

複断面蛇行開水路流れの水理特性について (1)

武藤 裕則・塩野 耕二・今本 博健・石垣 泰輔

A STUDY ON THE FLOW IN COMPOUND MEANDERING CHANNELS (1)

By Yasunori MUTO, Koji SHIONO, Hirotake IMAMOTO and Taisuke ISHIGAKI

Synopsis

Velocity and turbulence measurements for flows in compound meandering channels of three different sinuosities (s) were undertaken in a relatively small scale laboratory flume. A 2 component fibre optic cable laser Doppler anemometer (FLDA) was employed for the measurements. Information on 3 dimensional structure of the flows in the channels were obtained. Growth and decay processes of secondary flow along the meandering channels were also clarified.

It is of particular interest that secondary flow structures in the meandering channel of $s = 1.37$ are totally different between before and after inundation. An area producing strong shearing is observed at around the bankfull level in the crossover region for overbank flows. These unique phenomena are introduced by horizontal interaction between the main channel flow and the flood plain flow at that level. Consequently, despite their geometrical similarities, dominant mechanism for compound meandering flow is dissimilar to that for straight compound flow.

1. はじめに

複断面開水路流れを対象とした研究は、Sellin¹⁾, Zheleznyakov²⁾らが低水路と高水敷の境界部における激しい流体混合とそれに伴う大きなせん断力の発生といったその特異性を1960年代に指摘して以来、流れの構造の解明や抵抗特性の把握と言った点を中心に精力的に推し進められてきた。わが国においても、今本・久下³⁾が内部構造に関する詳細な検討を行い、高水敷先端付近より自由表面に向かう強い2次流(斜昇流)の存在を指摘して以来、多くの研究者により活発に研究が展開されてきた。実際、狭小な沖積平野上に高密度の人間・社会活動が集積するわが国においては、洪水を安全に流下させつつ平時において安定した河道とするためには複断面が望ましいとされており⁴⁾、このことが、わが国における複断面流れを対象とした高水準の研究成果を生み出す背景の一つとなっている。

いま、これらの研究のうち代表的なものを振り返ってみると、流れの構造の検討については、著者ら⁵⁾による可視化法を駆使した研究、Tominaga & Nezu⁶⁾による光ファイバ・レーザ・ドップラ流速計を用いた乱れ計測あるいは河原・玉井^{7,8)}による乱流モデルを用いた数値計算等があげられる。また流れの抵抗特性についての検討は、井田⁹⁾による合成粗度係数の提案以来、高橋¹⁰⁾、福岡・藤田¹¹⁾、室田ら¹²⁾により様々な水位・流量関係の予測手法が提案されている。任意断面を持つ開水路の疎通能の問題は工学的立場から非常に重要な問題であるが、流れの構造に関する情報が不十分であるために、ともすれば経験的要素に頼ることも多い。著者らは内部構造に関する知見に基づき2次元混合層流れと複断面流れとの相似性を指摘し¹³⁾、その流速分布に基づく流量予測手法を提案している¹⁴⁾。さらに最近、複断面開水路流れに関する高

精度のデータが蓄積されるにしたがって、数値モデルのモデル化過程の妥当性の検証、さらには新たなモデル化の試み等が行われるようになった (Wormleaton¹⁵⁾, Shiono & Knight¹⁶⁾, 河原・玉井¹⁷⁾, Naot et al.¹⁸⁾)。このことは換言すれば、複雑な流れ場に数値モデルを適用し、またさらにその普遍性を高めるための改良を施すには、信頼のおける基礎的な実験データが不可欠であることを示している。

このようにして徐々にその水理特性が明らかになってきた複断面開水路流れであるが、その過程において得られた成果が、直ちに実河川に対して応用され得るとは言い難い。わけても、複断面開水路流れに関する従来の研究は、その大半が低水路・高水敷共に直線部のみから構成されたいわゆる直線複断面水路を対象としていることは、実河川が様々な半径・曲率を持つ曲線部より構成され、また蛇行していることを考慮すれば、その実相を反映しているかは多少なりとも疑問が残る。しかしながら、彎曲・蛇行した複断面開水路流れを対象とした研究は、Toebe & Sooky¹⁹⁾, 著者ら²⁰⁾, Ervine & Ellis²¹⁾, Kiely²²⁾ 等が挙げられるものの、その実数は極めて少なく流れの全容を解明するには至っていない。近年、英国 HR Wallingford にて行われた大スケールの基礎実験水路を用いた一連の研究²³⁻²⁶⁾は、複断面蛇行流れを対象としたものでは最も包括的なものであり、またその成果を基に、水位・流量関係の予測式の比較的単純な形式による定式化が James & Wark²⁷⁾ により試みられている。ところが、これらの研究では流れの構造、特に抵抗特性・物質輸送等に重要な影響を及ぼすのみならず、複断面蛇行流れにおいてはその特異なふるまいも興味深い2次流およびせん断応力分布については詳細に検討されておらず、それらの発生ならびに発達機構についてはほとんど不明である。またその結果、上述の予測式もその物理的裏付を持たず、経験式の範疇を出ない。

以上のことから本研究では、複断面蛇行開水路流れの構造を解明し、その抵抗特性を予測し得る水位・流量関係式の定式化ならびに数値モデルの改良・開発に供することのできる実験データ収集を目的とし、まずその第一段階として2成分光ファイバ・レーザ流速計を用いた流速計測を行ったものである。

本研究により、従来ほとんど不明であった複断面蛇行開水路流れの乱流構造が明らかにされたのみならず、2次流の発達過程・せん断層の形成過程等に興味深い知見が得られている。

2. 複断面蛇行開水路流れに関する実験

2.1 実験装置

本研究に用いた実験水路は、長さ 10.8 m、幅 1.2 m、深さ 0.35 m のアクリル樹脂製長方形断面直線水路である。水路には後述の諸元を持つ蛇行低水路をかたどった高分子床板吸音材 (ポリスチレン製、厚さ 53 mm、比重約 0.02 ~ 0.07) を両面テープにより設置し、複断面水路として用いた。なお、水路の勾配は一对のジャッキとヒンジにより変化させることが可能であるが、本研究では全実験ケースを通じて高水敷上河床勾配を 1/1000 に固定した。

流量の計測は、循環水路中途に取り付けられたオリフィスおよび付随するマンメータにより行われた。マンメータは、小流量時には変速機用油、大流量時には水銀を用いる複合式のものである。なお、マンメータの読みと流量との関係はあらかじめ検定している。

水深の計測には、1/10 mm 読みのポイントゲージを用いた。水深の計測は上・下流端より 2 m の範囲を除く低水路直線部中央にて行い、後述する方法により (擬似) 等流水深が確立されていることを確認した後、これらの計測点での計測値の平均をもって水深としている。

流速の計測には、2カラー4ビーム・2成分光ファイバレーザ流速計 (TSI 9802, Omnichrome 543-300 A) を用いた。流速計のプロブは直径 15 mm、長さ 80 mm であり、完全密閉すなわち水中での使用が可能である。また附属の鏡をプロブ先端に取り付けることにより、プロブ軸に平行な面内の流速成分を計測することができる。このプロブと光源を結ぶ光ファイバケーブルは長さ約 10 m であり、また

レーザ光源の最大出力は 300 mW である。後方散乱モードにより得られた信号は、カウンタ・タイプの信号処理器 (Flow Analyzer TSI IFA 500) に送られ、処理された後にパーソナルコンピュータの固定ディスク上に取込まれる。なお、計測はリアルタイム・モードで行われたが、そのサンプリング周波数はシーディングとして平均粒径 28 μm のアルミニウム粉末を用いた場合平均して約 100 Hz、計測時間は 60 秒である。各計測点間の移動は、高精度の移動 (最小 1 / 125 mm) を可能とする 2 成分トラバースシステムを、上述のコンピュータにより自動制御することにより行われた。

2.2 蛇行水路の幾何形状

蛇行水路の幾何形状を規定するパラメータには非常に多くのものがある。Fig. 1 は理想化された蛇行水路の幾何形状を、関連する幾何パラメータと共に表したものである。

蛇行水路の線形を表現するのに、sine-generated curve はしばしば用いられるが^{28, 29)}、本研究では模型の作製が比較的簡単な円弧および直線の組み合わせによる蛇行水路を用いた。

河川の蛇行状態を分類するパラメータとして蛇行度 s (= 蛇行水路実長 / 蛇行波長) がしばしば用いられる³⁰⁾。本研究においても s を変化させて水路線形の流れに与える影響について検討できるよう考慮した。 s を変化させる方法としては、曲線部半径 r_c を変化させる、曲線部中心角 ϕ を変化させる、直線部長 L_{co} を変化させる等が考えられるが、本研究では高水敷幅 B が一定であることを考慮し、 r_c を一定 (0.425 m) とし ϕ を変化させた。選定された ϕ は 60, 120 および 180 度の 3 種であり、 s はそれぞれ 1.09, 1.37 および 1.57 となった。 L_{co} は 0.376 m であるが、 $s = 1.57$ のケースでは直線部は挿入されていない。その他の関連するパラメータは、Table 1 に示されている。なお、低水路の横断面は長方形であり、その諸元は幅 $b =$

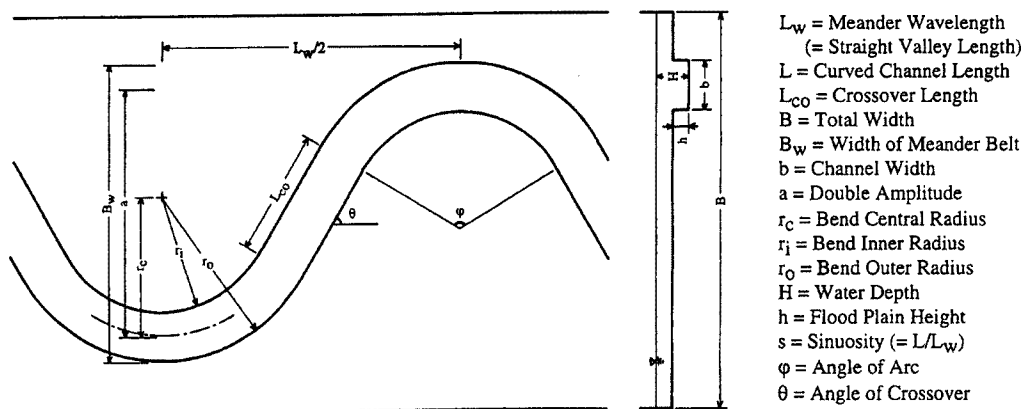


Fig. 1. An idealised compound meandering channel with common notation in this report.

Table 1. Meander parameters for tested channels

Case	Angle of arc ϕ ($^\circ$)	Meander Wavelength L_w (mm)	Total width B (mm)	Width of meander B_w (mm)	Bend radius r_c (mm)
R 1 -rectangular	60	1502	1200	452	425
R 2 -rectangular	120	1848	1200	900	425
R 3 -rectangular	180	1700	1200	1000	425
Case	Crossover length L_{co} (mm)	Crossover angle θ ($^\circ$)	Sinuosity s	Channel width b (mm)	Flood plain height h (mm)
R 1 -rectangular	376	30	1.093	150	53
R 2 -rectangular	376	60	1.370	150	53
R 3 -rectangular	0	90	1.571	150	53

0.15 m, 深さ $h = 0.053$ m である。

Table 1 に示した諸元を持つ蛇行水路を5ないし6波長実験水路内に作製した。これら複断面蛇行水路の平面図は、**Fig. 2** に示すとおりである。

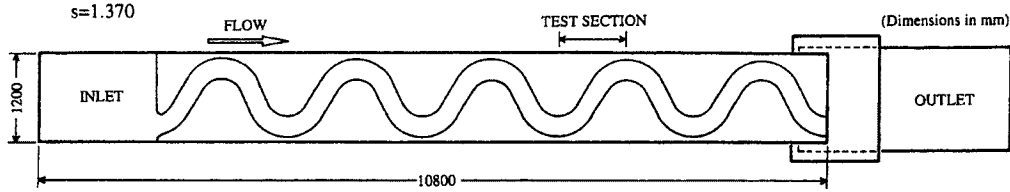


Fig. 2. The experimental flume and meandering channel $s = 1.37$.

2.3 実験方法

蛇行開水路においては、遠心力その他の影響による水表面の局所的な傾きが発生するため、厳密な意味で等流水深を定義することは不可能である。しかし、本研究で用いたような規則的な蛇行水路の場合、流れが十分に発達していれば、地形的に相似な地点では同様のふるまいを持つ流れが出現しているものと思われる。以上の考察に基づき、流れが低水路にのみ流れる場合（単断面）においては、遠心力の影響が最も現れにくいと思われる直線部の中央における水深値をその蛇行半波長における代表水深とし、それら代表水深により描かれる水面形を（仮想）水面勾配と考え、この水面勾配が河床勾配と平行（ $\pm 2\%$ ）となるのを待って（擬似）等流水深が得られたものとした。複断面水路の場合、流れを支配する力学が単断面水路に比して明確ではないため、その反映たる水面形表現にも不明の部分が少なくないが、本研究においては上述の考察を拡張利用し、単断面の場合と同一の計測点および方法を用いることとした。

複断面流れにおいては、水深は水路の幾何形状と同等か若しくはそれ以上に流れを規定するパラメータである。すなわち、流れが高水敷に氾濫する前と後で流れの構造が変化することは容易に推測されることであるが、氾濫後も低水路内流れと高水敷上流れとの相対的な運動量の差により全体の流れ特性が変化することが予想される。したがって本研究では最も典型的な3種の水深を選び、同一の水深条件における蛇行度間の比較も行えるよう考慮した。選ばれた水深は、ほぼ満水状態の低水路内流れ（bankfull）と2種の複断面流れである。複断面流れは相対水深 $Dr = (H-h)/H$ 、ここに H = 低水路内水深、 h = 高水敷高さ）を用いて $Dr = 0.15$ および 0.50 と表される。水理条件は、**Table 2** に示すとおりである。

流速の計測区間は、流入部より数えて第4あるいは第5番目の蛇行部における上流側曲線頂部から次の曲線頂部までの半波長とした。この計測区間は水路下流端から2 m 以上離れており、低下背水の影響は殆ど見られなかった。この区間に13ないし9の計測断面を設定したが、流速計測はこのうち7ないし5断面にて行った（**Fig. 3**）。

Table 2. Hydraulic conditions

Case	Depth condition Dr	Discharge Q ($\times 10^{-3}$ m ³ /s)	Water depth H (m)	Relative depth H/h	Relative depth $(H-h)/H$	Mean velocity U_s (m/s)	Friction velocity ^a u^* (m/s)	Reynolds number ^b Re ($\times 10^4$)	Froude number ^c Fr
R 1	bankfull	1.876	0.0525	0.980	--	0.237	0.0166	2.63	0.431
	0.15	3.102	0.0633	--	0.154	0.157	0.0121	0.82	0.412
	0.50	25.755	0.1078	--	0.503	0.352	0.0225	6.26	0.495
R 2	bankfhl	1.556	0.0519	0.969	--	0.197	0.0148	2.19	0.359
	0.15	2.513	0.0630	--	0.150	0.129	0.0120	0.66	0.340
	0.50	19.996	0.1059	--	0.495	0.282	0.0221	4.92	0.401
R 3	bankfhl	1.382	0.0532	0.991	--	0.170	0.0140	1.95	0.307
	0.15	2.204	0.0631	--	0.149	0.113	0.0120	0.62	0.299
	0.50	19.881	0.1087	--	0.506	0.268	0.0226	5.16	0.374

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

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

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

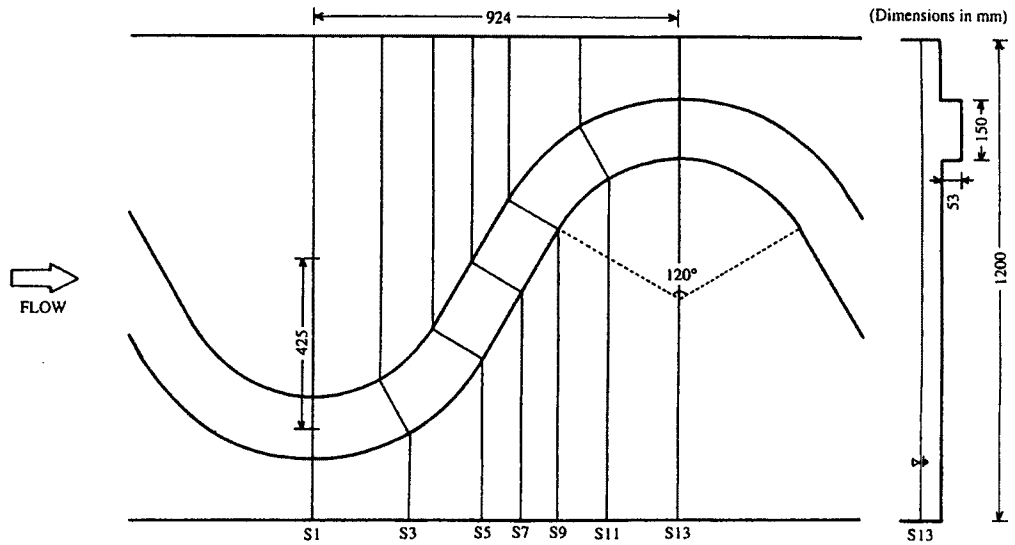


Fig. 3. Tested sections for velocity measurements together with meander dimensions for the $s = 1.37$.

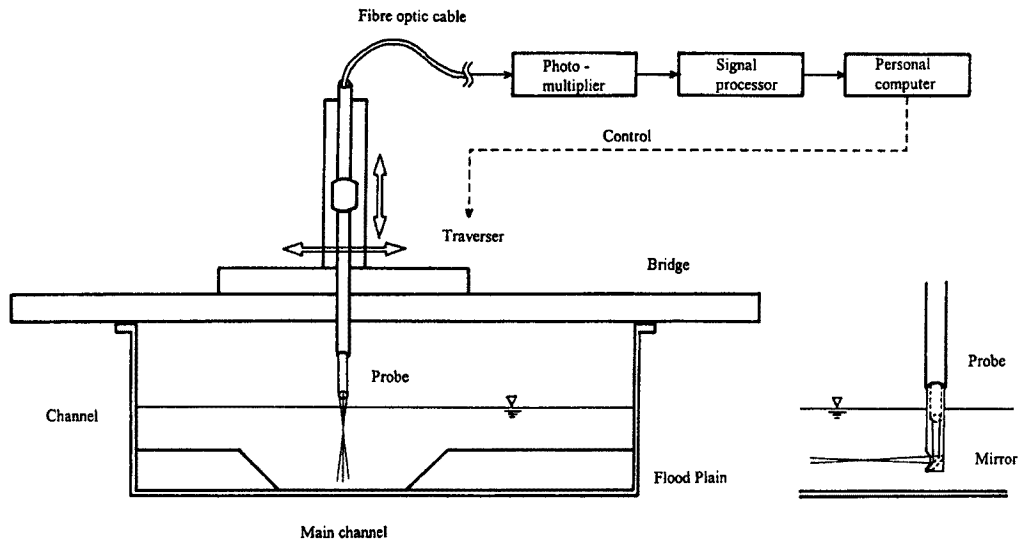


Fig. 4. The laser beam installations and the signal processing system.

1 計測断面内における計測点の設定は、低水路内で密に（鉛直方向 $0.1h$ ，横断方向 $0.1b$ 間隔），高水敷上ではかなり疎に（鉛直方向 $0.2h$ ，横断方向 $0.1B$ 間隔）設定した。これは、本研究の主たる興味が、低水路内における 2 次流の発生・発達機構と、高水敷上流れとの相互干渉によるせん断層の形成にあるためである。低水路内に設定された計測点数は水深に応じて 96 ~ 176 点となるが、半断面に対する計測を前述の自動制御計測システムにより一括して行った。

今回用いた 2 成分レーザ流速計により 1 計測点における 3 成分流速を得るためには、同一点における計測をレーザ光の入射方法を変えて 2 度行う必要があった。すなわち、流下方向 (x 軸) と横断方向 (y 軸) 成分 (u, v) の計測時にはプローブを水面上方に設置し、鉛直方向 (z 軸) 成分計測時には前述の鏡を用いプローブを水中に沈め、流下方向成分と共に (u, w) 計測を行った。計測方法を Fig. 4 に示す。この際、(u, v) 計測では水面変動が、また (u, w) 計測ではプローブ自身による攪乱が問題になるが、前者につい

ては従来の研究^{6,16)}において採用され、また本研究の実験条件の範囲では水面変動は十分小さかったことからその方法をここでも踏襲することとした。また、後者については、計測点をプローブによる後流域の外に置く様レーザー光の入射方法を工夫すること、さらに計測点の位置がプローブから $6.5\text{ cm} > 3D$ (ここに D : プローブの直径) 離れていること等から攪乱の計測点に与える影響は少ないものと考えられた。このことは、同一点において両方法により計測された U および u' がほぼ一致すること (平均誤差: U 約 3%, u' 約 5%), u のスペクトル特性がほぼ一致すること等から確認された。

複断面蛇行開水路流れでは、低水路直線部において上方を横切る高水敷上流れと、それにより誘起される横断方向のせん断応力もまた興味深い。これらの現象を明らかにするため、曲線部頂部を除く3ないし5計測断面については、 (v, w) 計測も行った。この方法による計測結果も上述した方法により同様に比較され、計測の妥当性とデータの信頼度が確かめられている。

なお、本報告では流速の表示方法について、時間変動値を (u, v, w) , その平均値を (U, V, W) , r. m. s. 値を (u', v', w') のように表す。

3. 複断面蛇行開水路流れの速度分布特性

本章においては、前章に述べた方法により計測された複断面蛇行流れの平均流および乱れ特性についての結果を示す。なお、本報告においては、複断面蛇行流れに特有の現象を把握することを主目的として、その特徴を最も典型的な形態で出現させる $s = 1.37$ のケースについてのみ取り上げる。

3.1 平均流特性

(1) 主流速分布

Fig. 5 および 6 は、水深平均された流速分布を示したものである。ここで低水路内については高水敷高

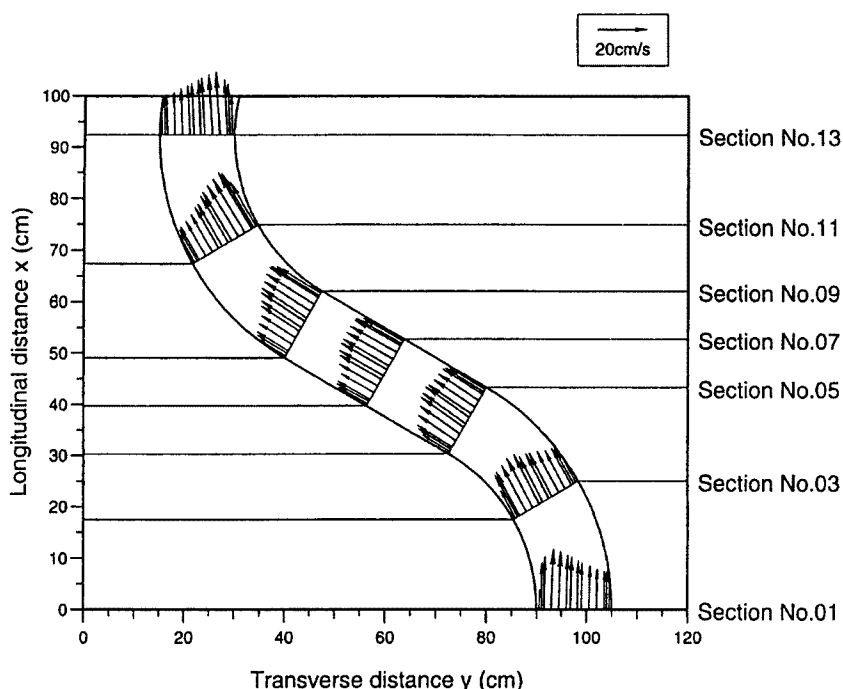


Fig. 5. Depth averaged velocity distribution for the bankfull flow in the $s = 1.37$ channel.

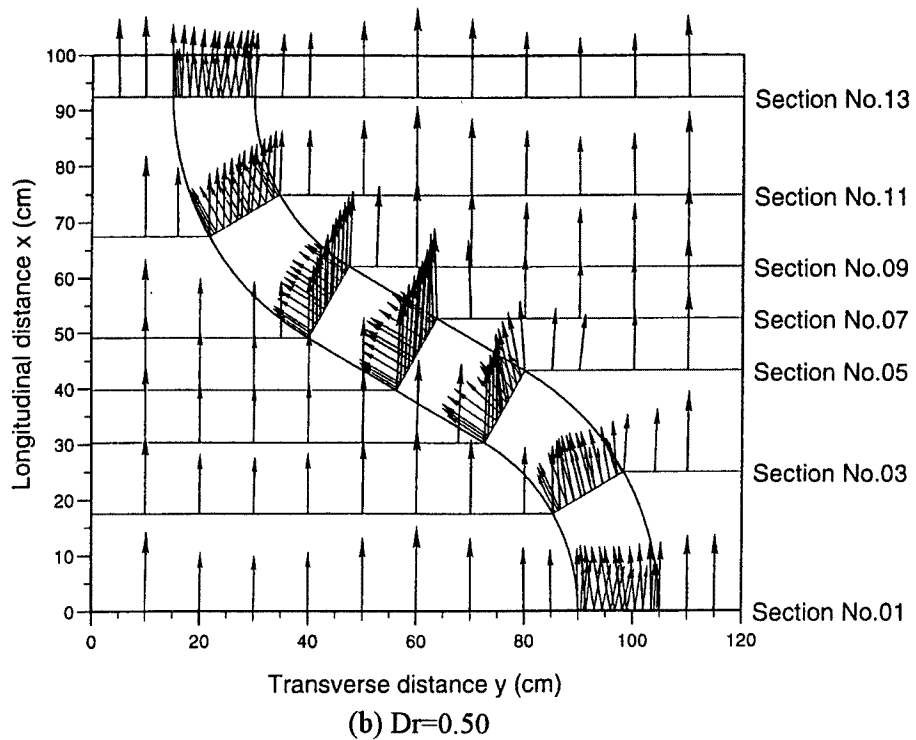
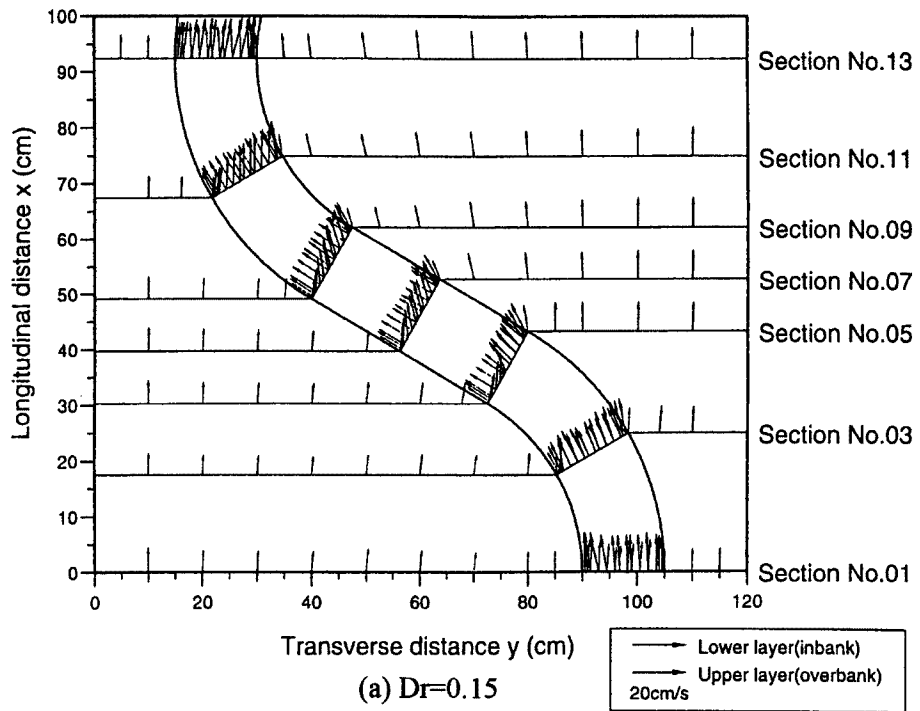


Fig. 6. Layer averaged velocity distribution for the overbank flows in the $s = 1.37$ channel, (a) $Dr = 0.15$ (top) and (b) $Dr = 0.50$ (bottom).

さを境界として上層と下層に分け、それぞれについて平均化を行っている。図中、横軸は左岸側水路側壁よりの距離、縦軸は計測区間における上流側曲線頂部よりの距離である。

図より、bankfull 流れについては、水深平均すると流れはほぼ低水路法線に沿ったものになることがわかる。ただし、曲線部を進み出口に近づくにつれて流線が外側に振れるのも観察され、村本・井上³¹⁾が指摘した湾曲部における2次流の発達域との関連が推測される。

一方、高水敷への冠水が開始され $Dr = 0.15$ になると、bankfull 流れに対して低水路・高水敷とも流速が遅くなっているのがわかる。低水路下層では低水路法線に沿ってほぼ流れているものの、上層では上・下層間の流れの相互干渉により流向が大きく変化させられているのがわかる。この機構は、蛇行域外の高水敷上流れがほぼ側壁と平行に流れていることから推測される。また、交差部（低水路直線部）流入部付近では低水路法線に沿った流れすなわち下層流れが卓越するのに対し、流出部では水路壁に沿った流れすなわち上層流れが支配的である。このことは、干渉機構の空間的な遷移を示唆するものである。

さらに水深が大きくなり $Dr = 0.50$ になると、全般的に上層流れが卓越する。これは、上層流れの流向および下層流れに対する相対的な速度の大きさ等から判断される。交差部流入部下流側の高水敷上で外側へ向かう流れが観察されるが、これは低水路内から高水敷上へ乗り上げる流れと関係するものと思われる。この点と関連させて下層流れを観察すると交差部流入部ではかなりの部分が高水敷上へ向かっているものの、中央より流出部よりではほぼ低水路法線と平行に、またその分布も横断方向にかなり一様となっている。このこともまた、流れの構造が交差部内において、その空間座標により大きく変化することを示唆している。

(2) 低水路内の2次流

Fig. 7 および 8 は、横断面内における2次流ベクトルを、蛇行半波長にわたって示したものである。なお、ベクトルの単位長さは図中右下部において示されているが、それぞれの実験ケースにより異なることに注意を要する。図は視点を上流側に置いたものであり、横軸は低水路左側壁からの距離、縦軸は路床からの距離である。

bankfull 流れについて見ると、曲線部において遠心力の作用に伴い発達する2次流が観察される。すなわち、上流側曲線頂部 (Section 1) において左岸側に存在する時計回りのセルが曲線部後半に進むにつれてその占有領域を拡大し、曲線部出口 (Section 5) では右岸側水面付近を除くほぼ全体がこのセルに占められるようになる。湾曲部においては2次流が完全に発達し一様域に移行した後は、横断面全体を占める大きな1つのセルが観察されることが報告されているが^{20,31)}、本研究で用いた蛇行水路は水路幅 / 曲線半径比 b/r_c が比較的大きいため、2次流の完全発達は曲線部出口においても見られない。直線部に入ると (Section 7) 前述のセルは崩壊過程を辿るようである。ただし次の曲線部に入ると一旦その強さを強めるように見え、完全な崩壊には至らない。右岸側においては、反時計回りのセルが発達し始める。

複断面流れになると、交差部 (Section 5 ~ 9) において断面上方を横切る上層流れが低水路内の2次流構造を規定している。交差部流入部にて下層流れに対してある角度を持って低水路内に侵入する上層流れは、低水路内に時計回りの2次流を引き起こしつつ、自身は段落ち部を通過する流れのように層厚を拡大させる。しかし、本研究で用いた水路は水路幅 / 水深比 b/h が比較的小さいため、流れは間もなく右岸側側壁に近づき、段上がり流れと類似の流況を呈しつつ高水敷へ乗り上がる。低水路内に引き起こされた2次流は、交差部中央～流出部では水路幅全体を占めるほど発達し、その結果上層流れは前述した段落ち～段上がり流れと類似の流況を見せず、2次流セル上を乗り越えてゆく。このことは、前項で述べた交差部における流れの構造の変化と符合する。この2次流セルは上層流れにより右岸側へと移流されつつも、曲線部へ入ってもその強さをあまり弱めず、下流側曲線頂部 (Section 13) では断面内で最も卓越する流れとして、低水路右岸沿いにその位置を占める。この位置は bankfull 流れにおいては反時計回りのセルにより占められていた箇所であり、このことが従来より指摘されてきた単断面蛇行と複断面蛇行における2次流構造の大きな違いである^{19,22,25)}。なお、交差部流入部における段落ち流れとの類似性を指摘したが、本研究

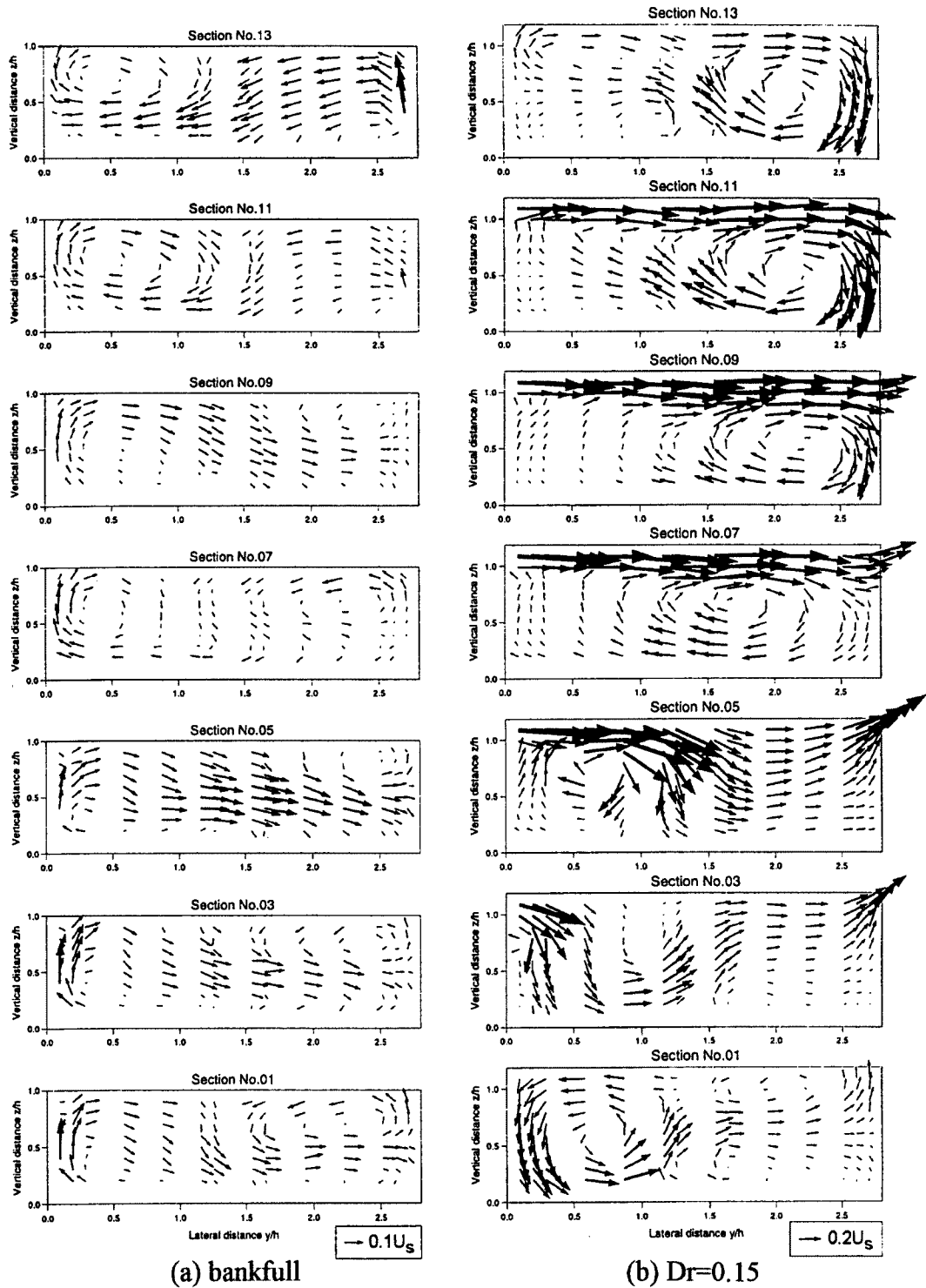


Fig. 7. Secondary flow vectors in the $s = 1.37$ channel, (a) bankfull (left) and (b) $Dr = 0.15$ (right).

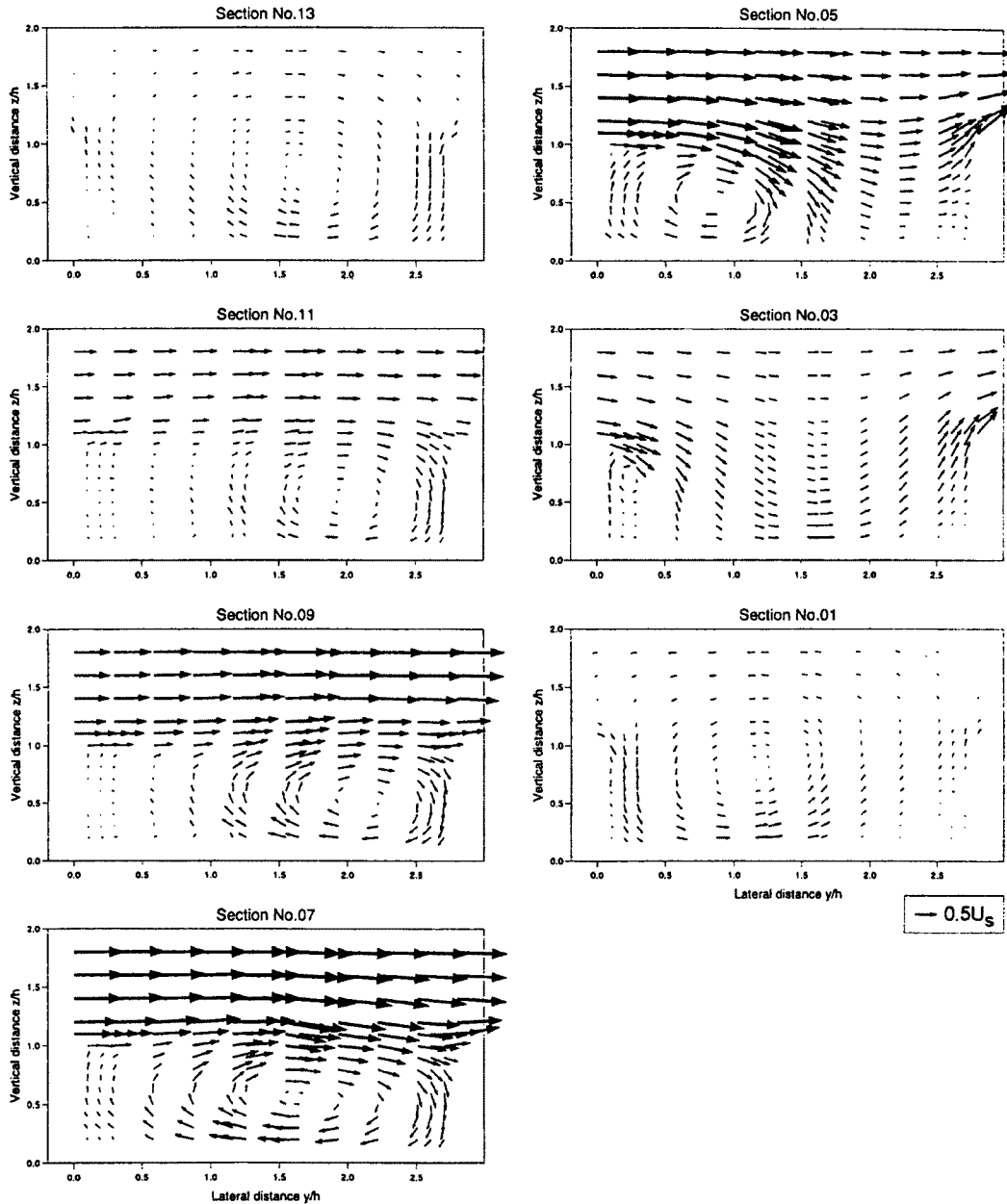


Fig. 8. Secondary flow vectors in the $s = 1.37$ channel, $Dr = 0.50$.

においては路床付近の計測が詳細には行われていないため、再付着点の検討等は行っていない。

以上より、低水路内の2次流を蛇行に沿って詳細に計測することにより、従来より指摘されてきた流れの構造のみならず、その発生・発達機構までも解明できた。このことは、複断面蛇行水路流れにおける物質輸送および河床洗掘・堆積機構を検討する上で、貴重な知見が得られたものとする。

3.2 乱れ特性

(1) 乱れエネルギー分布

Fig. 9 および 10 は、計測された3成分の乱れ強度より計算された乱れエネルギー $k = (u'^2 + v'^2 + w'^2) /$

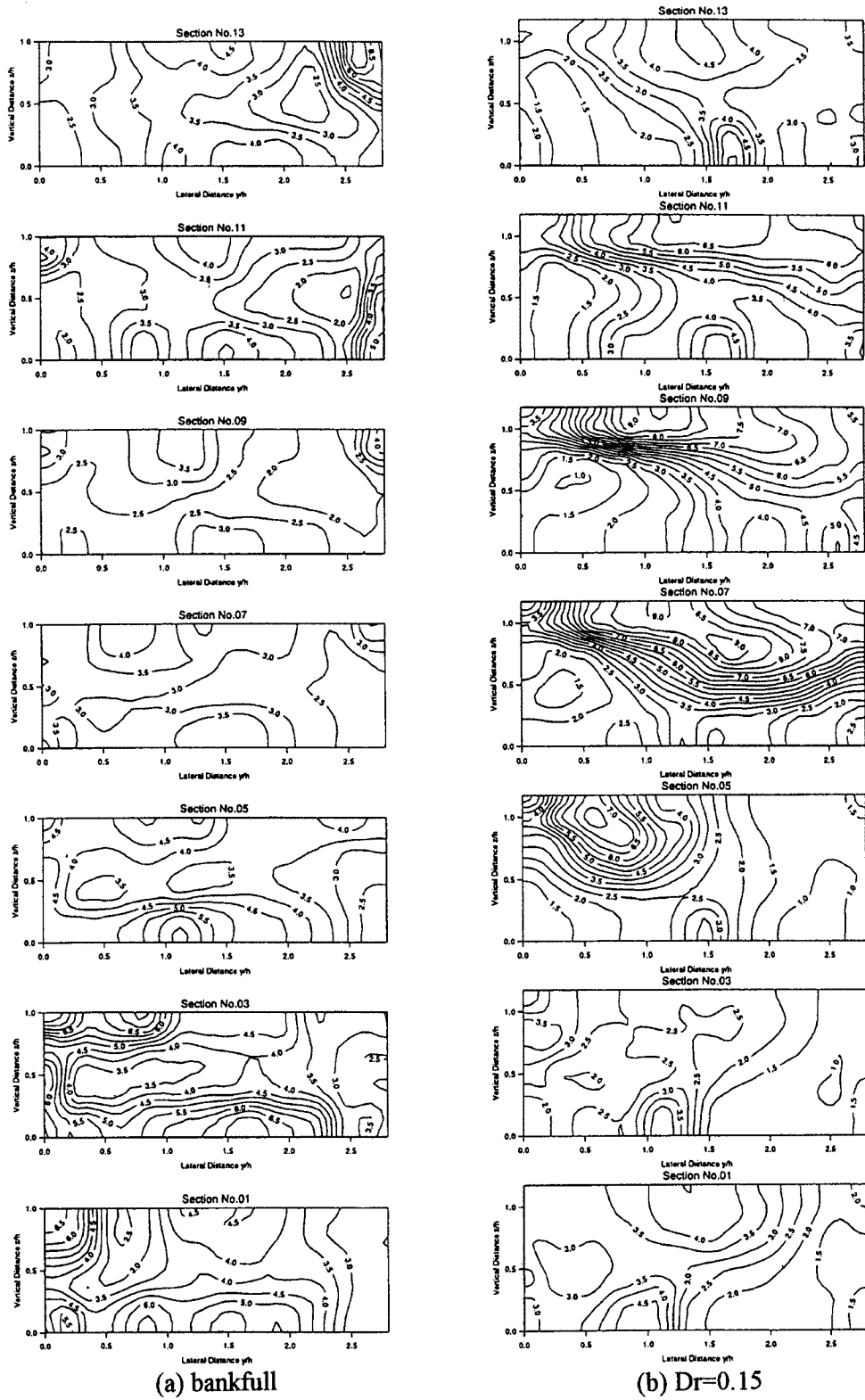


Fig. 9. Turbulent kinetic energy k/u_*^2 in the $s = 1.37$ channel, (a) bankfull (left) and (b) $Dr = 0.15$ (right).

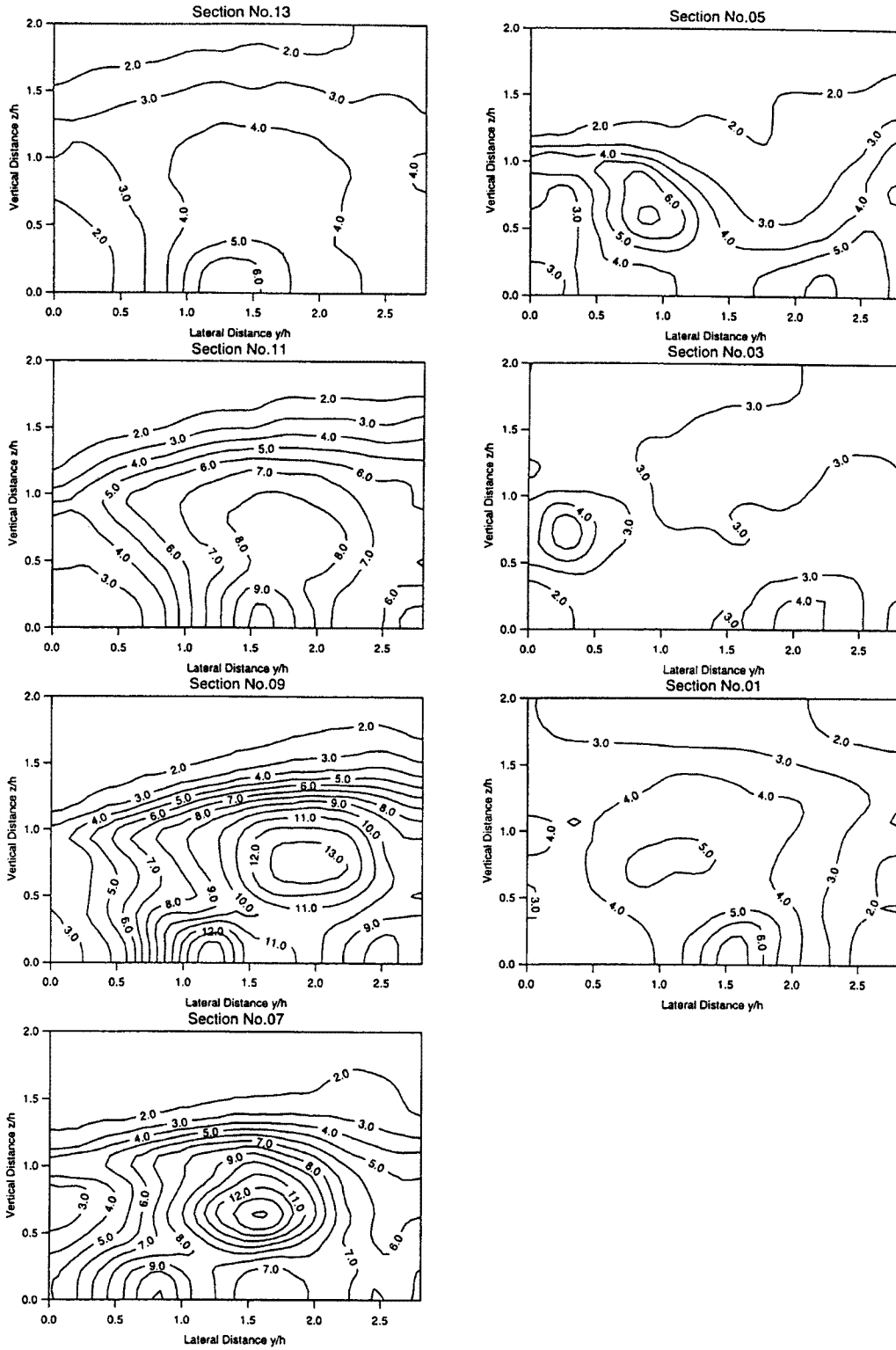


Fig. 10. Turbulent kinetic energy k/u_*^2 in the $s = 1.37$ channel, $Dr = 0.50$.

2の断面内分布を示したものである。図中 k は摩擦速度 u_* （Table 2）を用いて無次元化されている。

bankfull 流れにおいては、路床付近ならびに曲線部内岸に沿った領域において大きな乱れの発生していることがわかる。これらの領域には壁面に作用するせん断応力によって流下方向成分に大きな速度勾配が生じていることが流速分布計測結果よりわかっている。したがって、 k に対する u' の寄与が大きいのは、このことと関連するものと思われる。なお曲線部において水路中央水面付近にも比較的乱れの大きな領域が見られるが、これは v' からの寄与である。これは、曲線部において遠心力により横断方向成分が加速されることと関係するものと思われる。

$Dr = 0.15$ では、交差部の水面付近において乱れの大きな領域が見られるが、これは前述した平均流に関する結果から考察すると、上層流れが下層流れと激しく混合した結果だと考えられる。このことは、この領域において u' と v' の k に対する寄与がほぼ同程度ということからも推測される。すなわち、各層の流れとその主たる方向成分を考えると、 u' の寄与は主に下層流れによるもの、また v' の寄与は主に上層流れによるものと考えられ、 $Dr = 0.15$ においてはこれら流れの相対的運動量が同程度であり、流下・横断両方向について激しい混合が行われているものと考えられる。なお、高乱れ領域が水面にまで達しているが、これは高水敷上水深が非常に浅いために十分な計測点を確保できなかったことによる可能性も考えられる。

$Dr = 0.50$ では、大きな乱れを発生する領域の中心が2次流セルの中心と密接な関連を持って存在していることが観察される（Fig. 6参照）。またこの水深条件では、高乱れ領域はほぼ下層に存在することがわかる。これは、平均流について上層流れが卓越していることを考慮すると、上層流れが低水路を通過する際、地形的条件および下層流れとの干渉により大きな乱れが発生しているものと思われる。この考察は、 k に対する寄与は v' が最も大きいこととも矛盾しない。この結果はさらに、「水路の疎通能を考える場合、複断面蛇行水路では水深が大きい時には低水路は通水面積を提供するよりはむしろ付加的な粗度として働く」という Ervine & Ellis²¹⁾の推論を保持するものである。

（2）レイノルズ応力分布

レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の分布を Fig. 11 および 12 に、 $-\overline{uv}$ の分布を Fig. 13 および 14 に示す。前項の k 同様に、レイノルズ応力も u_*^2 により無次元化されている。

bankfull 流れについて見ると、 $-\overline{uv}$ の符号と $\partial U/\partial y$ の符号が良く一致している。 $-\overline{uv}$ の最大値は水面付近に現れ、これは水路中央部で横断方向の流速勾配は最大となり、なおかつそれは水面付近において最も顕著であることと符合する。また $-\overline{uv}$ については、半水深付近で0、それより水面側で負、路床側で正となる分布を示している。半水深より路床へ向かってはほぼ単調増加し、プレストン管により計測された底面せん断力はほぼ $1.0 u_*^2$ となる。ただし、曲線部においては底面せん断力は非一様分布を示し、内岸側で大きい。これは、内岸側において大きな主流速が観察されることと関係すると考えられる。

複断面流れになると、 $-\overline{uv}$ は非常に複雑な分布を示し、 $\partial U/\partial y$ との相関があまり見られない。このことは、数値モデルを適用するに当たって単純な渦動粘性モデルでは流れが再現され得ない可能性のあることを示唆している。大きなせん断力を受ける領域は、主に上層と下層の境界および路床付近に存在し、これは特に $Dr = 0.50$ において顕著である。前者の領域は、上層流れと下層流れの干渉と密接な関係があるものと思われる。一方 $-\overline{uv}$ は、上層と下層の境界部付近に非常に大きな絶対値を持つ領域が広がっている。特にその値は交差部において大きく、鉛直方向における激しい流体混合現象の存在を伺わせる。その符号は交差部において負、曲線部において正となり、上層流れと下層流れの低水路に沿った方向での流速差と相関を持つ。これら内部干渉領域における $-\overline{uv}$ の絶対値と比較して底面せん断力の大きさは非常に小さく、 $0.2 \sim 0.6 u_*^2$ 程度である。これより複断面蛇行水路においては、流れが低水路内に留まる場合と洪水時では、流砂現象も変化することが予想される。

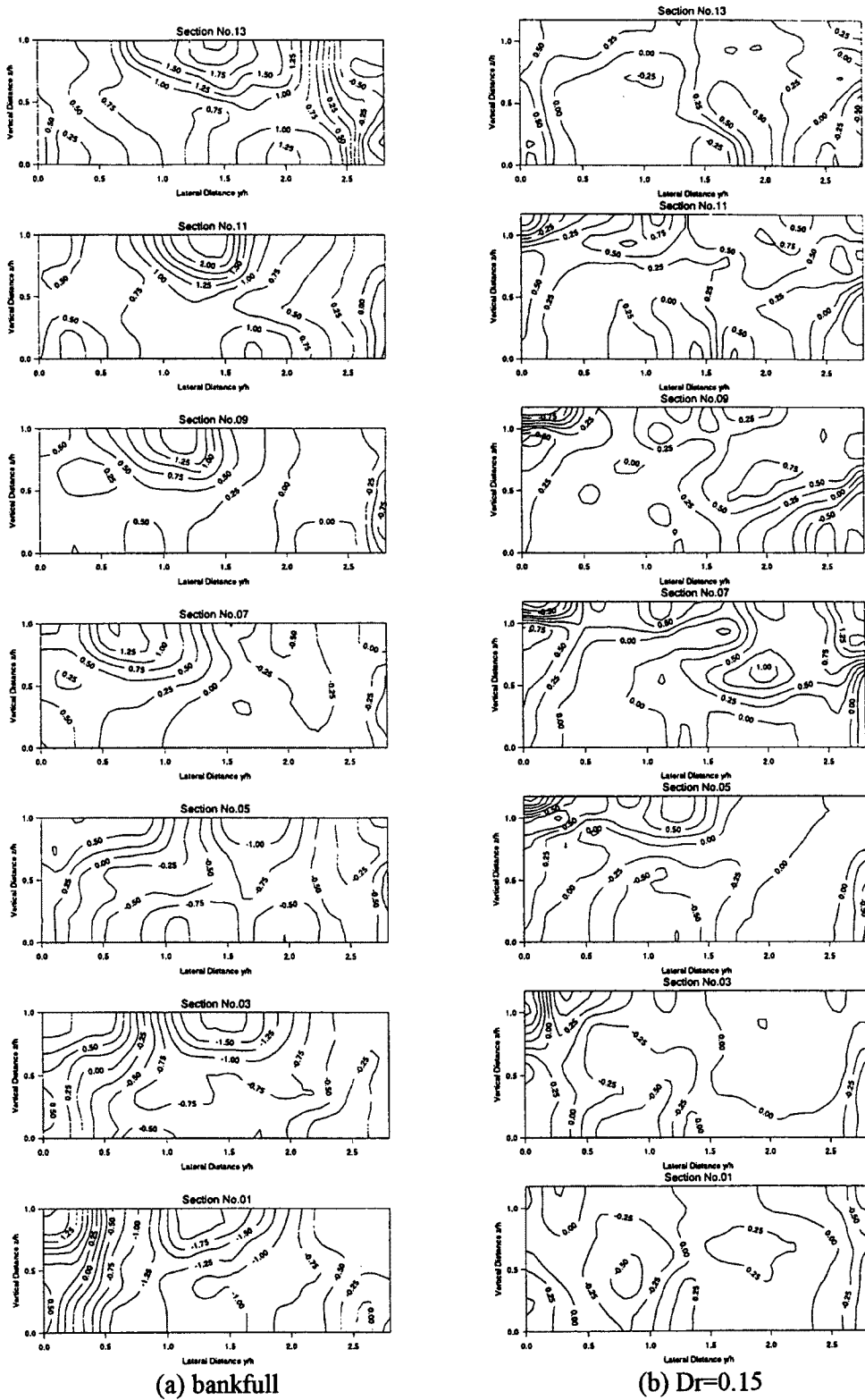


Fig. 11. Reynolds stress $-\overline{uv}/u_*^2$ in the $s=1.37$ channel, (a) bankfull (left) and (b) $Dr=0.15$ (right).

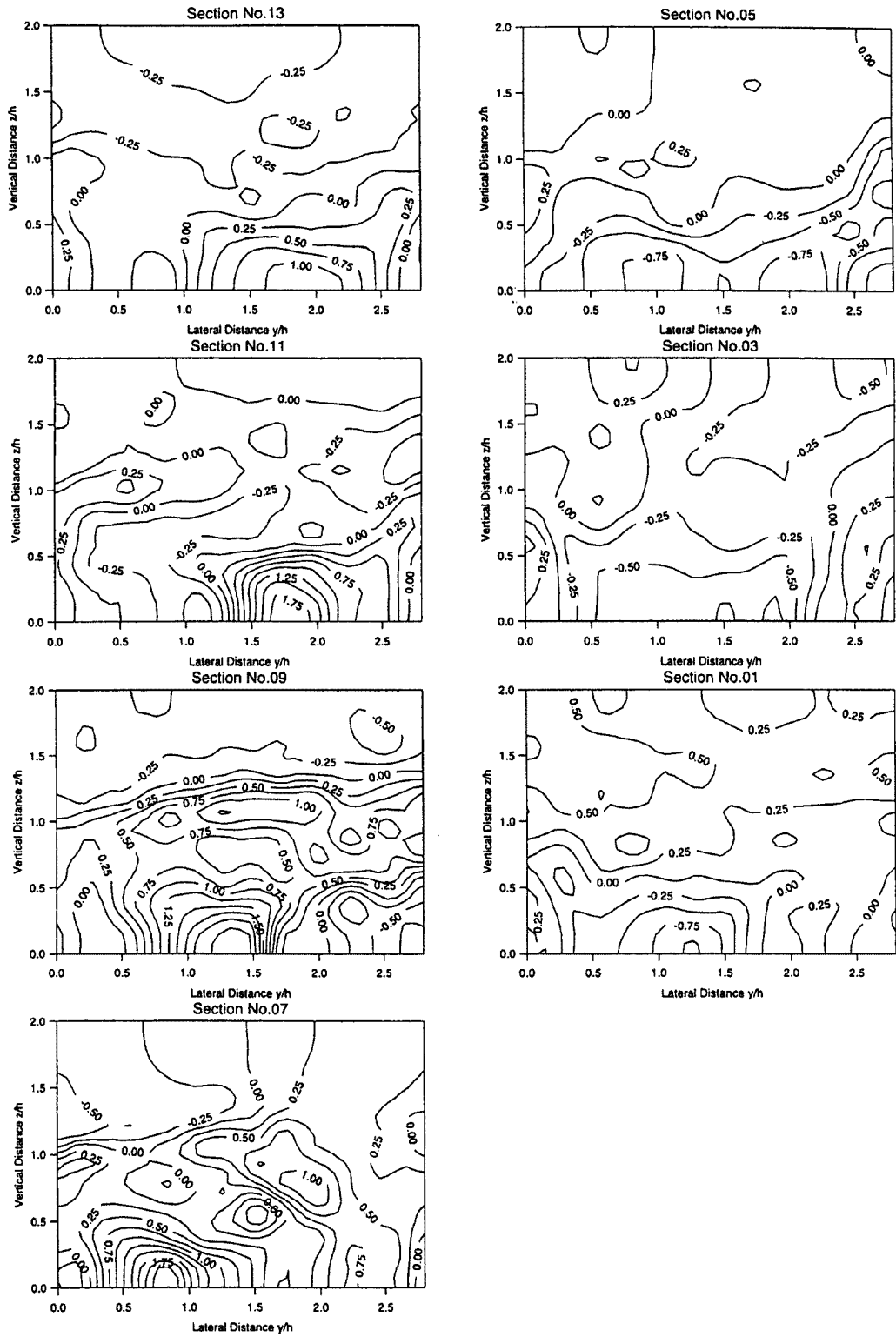


Fig. 12. Reynolds stress $-\overline{u'v'}/u_*^2$ in the $s = 1.37$ channel, $Dr = 0.50$.

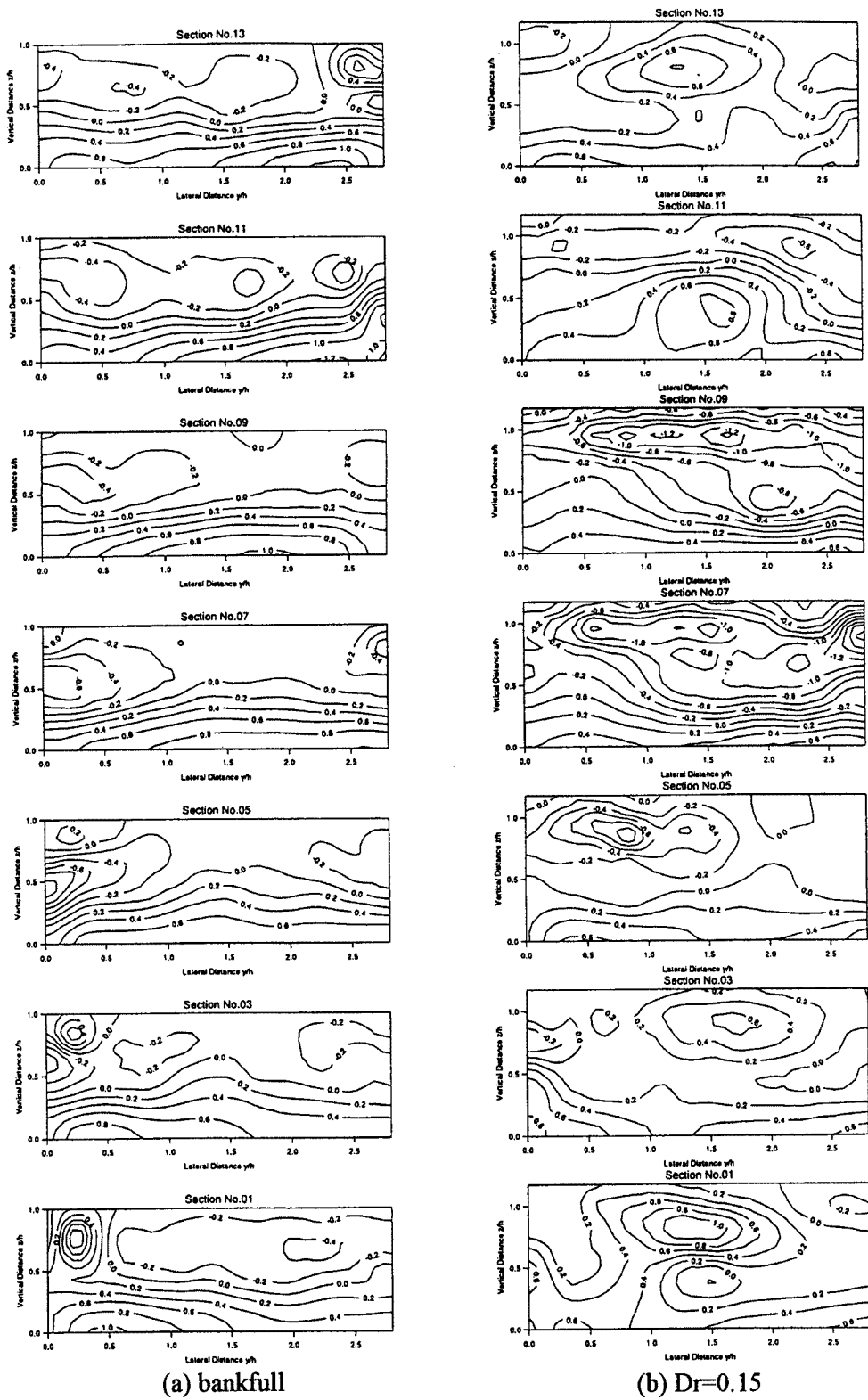


Fig. 13. Reynolds stress $-\overline{uw}/u_*^2$ in the $s = 1.37$ channel, (a) bankfull (left) and (b) $Dr = 0.15$ (right).

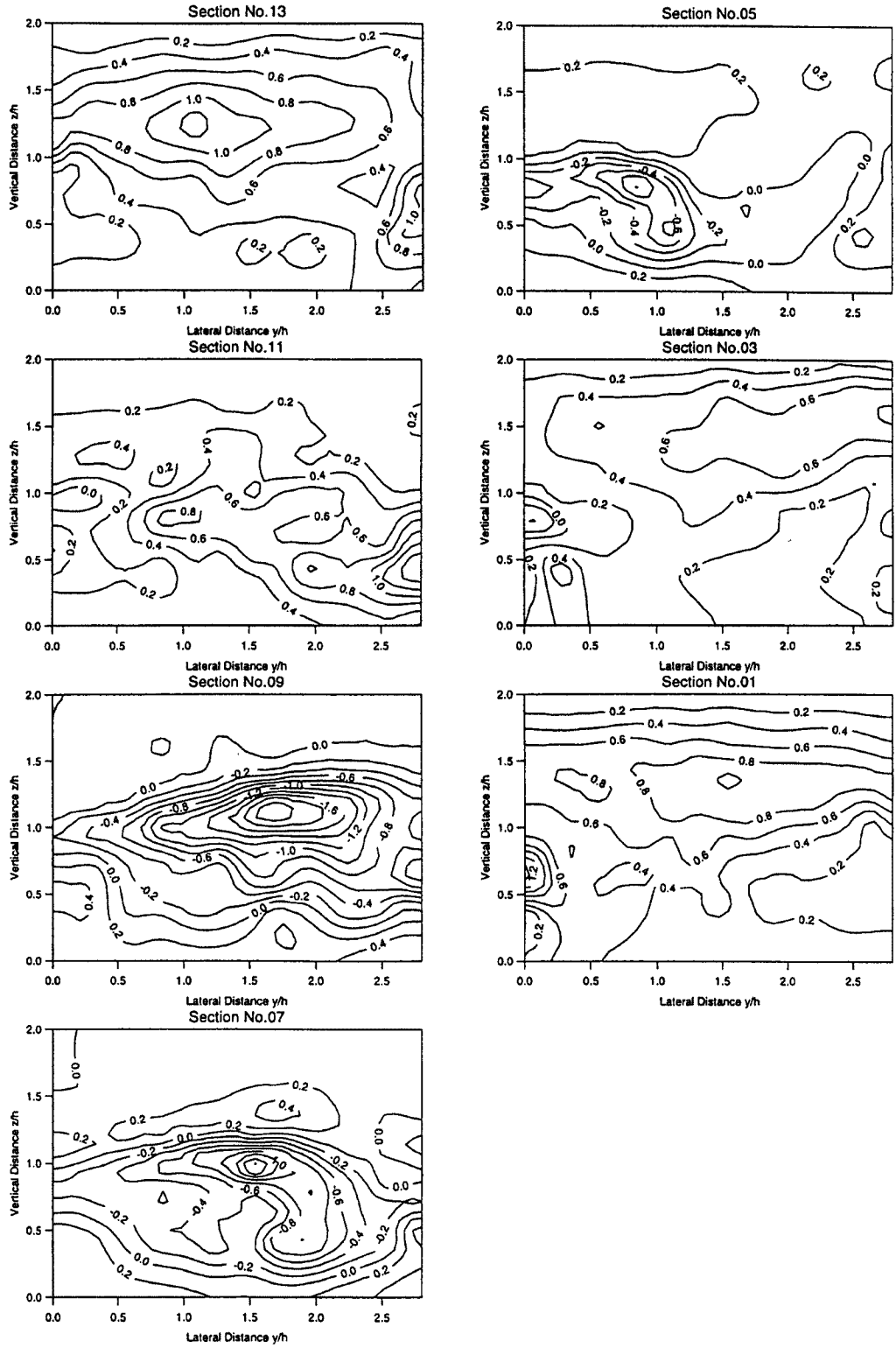


Fig. 14. Reynolds stress $-\overline{uw}/u_*^2$ in the $s = 1.37$ channel, $Dr = 0.50$.

4. おわりに

本研究は、複断面蛇行開水路流れを対象とし、2成分光ファイバ・レーザ・ドップラ流速計 (FLDA) を用いた流速計測を行い、その平均流ならびに乱れ特性について若干の検討を加えたものである。本研究により得られた主な成果について列挙すると以下のようである。

- 1) 複断面蛇行流れのような非常に複雑な流れに対しても、本研究で用いた方法によれば FLDA による流速計測は可能であり、2次流・乱れの分布等に詳細な計測が可能であることがわかった。
- 2) 複断面蛇行流れの主流速分布について、高水敷高さを境界として上層・下層に分割して見ると、氾濫水深が比較的浅い場合 ($Dr = 0.15$) には下層流れは単断面流れの場合と同じく蛇行法線に沿って流れる。ただし交差部においては上層流れと激しく干渉し、その結果上層流れはその流向を大きく変化させられる。一方、氾濫水深が深くなると ($Dr = 0.50$) 上層流れが卓越し、交差部流入部における低水路内への流れ込み → 高水敷上への乗り上げが明確となる。
- 3) 低水路内の2次流について、その発生・発達機構を支配するのは、単断面蛇行の場合曲線部にて働く遠心力であるが、複断面蛇行の場合交差部にて起こる上層流れと下層流れの相互干渉である。これにより曲線頂部において卓越する2次流の向きが単断面と複断面とは逆となることも説明できる。
- 4) 乱れエネルギーの分布より、単断面蛇行流れにおける乱れの発生の主因は、固定壁とのせん断である。対して複断面蛇行流れでは、壁面での摩擦のほかに2次流・流れの相互干渉による内部摩擦等がある。これら付加的な要因は、時にせん断乱流の主因たるべき壁面摩擦以上に大きな乱れを発生することもある。
- 5) 複断面蛇行流れにおいては、渦動粘性係数に基づくレイノルズ応力と速度勾配との相関が成り立つとは限らない。
- 6) 複断面蛇行水路における上層流れと下層流れの干渉により発生するせん断応力は、路床面において発生するせん断応力に比して非常に大きく、その絶対値は交差部において時に2～5倍に及ぶことがある。

本報告は、複断面蛇行開水路流れの水理に関する諸問題を論じる第一段階として、流れの構造の解明を目指したものであるが、定性的な特徴の観察に終始し、当初の目的を十分達したとは言いがたい。今後は、今回明らかになった物理機構の定量的評価を基礎方程式に基づき検討する。その過程を通して、抵抗特性の予測式の定式化、ならびに本報告で特定された数値モデルの問題点の検証等に活用できる形でのデータ解析を進める予定である。

参考文献

- 1) Sellin, R. H. J. : A Laboratory Investigation into the Interaction between the Flow in the Channel of a River and that over its Floodplain, *La Houille Blanche*, No. 7, 1964, pp. 793 - 802.
- 2) Zheleznyakov, G. V. : Relative Deficit of Mean Velocity of Unstable River Flow, —Kinematic Effect in River Beds with Floodplain—, *Proc. 11 th IAHR Cong., Leningrad*, 1965.
- 3) 今本博健・久下俊夫：複断面流れの水理特性に関する基礎的研究, 京大防災研年報, 第17号 B, 1974, pp. 665 - 679.
- 4) 建設省河川局監修：河川砂防技術基準 (案), 山海堂, 1976.
- 5) 今本博健・石垣泰輔：複断面開水路流れの水理特性について (4), 京大防災研年報, 第33号 B-2, 1990, pp. 559 - 569.
- 6) Tominaga, A. and I. Nezu : Turbulent Structure in Compound Open-channel Flows, *J. Hydr. Eng.*, Vol. 117, No. 1, 1991, pp. 21 - 41.

- 7) Kawahara, Y. and N. Tamai : Numerical Calculation of Turbulent Flows in Compound Channels with an Algebraic Stress Turbulence Model, Proc. 3 rd Int. Symp. on Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements, Tokyo, 1988, pp. 9 - 17.
- 8) Kawahara, Y. and N. Tamai : Mechanism of Lateral Momentum Transfer in Compound Channel Flows, Proc. 23 rd IAHR Cong., Ottawa, 1989, pp. B 463 -B 470.
- 9) 井田至春：広巾員水路の定常流—断面形の影響について—, 土木学会論文集, 69 号別冊 (3-2), 1960.
- 10) 高橋 保：河道における洪水流の特性に関する研究, 京都大学工学博士学位論文, 1971.
- 11) 福岡捷二・藤田光一：複断面河道の抵抗予測と河道計画への応用, 土木学会論文集, 第 411 号, II-12, 1989, pp. 63 - 72.
- 12) 室田 明・福原輝幸・勢田昌功：複断面流れの流量評価に関する研究, 水工学論文集, 第 34 巻, 1990, pp. 415 - 420.
- 13) 今本博健・石垣泰輔・武藤裕則：複断面開水路流れの水利特性について（5）, 京大防災研年報, 第 34 号 B-2, 1991, pp. 387 - 399.
- 14) 今本博健・石垣泰輔・塩野耕二：複断面開水路流れの水利特性について（6）, 京大防災研年報, 第 35 号 B-2, 1992, pp. 349 - 364.
- 15) Wormleaton, P. R. : Determination of Discharge in Compound Channels Using the Dynamic Equation for Lateral Velocity Distribution, Proc. Int. Conf. on Fluvial Hydraulics, Budapest, 1988, pp. 98 - 103.
- 16) Shiono, K. and D. W. Knight : Turbulent Open-channel Flows with Variable Depth across the Channel, J. Fluid Mech., Vol. 222, 1991, pp. 617 - 646.
- 17) 河原能久・玉井信行：新しい代数的応力モデルの提案とその複断面流路の流れへの適用, 第 33 回水利講演会論文集, 1989, pp. 289 - 294.
- 18) Naot, D., I. Nezu and H. Nakagawa : Hydrodynamic Behavior of Compound rectangular open channels, J. Hydr. Eng., Vol. 119, No. 3, 1993, pp. 390 - 408.
- 19) Toebe, G. H. and A. A. Sooky : Hydraulics of Meandering Rivers with Floodplains, Proc. ASCE, Vol. 93, No. WW2, 1967, pp. 213 - 236.
- 20) 今本博健・石垣泰輔・藤沢 寛：複断面彎曲開水路流れの水利特性について（1）, 京大防災研年報, 第 25 号 B-2, 1982, pp. 529 - 543.
- 21) Ervine, D. A. and J. Ellis : Experimental and Computational Aspects of Overbank Floodplain Flow, Trans. Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences, Vol. 78, 1987, pp. 315 - 325.
- 22) Kiely, G. K. : Overbank Flow in Meandering Compound Channels, The Important Mechanisms, Int. Conf. on River Flood Hydraulics, Wallingford, 1990, pp. 207 - 217.
- 23) Greenhill, R. K. and R. H. J. Sellin : Development of a Simple Method to Predict Discharge in Compound Meandering Channels, Proc. ICE, Wat., Marit. and Energy, Vol. 101, 1993, pp. 37 - 44.
- 24) Willetts, B. B. and R. I. Hardwick : Stage Dependency for Overbank Flow in Meandering Channels, Proc. ICE, Wat., Marit. and Energy, Vol. 101, 1993, pp. 45 - 54.
- 25) Sellin, R. H. J., D. A. Ervine and B. B. Willetts : Behaviour of Meandering Two-stage Channels, Proc. ICE, Wat., Marit. and Energy, Vol. 101, 1993, pp. 99 - 111.
- 26) Ervine, D. A., B. B. Willetts, R. H. J. Sellin and M. Lorena : Factors Affecting Conveyance in Meandering Compound Flows, J. Hydr. Eng., Vol. 119, No. 12, 1993, pp. 1383 - 1399.
- 27) James, C. S. and J. B. Wark : Conveyance Estimation for Meandering Channels, Report SR

- 329, HR Wallingford, 1992.
- 28) 長谷川和義：沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究，北海道大学工学博士学位論文，1984.
- 29) Yalin, M. S. : River Mechanics, Pergamon Press, Oxford, 1992.
- 30) Morisawa, M. : Rivers, Form and Process, Geomorphology Texts, Longman, New York, 1985.
- 31) 村本嘉雄・井上喬之：開水路彎曲流の内部機構，京大防災研年報，第 8 号，1965，pp. 415 - 427.