

複断面蛇行開水路流れの水利特性について (3)

武藤裕則・今本博健・石垣泰輔

要 旨

本報告は、低水路と高水敷堤防が同位相で蛇行した複断面開水路流れにおける速度計測結果を示したものである。二次流や乱れ強さ、せん断応力分布といった流れの内部構造が、高水敷堤防が直線で低水路のみ蛇行した水路におけるそれらの構造と比較されている。その結果、低水路・高水敷間の流体混合現象がこれらの水路間で全く異なること、およびその原因が、各領域における主流間の、干渉過程の差異により説明されることが明らかとなった。

キーワード：複断面流れ、蛇行水路、速度計測、流体混合、二次流

1. はじめに

既報(武藤ら, 1995 および 1996b)では、低水路が蛇行した複断面流れにおける速度計測結果を示し、流れの3次元性について検討した。すなわち、高水敷堤防が直線で低水路のみ蛇行した複断面水路(以下、複断面蛇行低水路と呼ぶ)を対象とし、低水路の蛇行度を3種に変え、2成分ファイバ・レーザ・ドップラ流速計による3成分速度計測を行い、二次流の発生・発達過程やせん断層の形成過程を明らかにするとともに、流体混合現象や領域間の流体交換についても検討した。その結果、複断面蛇行低水路流れにおける3次元性は、1.1 から 1.6 程度の蛇行度の範囲では、蛇行度に関係なく、(1)上層流れによって誘起される下層内の強い二次流、(2)交差部における上層・下層間の相互干渉に伴うせん断応力の発生、(3)低水路からの乗り上げと高水敷からの乗り入れによる流体交換、により特徴づけられることがわかった。

これらの特徴的な構造は、流れの幾何条件および水利条件に依存することは明らかである。複断面流れの場合、流れを高水敷・低水路というよ

うに領域にかなり明確に分割することが可能であり、したがって基礎条件の変化による影響は、各領域毎に現れ、その相互作用として流れ全体のふるまいが決定されていると考えて差し支えない場合が多い。複断面蛇行低水路流れの場合、水利条件の変化は主として上層流れの主流方向への卓越という形態で現れるため、上記の流れの構造は、その発達の程度や、ひるがえってそれらが流れの抵抗などに与える影響などには若干の差異が見られるものの、基本的には変わらない。しかしながら、幾何形状が変化した場合、上記の構造を形成する過程がそれに伴い変化するため、流れ全体の様子が大きく変わる可能性がある。

そこで本報では、既報では条件設定のパラメータとして考慮しなかった高水敷堤防の縦断方向変化を加え、水路の幾何形状の流れに与える影響に関してさらに検討を加える。実際の河川を考えた場合、高水敷堤防が直線であることはむしろまれで、屈曲・蛇行する低水路に沿って堤防法線が形作られていることがほとんどである。ここで問題となるのは、堤防法線の蛇行度と、その低水路蛇行との位相差であるが、本報ではひとつのモデルケースとして、低水路の蛇行と位相差なし・同

蛇行度の堤防を持つ水路を取り上げる（以下、蛇行複断面水路と呼ぶ）。水路の蛇行度は、1.37 とする。

本報では、蛇行複断面流れにおいて計測された速度分布結果と、既報で示した複断面蛇行低水路流れのそれとを比較することで、堤防法線の流れの構造に与える影響を検討する。実験装置および方法については既報を参照されたい。Fig. 1 に本報で取り上げた両水路の概要を示す。水理条件は Table 1 に示す。

2. 蛇行複断面流れにおける速度分布特性

2.1 平均流特性

(1) 主流速分布

Fig. 2 は、水深平均された平均流速分布を示したものである。なお、水深の条件は相対水深（＝高水敷上水深／低水路内水深）で 0.50 である。蛇行複断面流れ（上段）については、局所的な水深により平均化されているが、複断面蛇行低水路流れ（下段）では、低水路内については上層と下層に分け、それぞれについて平均化を行っている。

図より、蛇行複断面流れについては、流れはほぼ全体の蛇行に沿ったものとなり、横断方向に見た場合、曲線部内岸側出口付近とその下流側を除いて、極端な流向の不連続性は見られない。低水路と高水敷の境界部においても、そのような不連続性は見られない。また、ここには図示していないが、下段の図と同じように上層・下層でそれぞれ平均化した場合でも、層間における流向の差は小さく、上下層でほぼ同様の流線となっているものと思われる。最大流速位置は、曲線部頂部では内岸より存在するが、曲線部を進むにつれて外岸側へと移動し、ほぼそのままの位置で直線部を流下後、次の曲線部の入口では内岸堤防付近に存在する。この様な最大流速線の現れ方は、単断面蛇行におけるそれと非常に類似している。また、曲線部出口に向かって最大流速線が内岸から外岸へと移動するにつれて、曲線部内岸側出口には大きな水平渦が形成される。この渦は、直線部を経て次の曲線部外岸側入口にまで到達するものである。これは、Leeder and Bridges (1975) が指摘するように、曲線半径／水路幅が小さすぎるために形成されたはく離渦と考えられる。

以上の様子を、下段に示した複断面蛇行低水路流れの流速分布と比較すると、交差部において観察される上下層間の流向・流速の相違が、蛇行複断面流れでは、上下層間にも高水敷・低水路間

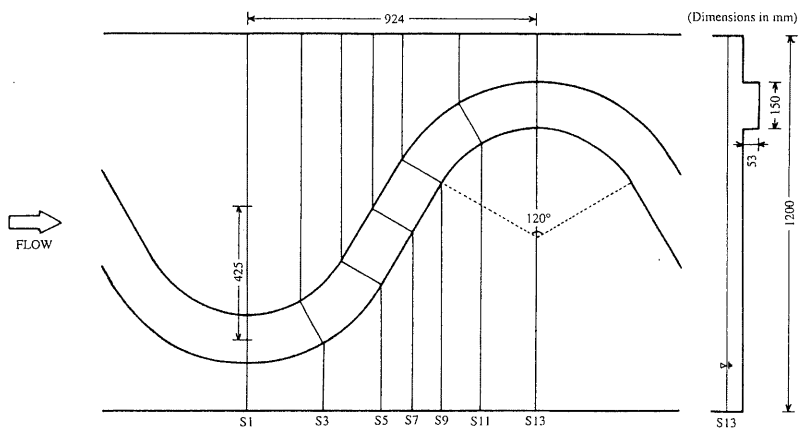
にも見られない。複断面蛇行低水路流れの場合、上下層間の流体の相互干渉が、流れの構造や水路の抵抗則を考える上で重要な働きをすることを指摘した（武藤ら、1996a）が、蛇行複断面流れでは、そのような要素が存在しないと言える。

以上の結果より、堤防法線は上層流れの主流方向に大きな影響を与えること、またここで取り上げた低水路・高水敷が同位相・同蛇行度の水路の場合、上下層の流向がほぼ同様となるため、複断面蛇行低水路流れで観察されるような強い流体干渉が見られないこと、等が言える。

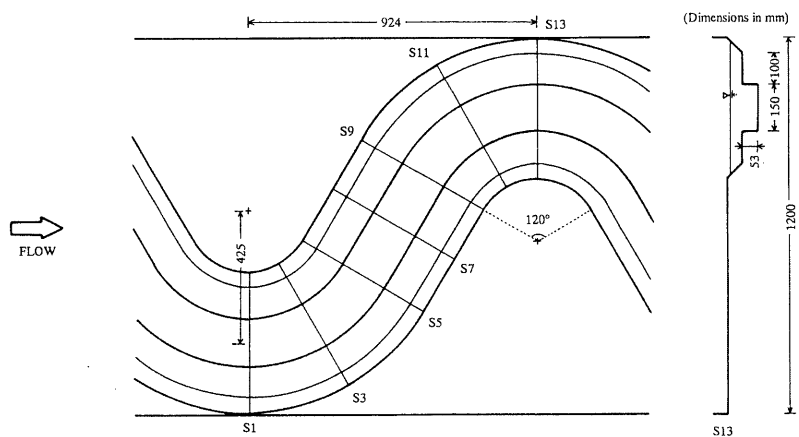
(2) 二次流の分布

Fig. 3 は、相対水深 0.50 の蛇行複断面流れにおける二次流ベクトルの計測結果を示したものである。図より、曲線部頂部において内岸側に観察される時計回りのセルが、曲線部を進むにつれてその強さ・大きさを発達させていく様子がわかる。このセルは、直線部に入ると、大きさはさらに発達して水深全体にわたる程になるものの、その強さすなわちベクトルの大きさは小さくなる。次の曲線部に入ると、徐々に小さくなるとともに水面へと移動して行き、減衰してやがて曲線部出口付近で消滅する。また、このセルの水面への移動が始まる曲線部入口付近の内岸側では、次に発達する反時計回りのセルが形成され始める。

以上の様子を、Fig. 4 に示した単断面蛇行流れにおける二次流ベクトルの分布と比較すると、セルの発生・発達・減衰および消滅の過程が非常に類似していることがわかる。このことは、蛇行複断面流れにおける二次流は、水路の曲がりによる遠心力により誘起された、Prandtl の第一種の二次流が卓越していることを示している。今本ら (1982) がわん曲複断面流れで行った研究によれば、曲線部において卓越する二次流セルの回転方向が、単断面と複断面とで一致することが指摘されているが、このことも、上記の遠心力による二次流の発生機構の説明を裏付けるものである。しかし、彼らは同時に、わん曲複断面流れでは、低水路・高水敷間のせん断不安定による二次流、いわゆる斜昇流の存在も指摘しているが、ここで示した蛇行複断面流れの場合、その存在は見られない。これは、Fig. 2 に示した流速の横断分布において、低水路・高水敷間に大きな流速の不連続性が見られず、したがって境界部には顕著なせん断層が形成されないことにより説明されうが、詳細は、境界部を含めた高水敷上にまで計測範囲を広げて検討されるべきである。



(a) Compound open channel with a meandering main channel (S-M).



(b) Meandering compound open channel (M-M).

Fig. 1 Tested sections of the meandering channels.

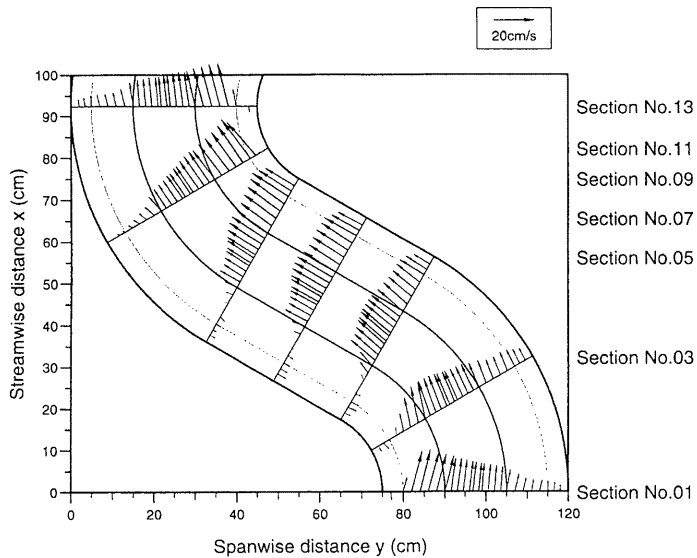
Table 1 Hydraulic conditions.

	Depth condition Dr	Discharge Q ($\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)	Water depth H (m)	Mean velocity U_s (m/s)	Friction velocity ^a u_* (m/s)	Reynolds number ^b Re ($\times 10^4$)	Froude number ^c Fr
S-M	bankfull	1.556	0.0519	0.197	0.0148	2.19	0.359
	0.15	2.513	0.0630	0.129	0.0120	0.66	0.340
	0.50	19.996	0.1059	0.282	0.0221	4.92	0.401
M-M	bankfull	1.556	0.0519	0.197	0.0148	2.19	0.359
	0.15	1.981	0.0628	0.171	0.0129	1.47	0.357
	0.50	10.381	0.1038	0.138	0.0183	2.41	0.203

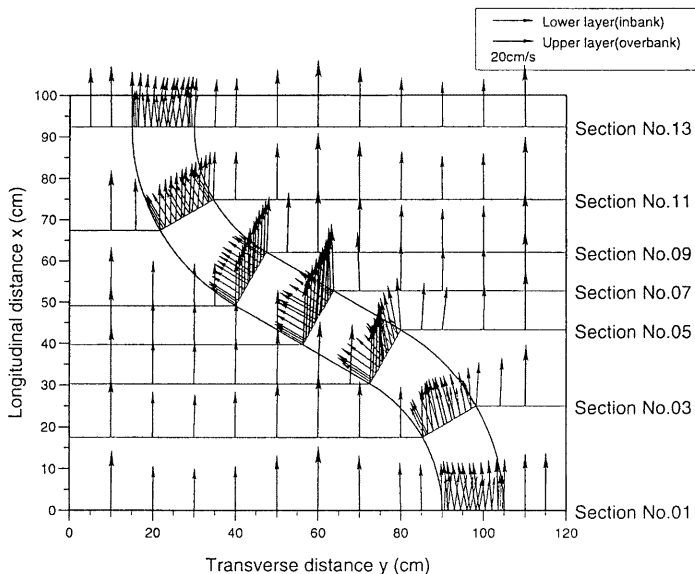
a. $u_* = \sqrt{gRS}$, where g =gravity acceleration, R =hydraulic radius and S =energy slope.

b. $Re=4U_sR/\nu$, where ν =kinematic viscosity.

c. $Fr=U_s/\sqrt{gR}$.



(a) Meandering compound open channel (M-M).



(b) Compound open channel with a meandering main channel (S-M).

Fig. 2 Depth / Layer averaged velocity distributions for $Dr=0.50$.

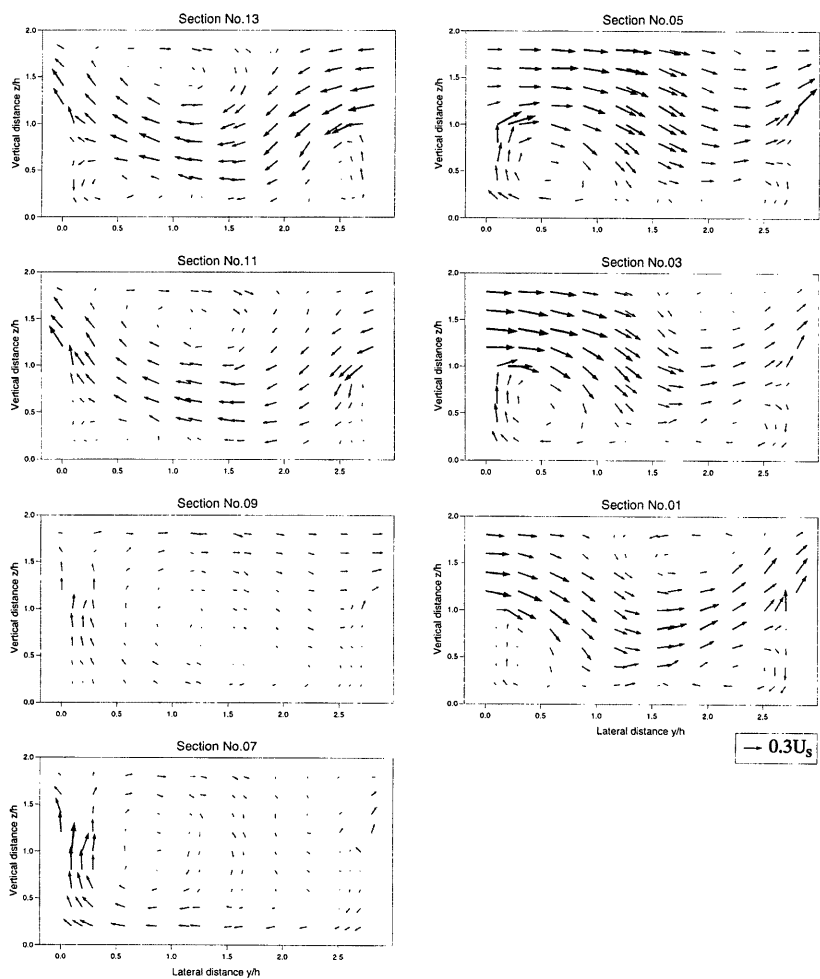


Fig. 3 Secondary flow vectors for $Dr=0.50$, M-M channel.

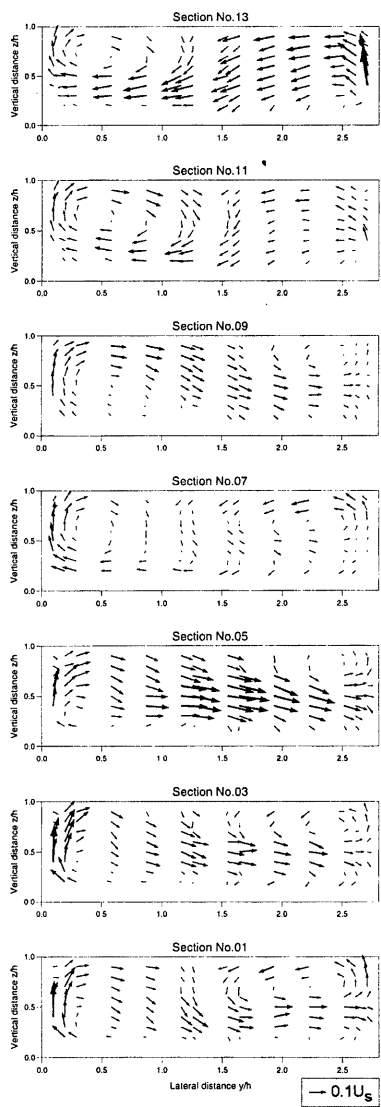


Fig. 4 Secondary flow vectors in a simple meandering channel.

以上の結果は、堤防法線、あるいは低水路と堤防法線の相対的な線形を変更した場合、洪水時の流況が変わることを示唆し、洗掘・堆積といった河床の挙動、およびそれらへの対策としての護床・護岸工の配置といった、河川工学上の重要な問題を提起しているものと考えられる。

2.2 乱れ特性

(1) 乱れエネルギー

Fig. 5 は、相対水深 0.50 の蛇行複断面流れにおける乱れエネルギー $k = (u'^2 + v'^2 + w'^2) / 2$ の分布を示したものである。また Fig. 6 は、複断面蛇行低水路流れにおける乱れエネルギーの分布を示したものである。

両者を比較すると、複断面蛇行低水路流れの場合、上層流れの低水路内への乗り入れにともなって誘起される二次流セルと明確に関連する形で、乱れエネルギーの分布のピークが見られる。また、交差部において乱れエネルギーの等値線は主として横断方向に引かれ、したがって上下層間の流れの相互干渉と密接に関係していることが示唆される。これに対し、蛇行複断面流れでは、そのような明確なピーク領域は見られない。しかしながら、直線部においては全体的に乱れエネルギーが大きく、その領域は、図中左岸側の高水数先端部付近にピークを持ち、水路中央から右岸側へと上層部水面付近を広がっている。この様な構造をもたらした機構に関しては、境界部を含めた高水数上における計測に基づく、詳細な検討を待たねばならないが、Fig. 2 で観察された、左岸側高水数上の大規模な渦と何らかの関係を持っていることが推測される。曲線部、特に頂部においては両者の構造上の差異はあまり認められず、底面せん断力による影響が卓越することがわかる。

(2) レイノルズ応力分布

Fig. 7 および 8 は、蛇行複断面流れにおけるレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ および $-\overline{uw}$ の分布をそれぞれ示したものである。相対水深は 0.50 である。

両図からわかるように、蛇行複断面流れにおいては、レイノルズ応力は非常に複雑な分布を示し、横断面内の速度勾配と明確な関係を持たない。

大きなせん断力を受ける領域は、 $-\overline{uv}$ 、 $-\overline{uw}$ とともに直線部の図中左岸側に沿って発達していることがわかる。そのような領域では、 $-\overline{uv}$ は正、

$-\overline{uw}$ は負の値を持っており、それぞれ低水路側、

下層側の高速流体の存在を示唆している。このことは、乱れエネルギーの分布においてと同様に、左岸側高水数上に存在する大規模な渦と、これらの内部せん断に関する構造が、何らかの関係を持つことを推測させる。また、プレストン管により計測された底面せん断応力は、Fig. 9 に示す複断面蛇行低水路流れの場合と同様に非常に小さく、 $0.2 \sim 0.4 u_*^2$ 程度である。これは、Fig. 2 に示したように、横断面内の最大流速が主として高水数上に現れることと関係する。ここには図示していないが、実際横断測線内の最大底面せん断力は、高水数上の最大流速位置と対応する形で計測されている。

これらの結果より考察される、領域間の流体の相互干渉と混合過程を、Fig. 9 に示される複断面蛇行低水路流れの場合と比較すれば、その違いは明白である。すなわち、複断面蛇行低水路流れでは、せん断層は高水数高さ付近に横断方向に形成されることから、この面を境界として上下層間で流体の干渉が起こり、鉛直方向の混合が活発に進む。この様な構造は、水路を高水数高さを境界として、上層・下層に分割する取り扱いの妥当性を示している。これに対し、蛇行複断面流れでは、そのような明確なせん断層は形成されず、内岸側およびそれに続く直線部の高水数先端部付近で複雑な内部せん断構造が見られる。この様な構造が、蛇行複断面流れに特有の現象なのか、あるいは高水数上の大規模な渦と何らかの関係によって引き起こされているのかを断定することは、現時点では不可能であるが、前節の平均流に関する構造から検討する限り、蛇行複断面流れにおいて卓越する速度勾配は横断方向のそれであり、せん断層は横断方向よりはむしろ鉛直方向に形成されうると考えられる。ただし、このことは、直線複断面流れと同様の境界部における鉛直断面分割法（あるいはこれに準ずる斜め断面分割法：今本ら、1992 など）による取り扱いを、蛇行複断面流れにおいても許容することを担保せず、この点を明らかにするためにはさらに詳細な流れの構造の検討が必要である。

以上の結果より、蛇行複断面流れにおいては、流れの構造に基づく領域分割の定義が未だ不明確なものの、仮に複断面蛇行低水路流れと同様に上下層に分割した場合、各領域間における主流方向の相対的關係と、その結果としての領域間の干渉過程が全く異なり、したがってせん断層の形成や

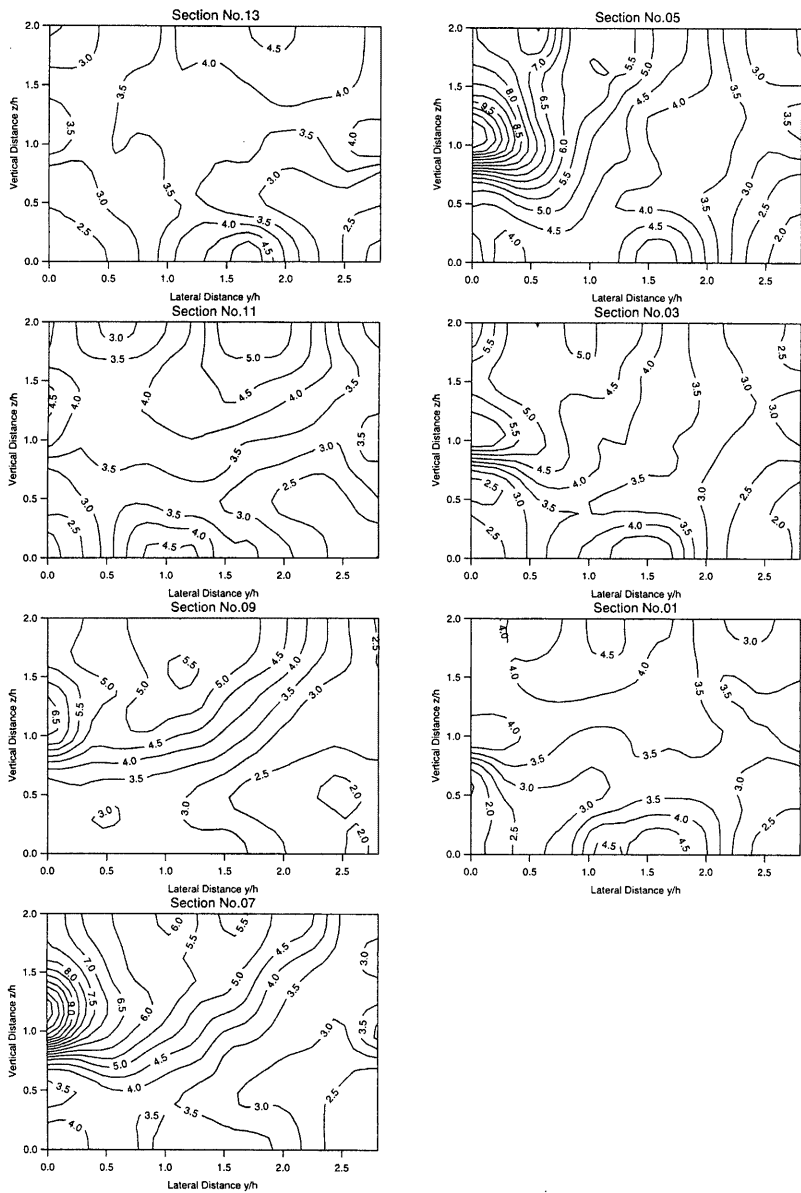


Fig. 5 Turbulent kinetic energy $k/u.^2$ for $Dr=0.50$, M-M channel.

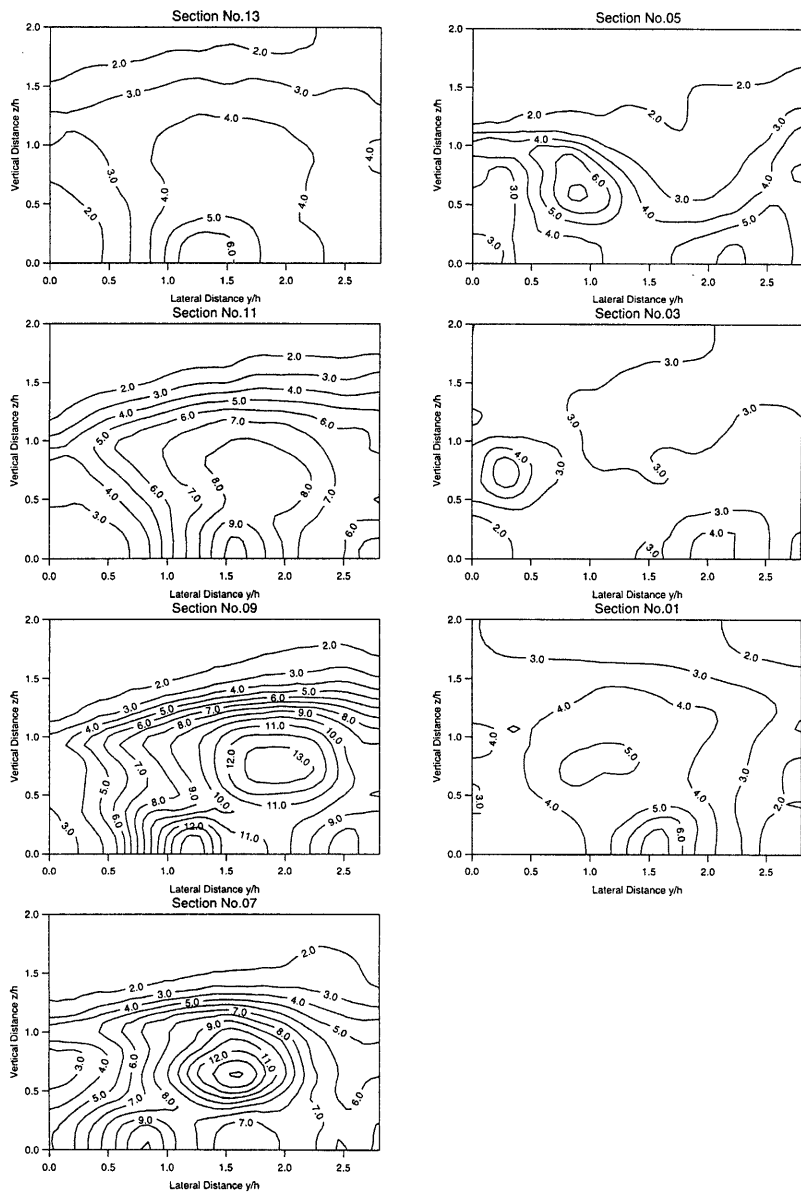


Fig. 6 Turbulent kinetic energy $k/u.^2$ for $Dr=0.50$, S-M channel.

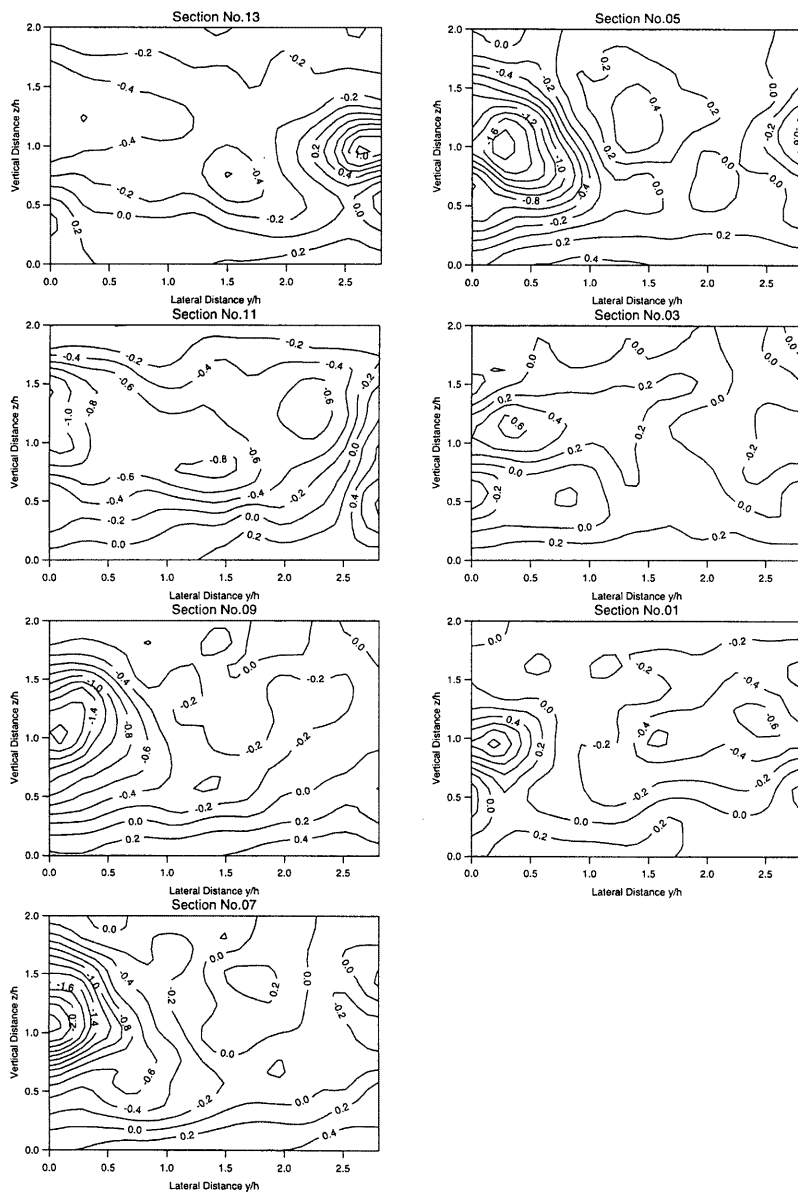


Fig. 8 Reynolds stress $-\overline{uw}/u_*^2$ for $Dr=0.50$. M-M channel.

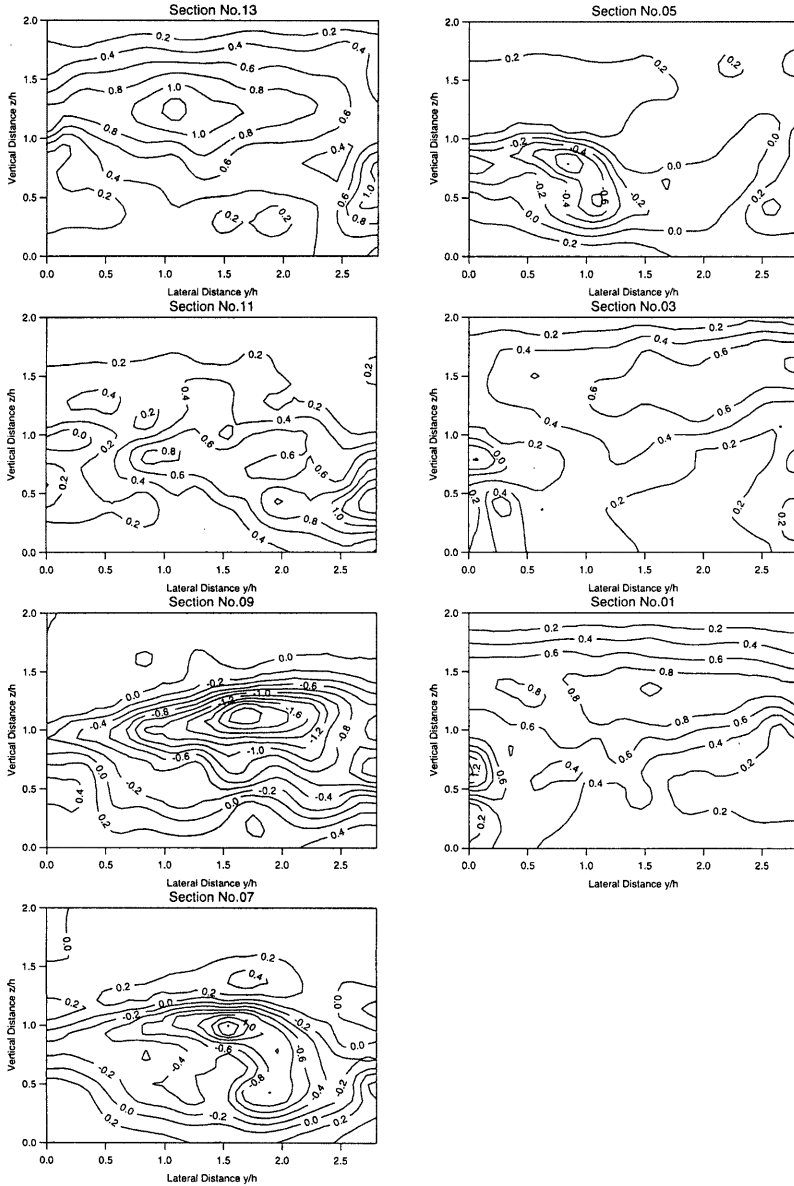


Fig. 9 Reynolds stress $-\overline{uw}/u_*^2$ for $Dr=0.50$, S-M channel.

混合現象などの内部構造が全く異なるものとなることがわかった。

3. おわりに

本報では、低水路と高水敷堤防が同位相で蛇行する蛇行複断面開水路流れを取り上げ、速度計測結果に基づいて、流れの内部構造について、主として二次流の発達機構とせん断層の形成過程および流体混合過程の面から検討した。得られた主な成果を列挙すると以下のようである。

- 1) 本報で取り上げた、同位相で蛇行する複断面流れの場合、流れはほぼ全体の蛇行に沿ったものとなり、直線複断面流れに見られる低水路・高水敷間、あるいは複断面蛇行低水路流れに見られる上層・下層間の急激な流速・流向の変化は見られない。
- 2) 最大流速線の現れ方や、二次流の発達・減衰過程に単断面蛇行流れとの類似が見られる。したがって、蛇行複断面流れは、全体として水路の曲がりによる遠心力の影響を大きく受けている。このことは、複断面という断面内の形状の不規則性によりもたらされる効果よりも、縦断方向の曲がりの影響の方が大きいことを示している。
- 3) 堤防法線の線形によっては、内岸側高水敷上およびその後流域に大規模なほく離渦が形成される可能性がある。
- 4) 乱れエネルギーの分布には、複断面蛇行低水路流れのような明確なピーク領域が見られない。このことは、蛇行複断面流れが速度分布に基づく明確な領域分割を許さず、また二次流やせん断層の形成が複断面蛇行低水路流れと比較して弱いことと関係するものと思われる。
- 5) 内岸側およびそれに続く直線部高水敷先端部付近に、強いせん断力の働く領域が存在する。この領域は、隣接する高水敷上の大規模なほく離渦と関係するものと思われるが、そのせん断構造は複雑で、横断・鉛直両方向に働く。

- 6) 蛇行複断面流れでは、明確なせん断層は形成されない。流体混合は、平均流の結果から、主として低水路・高水敷の境界部を通して横断方向に行われるものと思われるが、詳細に関しては、さらなる構造の検討に待つ。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、英国ラフバラ大学土木工学科首席講師（元京都大学防災研究所非常勤講師）Dr. Koji Shiono には、終始有益な助言と協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 今本博健・石垣泰輔・藤沢 寛 (1982)：複断面彎曲開水路流れの水利特性について(1)，京都大学防災研究所年報，第 25 号 B-2，pp.529-543.
- 今本博健・石垣泰輔・塩野耕二 (1992)：複断面開水路流れの水利特性について(6)，京都大学防災研究所年報，第 35 号 B-2，pp.349-364.
- 武藤裕則・塩野耕二・今本博健・石垣泰輔 (1995)：複断面蛇行開水路流れの水利特性について(1)，京都大学防災研究所年報，第 38 号 B-2，pp.561-580.
- 武藤裕則・塩野耕二・今本博健・石垣泰輔 (1996a)：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.
- 武藤裕則・今本博健・石垣泰輔・塩野耕二 (1996b)：複断面蛇行開水路流れの水利特性について(2)，京都大学防災研究所年報，第 39 号 B-2，pp.543-558.
- Leeder, M.R. and Bridges, P.H. (1975) : Flow separation in meander bends, *Nature*, Vol.253, pp.338-339.

A Study on the Flow in Compound Meandering Channels (3)

Yasunori MUTO, Hirotake IMAMOTO and Taisuke ISHIGAKI

Synopsis

Based on velocity and turbulence measurements in a meandering compound channel, i.e., a meandering main channel with meandering embankments of the same sinuosity and zero phase lag, the internal flow structure in the channel is discussed. Particular care is taken into secondary flow structure and shear layer instability. Fluid mixing is also of interest.

Secondary flow structure in the channel is mainly produced by the centrifugal force effect in a bend. A pronounced shear layer, which is observed at the bankfull level in a meandering channel with straight embankments, is not observed in the channel. Shear layer effect acts in a rather complicated manner in meandering compound cases. Thus fluid mixing processes in these two meandering flows are different.

Keywords : compound open channel flow, meandering channel, velocity measurements, fluid mixing, secondary flow