

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

SECONDARY FLOW AND TRACTIVE FORCE
IN COMPOUND SINUOUS CHANNEL

石垣泰輔¹・武藤裕則²・澤井健二³

Taisuke ISHIGAKI, Yasunori MUTO and Kenji SAWAI

¹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)

²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)

³正会員 工博 摂南大学教授 工学部 (〒572-0074 寝屋川市池田中町17-8)

Over-bank flow in a straight channel with a meandering main channel is discussed based on experimental results. The flow structure is characterized by secondary flow and fluid mixing between the main channel and flood plain flow. The secondary flow was directly visualized by a submersible video camera. The secondary flow shows spiral motions and affects the distribution of boundary shear stress and sediment transport. The relation between these structure and the traction process of bed materials is discussed on the basis of the distribution of tractive force visualized by a new method. In the experiments, we used light materials whose critical tractive force is equivalent to the mean shear stress on the bed.

Key Words : compound channel, sinuous main channel, secondary flow, tractive force, visualization

1. はじめに

複断面蛇行流れの2次流構造を解明することは、低水路流れと高水敷上流れの相互干渉による付加抵抗の評価、底面せん断力分布や河床形態の変化予測の基礎となるものであり、従来、いくつかの研究が続けられてきた^{1) - 7)}。著者らも低水路が蛇行した複断面開水路流れを対象に、速度計測、底面せん断力計測および流れの可視化法などを用いた実験的検討を行ってきた^{8) - 12)}。

流れの構造は、Willettsら⁴⁾、Ervineら⁵⁾、福岡ら⁷⁾、および著者ら¹¹⁾によって図化されているが、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⁷⁾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。

これらの知見は、速度計測結果や流況観察結果に基づいたものであるが、2次流構造を直接可視化した研究はない。そこで本研究では、図-1に示すような緩やかに蛇行する低水路を有する複断面流れ¹⁾の2次流構造を、横断面可視化法を用いて検討することとした。また、2次流構造と掃流力分布との関係を、その分布を可視化する方法を用いて検討している。

なお、前述したように、研究者により実験条件および2次流構造に関する知見に差異があるため、ここでは、

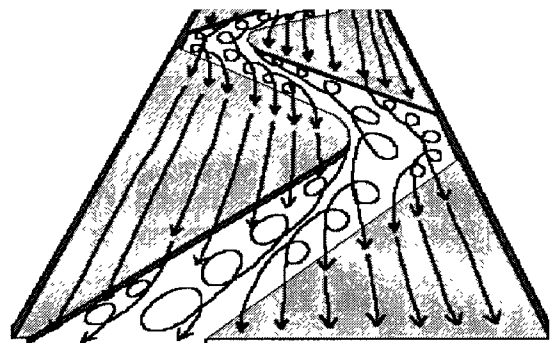
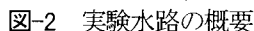


図-1 2次流構造の模式図¹²⁾



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
0.20	6.34	5.409	2.47	19.4	0.39	4800
0.25	6.65	6.277	2.73	20.3	0.39	5500
0.30	7.16	7.763	3.16	21.5	0.39	6800
0.35	7.74	10.391	3.62	24.8	0.42	9000
0.40	8.37	13.368	4.12	27.8	0.44	11500
0.50	10.07	21.242	5.42	32.6	0.45	17700

著者らの見解^{11)、12)}に基づいて検討を進める。その構造とは、図-1に示すように、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、その後の下流側の高水敷へ乗り上げて行くという基本パターンが、左右両岸で交互に繰り返される、と言うものである。

トを用いて画像処理した。なお、取り込んだ画像は、毎秒30枚で、画素数は340x240ドットであり、インターレース処理後、トレーサの輪郭検出を行った。なお、ビデオカメラの形状寸法（幅50mm、高さ65.5mm、奥行き103mm）の流れに与える影響を考慮し、ここではDr=0.50の結果のみを用いた検討を行う。

(1) 実験方法

実験に用いた水路は、従来の研究¹¹⁾で用いたもので、幅1m、長さ16mの長方形断面直線水路内に、図-2に示した直線と円弧からなる形状の高水敷を左右兩岸に設置した。なお、低水路幅は30cm、蛇行度($s = \text{蛇行長} / \text{蛇行波長}$)は $s = 1.11$ である。また、実験条件は、表-1に示すように、低水路内に流れが限定されるbankfullの条件から相対水深($Dr = \text{高水敷上水深} / \text{低水路水深比}$)が0.50までの流れを対象とした。

横断面流況の可視化は、防水型ビデオカメラを低水路内に沈め、幅20cmのスリット光で照明した中立粒子の挙動を30cm下流より撮影する方法を用いた。トレーサには、平均粒径0.45mm、比重1.05のポリスチレン粒子を用い、得られた映像をパソコンに取り込み、市販のソフ

図-3は、付図に示した3区間、すなわち、apexより10cm～30cm、30cm～50cmおよび50cm～70cmの区間を照明した場合の横断面流況可視化例である。右岸側は3フレーム（1/15秒間）、左岸側は4フレーム（1/10秒間）の結果を重ね合わせたものであり、特徴的な粒子の挙動を矢印で示している。なお、同程度の粒子密度を得るのに左右岸のフレーム数が異なるのは、図-1に示した流れの構造により、右岸側では粒子が集中するのに対し、左岸側では拡散するためである。

図より、左岸側(右図)では低水路内(下層)にらせん構造が存在して流下とともに高水敷高さスケールまで発達して徐々に水路中央側に移動して行く状況が確認されるとともに、高水敷上流れ(上層流れ)の一部分が、らせん流の外縁に沿って低水路底面まで達することが知れる。この構造は、図-4に示した染料を用いた可視化結果でも明瞭に確認されている。図の結果は、apex(図中

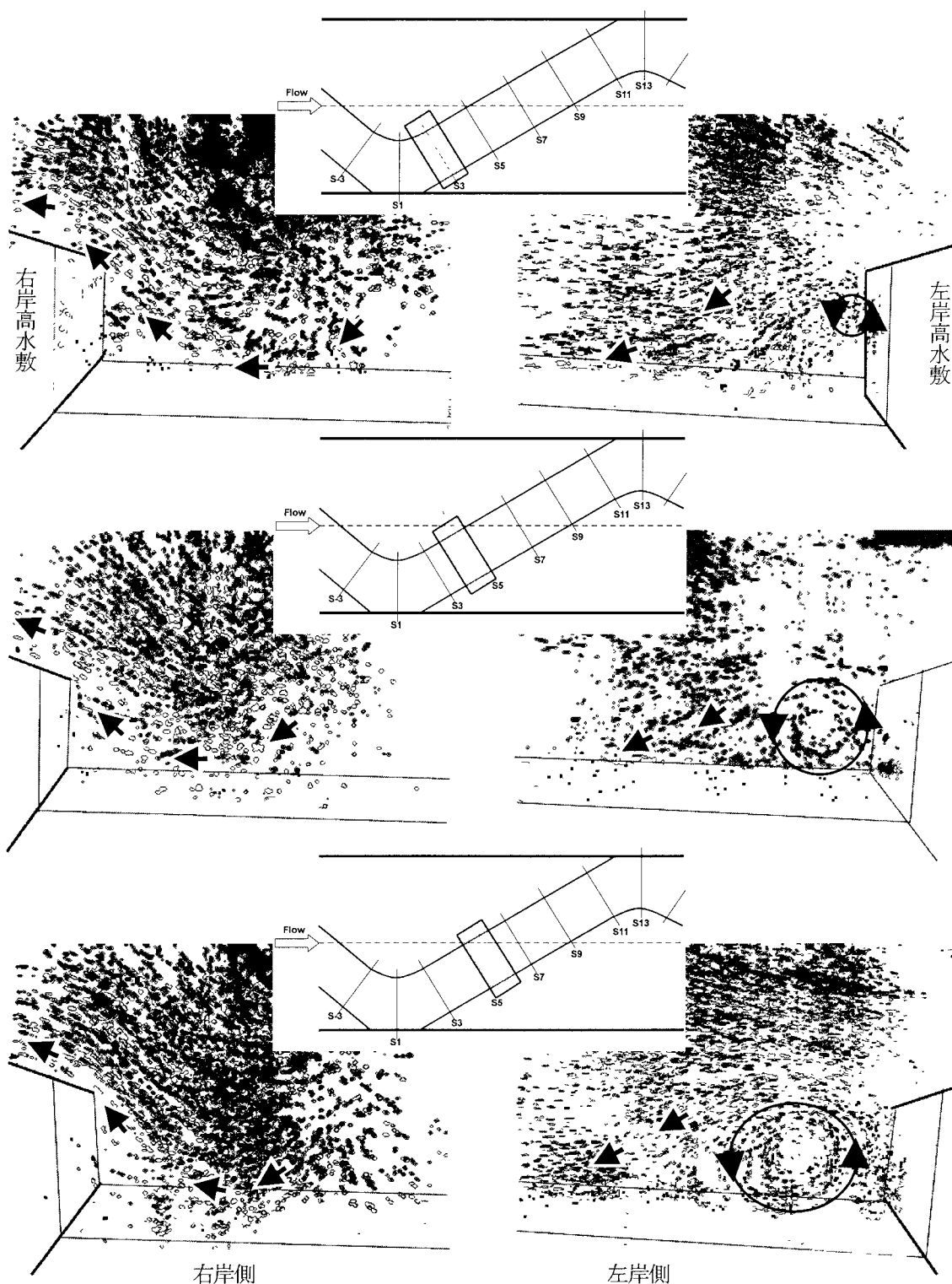


図-3 横断面流況可視化結果

S1) から注入した染料が示すらせん流の発生、および、円弧部分の下流端（図中S3）から注入した染料のらせん流の発達と上・下層のシアーによる混合を示している。なお、この結果は、前述した水路の1/2.5スケールの水路において、断面平均流速を5cm/sとした定性的検討結果である。

一方、右岸側（図-3の左図）では、いずれの断面においても、低水路内の流れが時計回りに回転しながら高水敷に乗り上げる構造が見られ、流下に伴って横断方向スケールが減少して行く状況が見られる。

以上の結果と図-1とを比較してみると、apex付近で発生した低水路内のらせん流が上層の流れに加速されなが

(a) S1から染料注入



(b) S3から染料注入

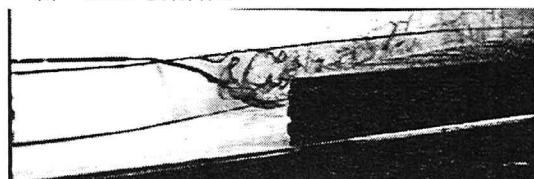


図-4 縦断面流況可視化結果（斜め撮影）

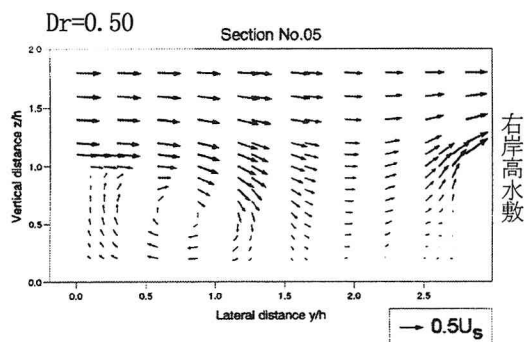
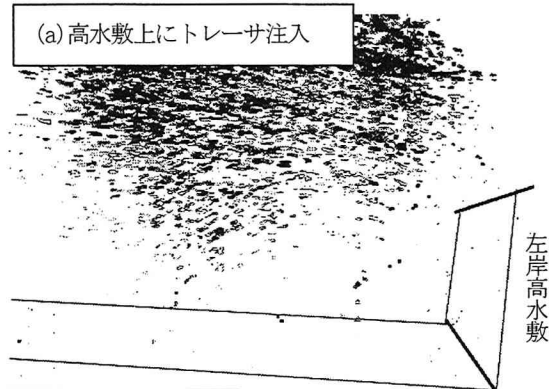


図-6 2次流ベクトル分布⁸⁾

(a) 高水敷上にトレーサ注入



(b) 低水路内にトレーサ注入

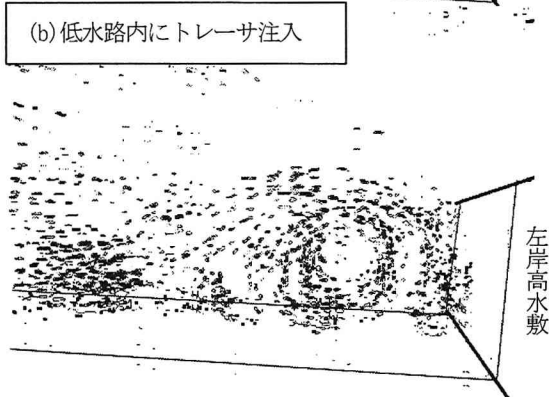


図-5 上層および下層の横断面流況

表-2 掃流力分布の可視化実験に関する条件

Dr	Um	H	$Uf=\sqrt{gRI}$	$Uf=\sqrt{gHI}$	d=1.6mm Ufc=1.51 Uf/Ufc	d=2.4mm Ufc=2.37 Uf/Ufc
Bankfull	28.1	5.00	1.95	2.25	—	0.82-0.95
0.15	19.2	5.95	1.47	2.45	0.97-1.62	—
0.35	24.8	7.74	1.91	2.80	—	0.81-1.18
0.50	32.6	10.07	2.34	3.19	—	0.99-1.35

勾配：I=1/970、スラジライト：比重1.7、粒径d=1.6mmおよび2.4mm、Ufc：限界摩擦速度

ら発達して低水路中央に移動して行く構造が確認される。また、上流側で発達した右岸側のらせん流が高水敷に乗り上げながら減衰して行く構造が確認できるが、福岡ら⁷⁾が指摘しているapex外岸側でのらせん流の消滅や、2重らせん構造の存在は確認できない。なお、福岡らの実験は蛇行度1.17と本実験条件に近いが、低水路のアスペクト比が11.1であり、本実験の6よりも大きい。

図-3右下段の図は、高水敷上にトレーサを注入した画像と、低水路内に注入した画像を合成したものであり、それぞれ、分離して示すと図-5のようになる。この図より、らせん流が下層で発達することが知れるとともに、らせん流の外縁を水路中央に向かう流れが対岸で高水敷に乗り上げる流れとなる可能性が示唆される。この可能

性は、図-6に示した同程度の蛇行度を有する水路における2次流ベクトルの計測結果⁸⁾（本実験でのS7断面に相当する）からも伺えるが、本研究で用いた低水路のアスペクト比（高水敷高/低水路幅）が計測時のアスペクト比よりも大きいこと（本研究：6、計測時：3）を考慮すると、明確な結論を出すことはできない。

3. 掃流力分布の可視化実験

(1) 実験方法

2次流構造が底面せん断力分布に影響することを、底面せん断力の点計測結果^{9)、10)}で示したが、ここでは、

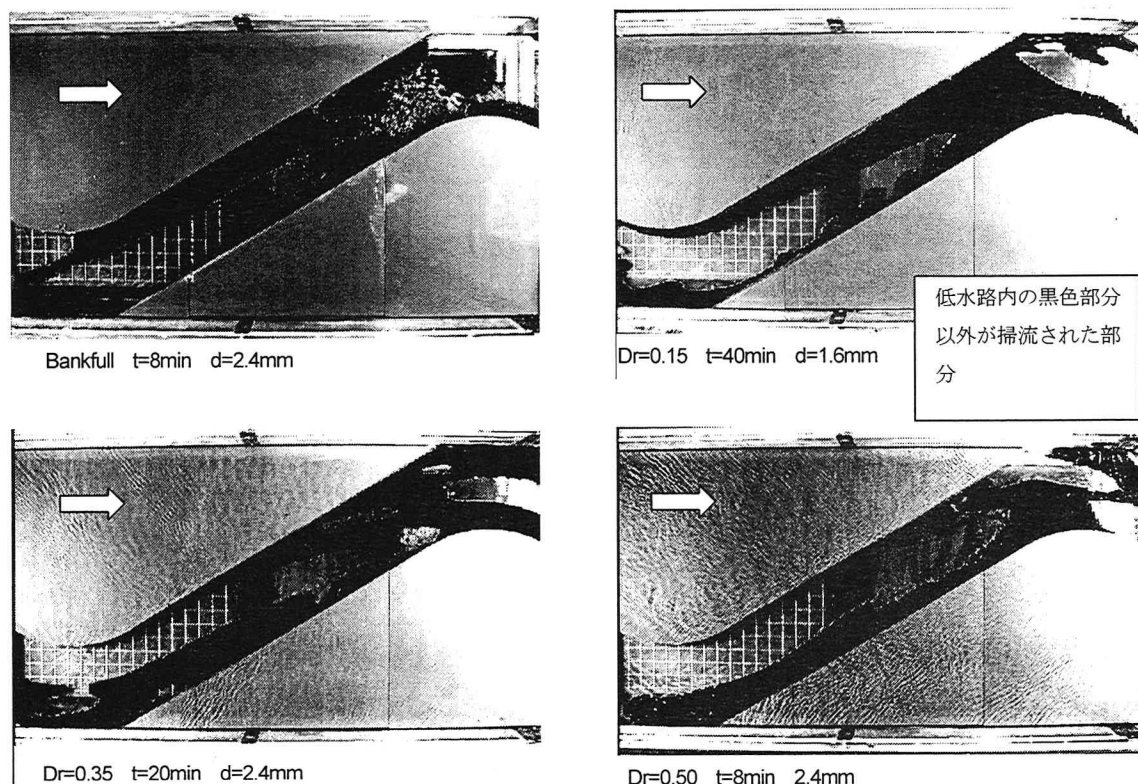


図-7 掃流力分布の可視化結果

平面的な分布と流れの構造との関係を検討するため、掃流力分布の可視化を行った。実験は、設定された水理条件での限界掃流力に近い河床材料を用いて掃流力の大きな領域を検出する方法を用いた。予備実験の結果、球形のスラジライト（平均粒径は1.6mmと2.4mmを使用、比重は1.7）を用いることとし、表-2に示す4種の条件について、一様粒径の限界掃流力に関する岩垣の実験式¹³⁾を用いた限界摩擦速度の算定結果と、対象とする水理条件から径深および低水路水深を用いて評価した摩擦速度との比が1.0前後となる粒子径を選んだ。実験は、観測区間の上流1/4波長から観測区間下流端まで厚み2～3mmでスラジライトを静水中で敷き、設定流量を流し、水路上方に設置したビデオカメラで河床材料の掃流過程を撮影し、掃流範囲の変化を撮影した。

(2) 掃流力分布と流れの構造

図-7は、bankfull、 $Dr=0.15$ 、 0.35 および 0.50 において平衡状態に達した時点での結果を示している。図において、低水路内の黒い部分には河床材料が残っており、それ以外の範囲は水路床が見えていて、この部分の河床材料が掃流されている。掃流された部分は、掃流力が大きな部分である。なお、流れは、左から右である。図より、bankfullの流れでは蛇行低水路の外岸側に掃流力の大きな領域が存在するのに対し、 $Dr=0.50$ の場合には内岸側に存在していることが明瞭であり、流れの構造、すなわち、福岡ら¹⁴⁾の実験結果でも示されているように、

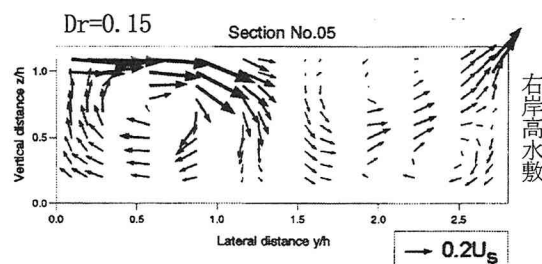


図-8 2次流ベクトル分布⁸⁾

2次流構造の違いが表れている。これは、前者の流れでは、遠心力に起因する2次流構造が卓越するのに対し、後者の流れでは、鉛直シアによる2次流構造が卓越するため、上流側のapex付近で発生して発達したらせん流の作用で内岸側の掃流力が大きくなるという説明ができる。

上段右の図は、 Dr の小さな場合（0.15）の結果であり、主流部が掃流されて粒子が無くなるとともに、高水敷への乗り上げ部に波状の文様が見られ、非常に複雑な構造の存在が伺える。これは、図-8の2次流ベクトル計測結果（本実験のS7断面に相当）に見られる右側の隅各部に向かう流れが引き起こすものと考えられる。また、下段左側の $Dr=0.35$ の結果が示しているように、掃流される部分が流れ方向に複数箇所存在している。これは、低水

路の直線部分が長くなると、apexで発生したらせん流が流下に伴って発達しながら対岸側に移動するため、その下流側に新たならせん流が発生するためと考えられ、図-1に示したように、複数のらせん構造が存在するようになる。

4. おわりに

本研究により得られた主な結果を列挙すると以下のようである。

- 1) 防水型ビデオカメラを用いた横断面流況可視化法により2次流構造が直接捉えられるとともに、流れと粒子の限界掃流力を考慮した方法により掃流力分布が可視化された。
- 2) 横断面流況の可視化結果より、apex付近かららせん流が発生し、流下とともに発達することが直接確認された。一方、対岸側では上流側で発達したらせん流が高水敷に乗り上げながら減衰することが確認された。福岡ら⁷⁾の指摘したapex外岸でのらせん流の急激な減衰は確認されず、apex下流の対岸にその構造が見られた。また、対岸側の構造は、らせん流の外縁を低水路底面に向かう流れが対岸に達して高水敷に乗り上げている構造である可能性が示唆された。
- 3) 掃流力分布が2次流構造に大きく影響されることが示された。また、低水路の直線部が長い場合には、複数のらせん流が発生し、それに対応する掃流力の大きな部分が複数存在することが示された。

本研究は、洪水時の複断面蛇行河道における流れの水利特性を検討することが目的であり、ここでは、流れの構造と掃流力分布の関係について検討したが、今後は、低水路を移動床とした実験を行い、流れの構造が低水路の河床形態に及ぼす影響、水利構造物が流れの構造や河床形態に及ぼす影響等について検討して行く予定である。

参考文献

- 1) Toebe, GH and Sookv : AA, Hydraulics of meandering river with flood plains, Proc. ASCE, Vol.93, No. WW2,

- pp. 213-236, 1967.
- 2) 今本博健、石垣泰輔：複断面弯曲開水路流れの水利特性に関する実験的研究、第27回水利講演会論文集、pp. 67-72、1983.
- 3) Arnold : U., Zur bilddaten- und modellgestutzten Bestimmung der Schadstoffausbreitung in naturnachen Fließgewässern, Mitteilungen, IWW, RWTH Aachen, Nr. 52, 1987.
- 4) 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.
- 5) Irvine, DA, Willetts, BB, Sellin, RHJ and Lorena, M. : Factors affecting on conveyance in meandering compound flows, J. Hydr. Eng., Vol. 19, No. 12, pp. 1383-1399, 1993.
- 6) Shiono, K., Muto, Y., Imamoto, H. and Ishigaki, T. : Flow structure in meandering channels for overbank, MAFF, Conf. River and Coastal Engineers, 1994.
- 7) 福岡捷二、大串弘哉、加村大輔、平生昭二：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、1997.
- 8) Muto, Y. : Turbulent flow in two-stage meandering channels, Doctoral thesis submitted to University of Bradford, UK, 1997.
- 9) Ishigaki, T., Muto, Y., Takeo, N. and Imamoto, H. : Fluid mixing and boundary shear stress in compound meandering channel, 27th Congress of IAHR, A, pp. 763-768, 1997.
- 10) 石垣泰輔、武藤裕則：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、1998.
- 11) 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、水工論文集、第42巻、pp. 943-948, 1998.
- 12) Ishigaki, T., Muto, Y. and Sawai, K. : Traction process of bed materials by three dimensional flow in a compound meandering channel, 3rd Int. Conference on Hydro-Science and -Engineering, Advances in Hydro-Science and -Engineering, Vol. III (on CD-ROM).
- 13) 例えば、水利公式集、p. 222、土木学会、;1985.
- 14) 福岡捷二、渡辺明英、加村大輔、岡田将治：複断面蛇行流路における流砂量、河床変動の実験的研究、水工論文集、第41巻、pp. 883-888、1997.

(1998. 9 30受付)