP.1383-1398, 1993.
- 7) Greenhill R.K and Sellin R.H.J.: Development of a Simple Method to Predict Discharges in Compound Meandering Channels, Proc Ins Civ Eng. Wat.Mar and Energy, 101Mar, PP37-44, 1993.
- 8) 芦田和男ほか：蛇行低水路を有する複断面流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、pp527-551、1989
- 9) 芦田和男ほか：二層モデルによる複断面河道の流れおよび河床変動の数値解析、京都大学防災研究所年報第 35 号、B-2、pp41-62、1992
- 10) 武藤 裕則、塩野耕二、今本博健、石垣泰輔：複断面蛇行開水路流れの 3 次元構造について、水工学論文集第 40 巻、pp 711-716、1996.
- 11) 石垣泰輔、武藤裕則、澤井健二：複断面蛇行開水路流れの 2 次流構造と掃流力に関する実験的検討、水工学論文集第 43 巻、pp 329-334、1999.
- 12) 福岡ほか：水工学研究室論文集 1996,1997,1998,1999、広島大学工学部地球環境講座、水工学研究室.
- 13) 木下良作：洪水時の沖積作用調査と適性複断面河動に関する実験的研究、文部省科学研究費、自然災害特別研究研究成果、No.A-62-1、pp55-68.1998
- 14) 池谷毅：曲線流路における流れの 3 次元構造、東京大学博士論文、1985
- 15) 木下ほか：江戸川洪水流解析報告書、関東地方建設局江戸川工事事務所編、昭和 57 年 3 月.

(1999. 9. 30 受付)