

低水路側岸近傍の三次元流況について

石垣泰輔・武藤裕則・竹尾然生*

*京都大学大学院工学研究科

要 旨

複断面流れの構造は、水路の平面形状および横断面形状に支配されるとともに、低水路水深によっても変化する。この流れ特有の構造は、速度の異なる低水路流れと高水敷上流れが相互に干渉する低水路側岸近傍に見られる。ここでは、水路側壁の形状（直線水路、蛇行水路）と低水路形態（直線、屈曲、蛇行）の組合せで分類し、4種の複断面水路（直線・直線、直線・屈曲、直線・蛇行、蛇行・蛇行）における実験結果を用いて低水路側岸近傍の三次元流況の差異について検討した。その結果、混合形態と二次流構造でそれぞれの流れが分類されること、いずれの流れにおいても低水路水深によって構造が変化する「構造の水深依存性」が見られることが指摘された。

キーワード：複断面流れ、直線・屈曲・蛇行低水路、流れの3次元性、流れの可視化

1. はじめに

複断面流れの構造は複雑であり、その主要因は、水路の横断面形状と平面形状にある。低水路と高水敷上の流れは、水深の違いにより横断方向に速度差が生じ、その境界部での流体混合が複雑な流況を生む。また、水路が蛇行することにより、遠心力に起因する二次流が発生し、さらに構造は複雑となる。本研究は、これらの流れの構造を、混合現象と二次流構造で分類するとともに、その普遍性について実験的に検討することを目的としている。著者らは、直線複断面流れ（石垣, 1993; 石垣・今本, 1995）、直線水路内で低水路が蛇行する流れ（Muto, 1997; Ishigaki et. al., 1997）、低水路および水路が同位相で蛇行する流れ（Shiono et. al. 1994）について実験的検討を行って来ている。ここでは、直線水路内で低水路が蛇行あるいは屈曲する流れに関する流れの可視化実験を中心に行った検討結果を加え、これらの流れの構造を統一的に説明することを目的とする。

なお、低水路形態は、蛇行長 l と蛇行波長 λ の比で定義される $\text{Sinuosity} = S I = l / \lambda$ で分類す

る。この、 Sinuosity は蛇行度あるいは屈曲度と呼ばれているが、ここでは土木学会水理委員会の報告書（芦田, 1982）で用いられている「屈曲度」を使用し、同報告書で引用されている Brice (1964) の定義を用い、水路形態に、直線 ($1.00 < SI < 1.05$)、屈曲 ($1.05 < SI < 1.30$)、蛇行 ($1.30 < SI$) の3種の表現法を用いている。

2. 複断面流れの構造の支配要素と特徴

複断面流れの構造を支配する要素は幾何要素であり、水路の形状および表面粗度が上げられる。一樣粗度の場合は、水路の断面形状および平面形状が支配要素である。ここでは、一樣粗度の複断面水路を対象とするが、非一樣粗度を有する複断面流れでは、粗度の効果により低水路流れと高水敷上の流れの速度差が一樣粗度の場合よりも大きくなり、速度差に起因する現象がより顕著になる。

水路形状は、横断面形状と平面形状で決定され、横断面形状では、左右対称の高水敷を有する水路では、水路幅 B 、低水路幅 b 、高水敷幅 $(B-b)/2$ 、高水

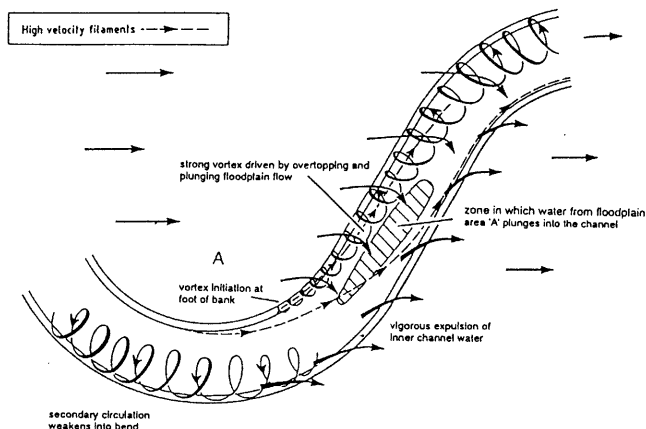


Fig.1 Flow structures in the flooded meander channel (after Ervine et al., 1993)

数高さ h , および低水路水深 H がハラメータであり, 平面形状では, 水路 (堤防法線) の形状 (直線, 屈曲, 蛇行) と低水路形態 (直線, 屈曲, 蛇行) の組合せと, 屈曲あるいは蛇行の位相差がハラメータである。このように, 複断面流れを支配する要素は多く, その組合せは多種にわたるため, ここでは, b/B が小さく, 水路と低水路に位相差が無い場合のケースを対象とする。また, 低水路水深の増加によって, 流況が変化するため, 低水路水深と高水敷上水深の比を相対水深 Dr と定義し, $Dr=(H-h)/H$ を変化した実験を行っている。

ここで取り扱う複断面水路は, 水路と低水路形態の組合せで, (A) 直線・直線, (B) 直線・屈曲, (C) 直線・蛇行, および (D) 蛇行・蛇行である。A の水路における流れの構造は, 低水路流れと高水敷上流れの速度差に起因する水平渦および斜昇流といった水深スケールの構造が支配的であり水平方向の混合が卓越する。C および D では蛇行の影響および高水敷上流れの低水路への流れ込みおよび低水路流れの高水敷への乗り上げといった平面形状スケールの構造が見られ, 鉛直方向の混合も生じると共に, 低水路水深の変化によってそれぞれの構造が影響する範囲が異なってくる。しかしながら, いずれの流れの構造も低水路水深の増加に伴って流れの構造が変化する特性は共通しており, 構造の水深依存性が指摘される。

以下では, B, C, D 形態の水路における流れの構造に関する実験結果を示し, それぞれの構造の特徴を指摘するとともに, 4 種の流れの構造の特徴をとりまとめる。

3. 蛇行複断面流れの構造

蛇行複断面流れに関する研究は, Toebees and Sooky(1967)が流量・水位曲線に関する研究を行って以来, 例えば今本・石垣(1983), Arnold(1987), Ervine et al.(1993), Shiono et al.(1994)によって流れの構造について検討されている。これらの研究により, 低水路流れと高水敷上の流れが鉛直混合すること, それにより付加抵抗が生じることなどが知られている。その構造は, Fig.1 (Ervine et al., 1993) に示されるように, 蛇行頂点 (以下, apex と呼ぶ) から発生したらせん流が水路蛇行の影響と高水敷より低水路への流れ込みによって発達し, やがて高水敷に乗り上げるといった複雑なものであることが指摘されている。また, このような構造の存在は, Shiono et al.(1994) および Muto(1997)の詳細な速度計測結果でも認められる。

ここでは, Ishigaki et al.(1997)の結果を用い, 直線・蛇行複断面流れの構造を水表面の可視化結果を用いて検討するとともに, 水路と低水路が同位相で蛇行する水路における結果も併せて示す。

3.1 直線・蛇行複断面流れの構造

用いた水路は, 長さ 20m, 幅 1.2m, 勾配 1/800 のコンクリート製直線水路内に, 高さ 5cm の木製高水敷を設置し, 幅 15cm で円形部 (中心角 120 度) と直線部 (長さ 37.4cm) を組み合わせた屈曲度 $SI=1.37$ (波長: 184.8cm, 蛇行長: 252.7cm) の蛇行低水路を有する複断面水路である。計測は, 全区間 7 波長中, 上流より 4 ~ 5 波長で行った。

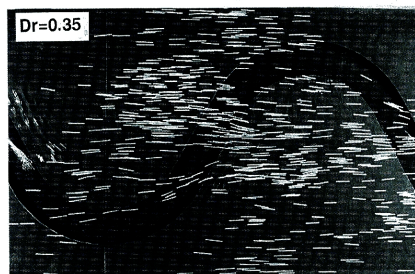
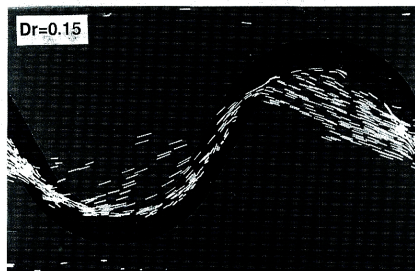
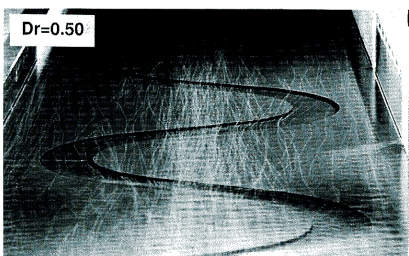
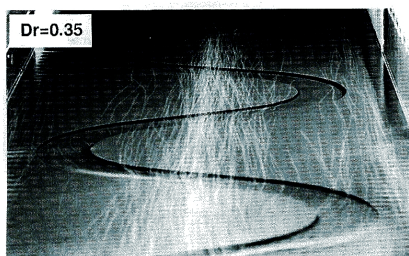
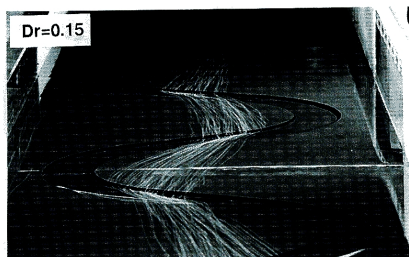


Photo 1 Bird's-eye view of flows on the water surface varying with relative depth Dr .

Photo 2 Top view of flows on the water surface varying with relative depth Dr .

Photo 1 および Photo 2 は、5mm 角の紙片をトレーサとして用いた水面流況の可視化結果であり、Photo 1 は下流より撮影した斜め写真、Photo 2 は鉛直上方より撮影した写真である。いずれの場合にも、上流で供給したトレーサは速度の速い主流部に集まり、相対水深 Dr が小さな場合には低水路、高水数、低水路と蛇行しながら流下するのに対し、 Dr が大きくなるにつれて水路全体に広がるとともに、直線的に流下することが知れる。これは、水深変化に応じて流れの構造が変化していることを示しており、構造の水深依存性が認められる。この結果より、低水路蛇行の影響が水面流況に現れるのは、 $Dr=0.35$ 付近と考えられ、さらに相対水深が大きくなると、低水路内の流れと高水数上の流れが別れて2重構造を有するようになると考えられる。

Photo 2 は、露光時間 1/4 秒で撮影されたもので

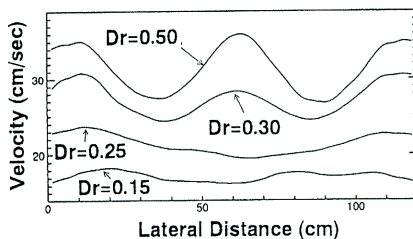


Fig. 3 Lateral distributions of longitudinal mean velocity on the water surface.

あり、トレーサの軌跡長を計測することにより速度を計算することが可能である。定常流を対象としているため、トレーサが水路全体に存在するように散布してバスラインを十数枚撮影し、全てのデータを

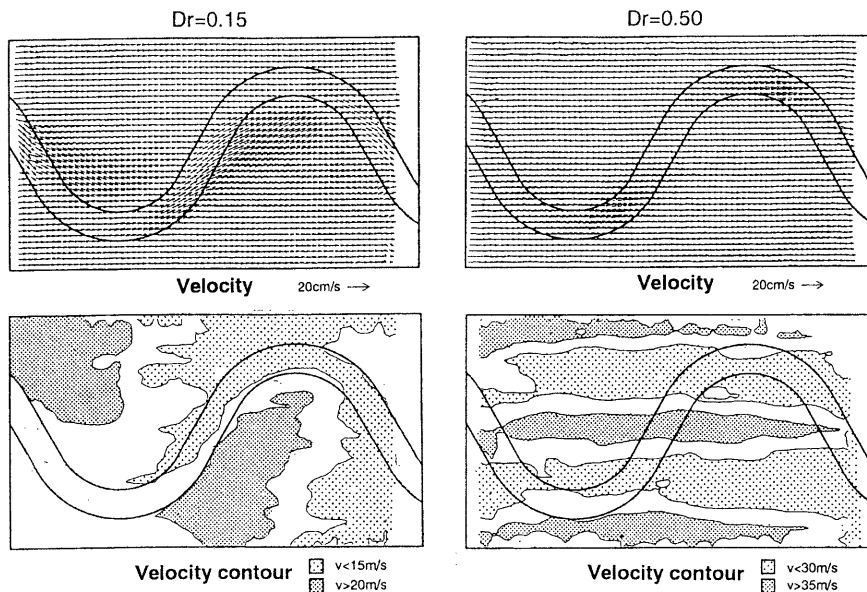


Fig.2 Velocity vectors (upper) and velocity contours (lower): $Dr=0.15$ and $Dr=0.50$, in compound open channels with meandering channel.

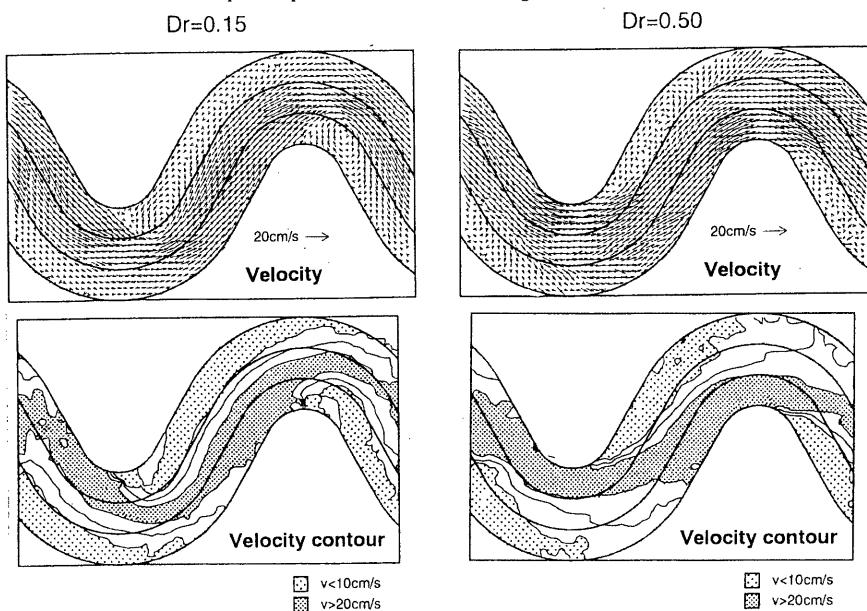


Fig.3 Velocity vectors (upper) and velocity contours (lower): $Dr=0.15$ and $Dr=0.50$, in meandering compound open channels.

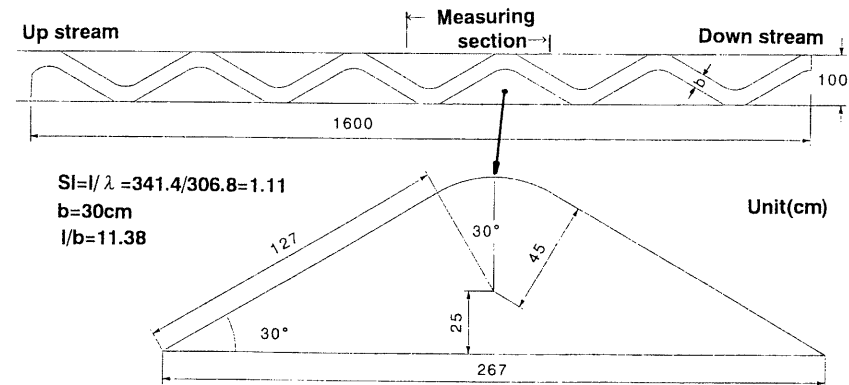


Fig.5 Experimental set-up of a compound open channel with meandering main channel

Table 1 Hydraulic condition

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

Height of flood plain: $h=5.079\text{cm}$. Bed slope: $1=1/970$

重ね合わせた後、距離の逆数で重み付けした内挿法を用いて得られた水面の格子点における2次元速度ベクトルと流れ方向成分の等速度線を描いたものがFig.2である。上段が速度ベクトル、下段が等速度線図であり、相対水深の小さなケースと大きなケースを対比させて示している。図より、明らかに、水面における速度分布は異なっており、低水路蛇行の影響は、Drの小さな範囲で強く、大きくなるとapexの極近傍のみに限定されることが分かる。この低水路水深によって流況が変化する現象は、水路横断方向に等間隔に設定した流れ方向軸に沿って蛇行1波長分のデータを平均した速度の横断分布を示したFig.3を見るとより明確であり、ここで用いた条件の水路では、Drが0.25～0.35の間で構造は変化していることが分かる。これは流況観察で得られる現象、すなわち、高水数に乗り上げた後に低水路に流入する流れの速度が増加するため、Fig.1のように低水路内には巻き込まれずに低水路の対岸に到達して乗り越えて行くようになる、という現象で説明される。したがって、Fig.1に示された構造は、Drの小さな範囲で顕著に見られることが分かる。

3.2 蛇行・蛇行複断面流れの構造

前節と同じ水路の高水数上に木製の高水数側岸を設置し、左右岸の高水数幅を15cmとした蛇行複断面水路を用いた。Photo 2と同様の方法でハスラインを撮影し、Fig.2と同様の方法で速度ベクトルおよび等流速線を描いたものがFig.4である。

図を見ると、Fig.2の結果とは大きく異なり、高水数のapex下流側に逆流域が生じ、その領域は相対水深の増大に伴って拡大している。一方、速度の速い主流域は、水路の蛇行位相より下流側にシフトした位相で下流し、低水路流れと交差した後、対岸の高水数側岸に衝突しており、相対水深が大きくなるにつれて直線的に流れるようになっていく。この結果より、水路と低水路が共に蛇行する複断面流れの構造が、直線水路の複断面流れとは大きく異なることが確かめられる。

4. 屈曲複断面流れの構造

以上の結果より、水路の平面形状が流れの構造を支配する重要な要素であることが知れ、平面形状と

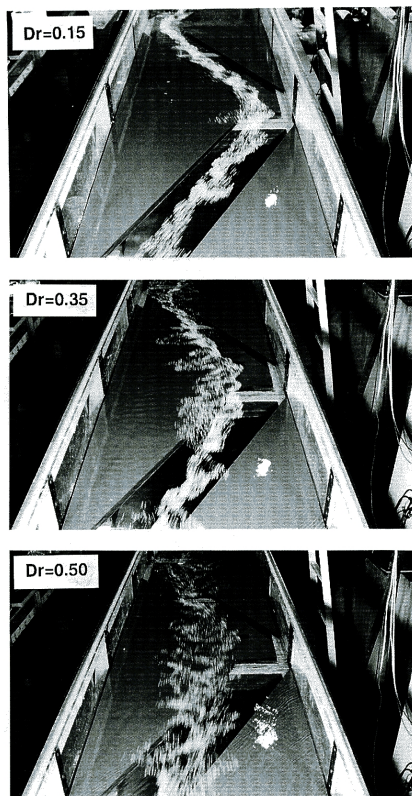


Photo 3 Bird's-eye view of flows on the water surface varying with relative depth Dr in compound channel with sinuous main channel.

流れの構造との関係を検討する必要性が指摘される。また、一級河川には、直線化された河道内を低水路が緩やかに蛇行あるいは屈曲している河道形状が多く見られることから、低水路の屈曲度が小さな複断面流れの構造を検討する必要性も高い。したがってこれらの点を考慮し、その基礎的な検討として、屈曲度が小さな低水路を有する直線複断面水路における流れが、前述した蛇行複断面流れと同様の構造を有するか、構造の水深依存性は見られるか、について、可視化実験結果に基づいた定性的検討を行う。

4.1 屈曲複断面水路の形状と実験条件

Fig.5 に示すように、長さ 16m、幅 1m の直線水路内に図に示す寸法の木製高水敷を設置し、低水路

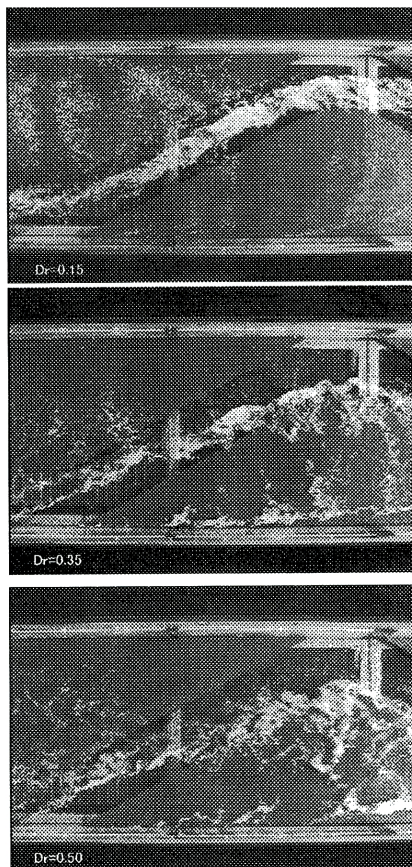


Photo 4 Top view of flows on the water surface varying with relative depth Dr in compound channel with sinuous main channel.

が屈曲した複断面水路を作成した。屈曲の程度は、 $SI=1.11$ とし、前述した分類の屈曲水路なるように設計した。また、低水路幅が狭い場合には対岸の影響があることから、なるべく広くするとともに、一級河川の計画断面形状のデータ（石垣，1993）をもとに低水路幅／河道幅比を 0.3 とした。さらに、屈曲角は砂州の移動限界を考慮して 30° とし、蛇行長が低水路幅の $1.0 \sim 1.2$ 倍程度を目標に、11.38 とした。なお、本実験に用いた水路の屈曲度と屈曲角は、Yalin(1992)が引用した実河川の屈曲角と屈曲度との関係を示すデータ（ロシアの河川）と一致しており、その妥当性が認められた。

実験は、Table 1 に示す水理条件の下で、おが屑をトレーサとした水面流況の可視化、中立粒子トレ

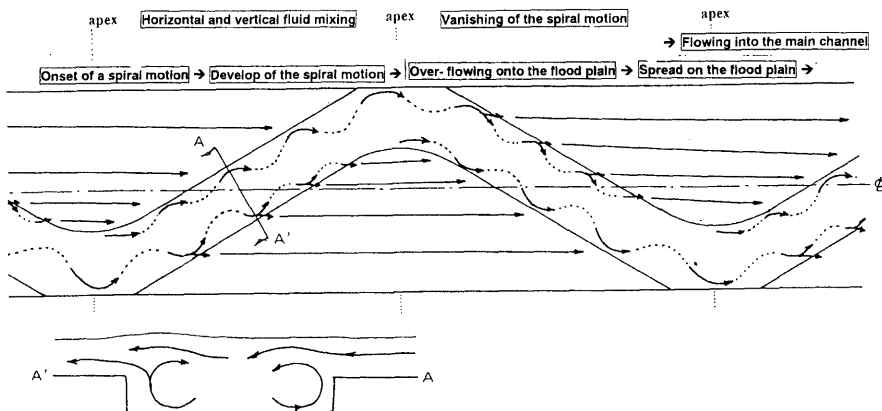


Fig. 6 Three dimensional flow structure of compound open channel with sinuous main channel.

一サ法による内部流況の可視化を、上流より3波長目の区間を対象に行った。

4.2 屈曲複断面流れの三次元構造

Photo 3 および Photo 4 は、水面流況の可視化結果であり、Photo 3 が下流より撮影した斜め写真、Photo 4 が鉛直上方より撮影した写真である。トレーサが集中する主流部に着目すると、低水路水深が増加する (Dr が大きくなる) につれて直線的に流れるようになり、構造の変化が見られる。これは蛇行複断面流れと同様である。このような構造の水深依存性は、武藤ら(1996)の詳細な速度計測結果でも確認されている。これより、上層の高水数上流れと下層の低水路流れは構造が異なること、それらは交差して鉛直に混合が生じ、流れが3次元構造を有していること等が分かる。なお、蛇行複断面流れにおける結果と比較すると、高水数に間欠的に乗り上げる様子が明確に見られることより、Fig.1 の構造がより顕著に表れていると考えられ、同様の構造が屈曲複断面流れに存在し、その構造がより明確に観察可能なことが知れる。

これらの結果および局所的にトレーサを供給して観察した結果、さらには中立粒子を用いた横断面内の流況観察を行った結果、apex 付近でらせん流が発生しそれが発達すること、相対水深が小さな場合に左岸側と右岸側に独立した構造が存在することおよびそれらが干渉して水平渦を形成すること、低水路への流れ込みによりらせん流の発達が促進されること、高水数への乗り上げが間欠的に生ずること、などが知れた。その結果、①屈曲頂点 (apex) 付近で発生するらせん流は、上流側で高水数に乗り

上げた後に低水路に流入する流れと混合して左岸側に沿って流下する。②右岸の流体は、低水路中央へ輸送されるものとわき上がる流れにより高水数上に広がるものがある。③ Dr の小さな範囲では左右岸の構造は独立した構造として観察され、低水路の左右岸に独立した構造 (らせん流あるいは二次流セルと低水路への流入および流出) が存在することが確認される。などの点が指摘される。これらを模式的に示したものが Fig.6 であり、apex の下流で形成されたらせん構造が高水数流れの流入によって加速・発達し、次の apex で通常の弯曲流で見られる二次流とは逆回転の構造を示すようになり、その後、低水路からわき上がるように高水数に乗り上げながららせん構造が消滅して行く、と言う一連の過程が説明される。

5. おわりに

以上の結果より、いずれの複断面水路における流れでも低水路水深の増加につれて構造が変化する「構造の水深依存性」が見られ、複断面流れの普遍的特性であると言える。また、複断面流れの構造は、混合現象および二次流構造で特徴づけられることが知れた。混合現象は、直線複断面流れに見られる低水路流れと高水数上流れの水平混合、直線・蛇行および直線・屈曲複断面流れに見られる低水路内の下層流と高水数上の上層流の鉛直混合、蛇行・蛇行複断面流れの逆流域と主流域の水平混合に分けられる。これらの現象により、直線複断面流れでは、せん断不安定により引き起こされる水平渦として観察され、蛇行・蛇行複断面流れでは、地形性の剥離渦として

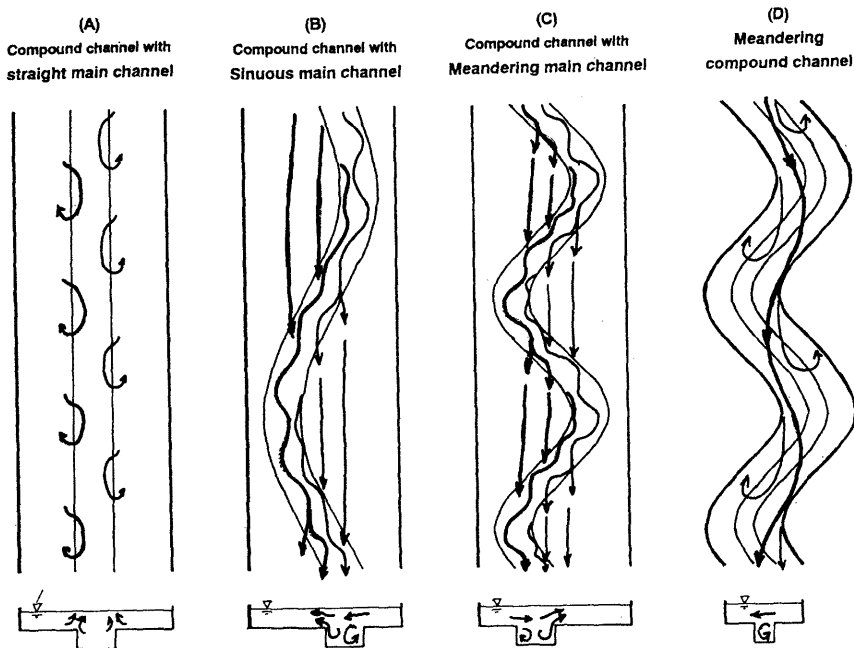


Fig.7 Flow patterns in four kinds of compound open channels

Table 2 Fluid mixing and flow structure in compound open channel

Compound channel			Fluid mixing and Flow structure	
	Channel	Main channel	Fluid mixing	Flow structure
A	Straight	Straight	Horizontal mixing between main channel flow and flood plain flow	Vortex in horizontal plane Secondary flow by turbulence
B	Straight	Sinuous	Vertical mixing between lower layer flow and upper layer flow	Secondary flow by centrifugal force Longitudinal vortex (spiral motion)
C	Straight	Meander	Vertical mixing between lower layer flow and upper layer flow	Secondary flow by centrifugal force Longitudinal vortex (spiral motion)
D	Meander	Meander	Horizontal mixing between main flow and separation flow	Vortex in horizontal plane Secondary flow by turbulence and centrifugal force

水平渦が観察される。一方、二次流構造で見ると、主流の曲がり（遠心力）に起因する第一種の二次流である蛇行らせん流構造および乱れの非一様性に起因する二次流である斜昇流が存在する。前者は、直線・蛇行および直線・屈曲複断面流れで卓越した構造として存在し、後者は、直線複断面流れで特有の構造として存在する。これら4種の流れの構造の特徴を模式的に表したものが Fig.7 であり、特徴をまとめた結果が Table 3 である。

今後は、直線・屈曲複断面流れを対象にし、定量的な検討を加える予定である。

参考文献

- 芦田和男(1982)：洪水流の三次元流況と流路形態に関する研究，土木学会水理委員会「洪水流の三次元流況と流路形態」研究小委員会，p.89.
- 石垣泰輔(1993)：複断面開水路流れの3次元構造に関する研究，京都大学学位論文。
- 石垣泰輔・今本博健：可視化法による複断面開水路流れの3次元構造に関する研究，土木学会論文集，No.515, II-31, pp.45-54.
- 今本博健・石垣泰輔(1983)：複断面弯曲開水路流れの水理特性に関する実験的研究，第27回水理講演会論文集，pp.67-72.
- 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，水工論文集，土木学会水理委員会，第40巻，pp.711-716.
- Arnold, U.(1987): Zur bildaten- und modellgestützten Bestimmung der Schadstoffausbreitung in naturnahen Fließgewässern, Mitteilungen, IWW, RWTH Aachen, Nr.52.
- Brice, J.C.(1964): Channel patterns and terraces of the Loup River in Nebraska, U.S. Geological Survey Professional Paper, 282B.
- 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., Muto, Y., Takeo, N. and Imamoto, H.(1997): Fluid mixing and boundary shear stress in compound meandering channel, 27th Congress of IAHR.
- Muto, Y.(1997): Turbulent flow in two-stage meandering channels, Doctoral thesis submitted to University of Bradford, UK.
- Shiono, K., Muto, Y., Imamoto, H. and Ishigaki, T.(1994): Flow structure in meandering channels for overbank, MAFF, Conf. River and Coastal Engineers.
- Toebe, GH and Sooky, AA(1967): Hydraulics of meandering river with flood plains, Proc. ASCE, Vol.93, No. WW2, pp.213-236.
- Yalin, M.S.(1992): River Mechanics, Pergamon Press, p.167.

3-D Flow Structure in Compound Open Channel with Straight, Sinuous and Meandering Main Channel

Taisuke ISHIGAKI, Yasunori MUTO and Nario TAKEO*

* Graduate student of Engineering, Kyoto University, Japan

Synopsis

Flow structure in a compound open channel is investigated here with experimental results by flow visualization. Three dimensional structure in four types of compound open channel: a straight compound channel, a compound channel with sinuous and meandering main channel, and a meandering compound channel, are discussed. The results show that fluid mixing and secondary flow are key-phenomena when we discuss on the structures, and that the structures are different each other in shallow cases of flood plain and deeper cases in all four channels, which is an universal characteristics called as the depth dependence of the flow structure in this paper.

Keywords: compound open channel, sinuous and meandering main channel, 3-D turbulent flow, visualization