

複断面蛇行開水路流れの水利特性について (2)

武藤 裕則・今本 博健・石垣 泰輔・塩野 耕二

A STUDY ON THE FLOW IN COMPOUND MEANDERING CHANNELS (2)

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

Synopsis

Flow structure in meandering channels during floods is strongly distorted and has a 3-dimensional nature. This nature is brought by the interaction process between the upper and lower layer flows. Many parameters, both geometrically and hydraulically, have influences on determining this process. Thus it is important to explore in a wide range the effects of these parameters on the structure of compound meandering flow.

This paper shows some experimental results of velocity and turbulence measurements in compound meandering channels. Particular care was taken to examine the effects of sinuosity (s) and cross-sectional shape of the main channel. Their roles as determinants for the flow structure identified through the examination are as follows:

- 1) Sinuosity strongly influences the interaction process due to the change of the crossing angle between the upper and lower layer flows. However the structural alteration due to this angle change can only be seen within a rather limited area in the crossover region.
- 2) The channel cross-sectional shape also has significant effect on the flow structure, specially on the structure near the side wall of the channel. From the viewpoint of channel conveyance, its effect on the flow exchange process between the main channel and the flood plain is of particular importance.

1. はじめに

前報¹⁾では、複断面蛇行開水路流れを対象とした光ファイバレーザドップラ流速計による速度計測法について詳述し、得られた速度分布計測結果から流れの内部構造および乱れ特性について検討した。その結果、複断面蛇行開水路流れの3次元性、特に2次流の発生・発達機構や上層・下層流れの内部干渉とそれに伴うせん断層の形成過程など興味深い流れの構造が明らかとなった。しかしながら、そこでも指摘しているように、複断面蛇行開水路流れを規定すべきパラメータは地形的にも水理的にも非常に多く、主に水深の変化に伴う流れの構造の変化の検討に焦点を絞った前報の結果は、流れの特徴全てを網羅していない可能性も否定しきれず、そこで特定された流れの構造の普遍性には多少の疑問が残る。

そこで本報では、蛇行水路の幾何形状が流れの構造に与える影響を検討することを目的とし、前報において取り上げた蛇行度 $s = 1.37$ の水路を原型として蛇行度および水路の断面形状を変化させた場合の速度および乱れ計測結果を示す。その上で、それらの水利および幾何条件下の実験結果から特定される、複断面蛇行開水路流れの3次元性について検討する。

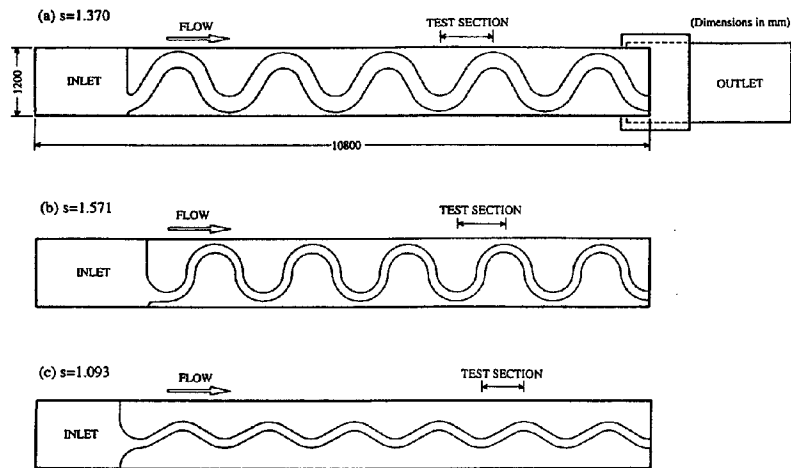


Fig. 1 The experimental flume and meandering channels

Table 1 Meander parameters for tested channels.

	Angle of arc $\phi(^{\circ})$	Meader Wavelength $L_w(\text{mm})$	Total width $B(\text{mm})$	Width of meander $B_w(\text{mm})$	Bend radius $r_c(\text{mm})$
R1-rectangular	60	1502	1200	452	425
R2-rectangular	120	1848	1200	900	425
R3-rectangular	180	1700	1200	1000	425
T2-trapezoidal	120	1848	1200	1000	425

Crossover length $L_{co}(\text{mm})$	Crossover angle $\theta(^{\circ})$	Sinuosity s	Channel width $b(\text{mm})$	Flood plain height $h(\text{mm})$	Channel side wall slope s_w
376	30	1.093	150	53	0
376	60	1.370	150	53	0
0	90	1.571	150	53	0
376	60	1.370	165	53	1 : 1

Table 2 Hydraulic conditions

	Depth condition D_r	Discharge Q ($\times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$)	Water depth $H(\text{m})$	Relative depth H/h	Relative depth $(H-h)/H$	Mean velocity $U_s(\text{m/s})$	Friction velocity ^a $u_*(\text{m/s})$	Reynolds number ^b $Re(\times 10^4)$	Froude number ^c Fr
R1	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
R2	bankfull	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
R3	bankfull	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
T2	bankfull	2.251	0.0517	0.967	—	0.207	0.0160	2.74	0.349
	0.15	3.631	0.0626	—	0.146	0.163	0.0131	1.03	0.391
	0.25	6.695	0.0714	—	0.251	0.204	0.0158	1.84	0.408

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

なお、実験装置および方法については前報を参照されたい。**Fig. 1**に本報で取り上げた3種の蛇行度による水路の平面図を示す。これら蛇行水路の諸元は**Table 1**に示したとおりである。水理条件は**Table 2**に示す。

2. 水路の幾何形状の流れの構造に与える影響

前述したように、本章における水路の幾何形状の流れに与える影響の検討は、前報で示した $s = 1.37$ のケースにおける結果との比較という形態をとることとする。すなわち、前報で特定された流れの構造の幾何形状に対する普遍性の検証を行うこととなる。検討にあたって考慮したパラメータは水路の蛇行度と断面形状である。蛇行度については、曲線部中心角を変化させることによって得られる $s = 1.09$ および 1.57 のケースを対象とした（**Fig. 1**参照）。また断面形状については、低水路のり勾配を $1:1$ とした台形断面水路を対象とした。

2.1 低水路蛇行度の影響

(1) $s = 1.57$ の場合

低水路の蛇行度が大きくなれば、洪水時には上層流れと下層流れの干渉の強さが増し、その結果流れ場はさらに歪んだものとなることが予想される。すなわち、複断面蛇行開水路流れに特有の2次流やせん断層が上述した内部干渉過程からもたらされるものとするならば、干渉過程の変化はそれらの構造やあるいは乱れの分布等に直接影響するものと考えられる。

例えば、**Fig. 2**および**3**は、洪水時（ $Dr = 0.15$ ）の主流速および2次流ベクトルを $s = 1.37$ と 1.57 について示したものであるが、上・下層流れの交差角が両ケース間で異なる**Section 7**においてはこれらの流速分布結果に大きな差異のあることがわかる。しかしながら、むしろ興味深いのはこれ以外の断面では非常に類似した流れの構造が観察される点である。このことは、ある点において表れた構造が上流履歴として下流側に以降に影響を及ぼす通常の場合と異なり、複断面蛇行開水路流れのような複雑な過程を持った流れの場合には各点における外的な条件（幾何的および水理的条件）によりもたらされた構造が上流履歴によるものを常に更新していると言うことができる。したがって、複断面蛇行開水路流れのように内部干渉が流れの構造を決定する主たる要因となっている場合、類似の幾何条件は類似の干渉過程をもたらし、その結果それらの地点では同様のふるまいをする流れが表れているものと考えられる。

同様の比較を乱れ特性について行ったのが**Fig. 4**および**5**である。**Fig. 4**は乱れエネルギー $k = (u'^2 + v'^2 + w'^2)/2$ の分布を、**Fig. 5**はレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の分布を示したものである。どちらも摩擦速度 u_* で無次元化されている。なお水深の条件は $Dr = 0.15$ である。これらの結果からも、幾何形状の差異による流れの構造への影響は、交差角の異なる**Section 7**を中心とした交差部周辺の局所的な部分に留まることがわかる。それらの部分における最も顕著な差異は、高水敷高さすなわち上・下層の界面付近における乱れならびにせん断力の大きさであり、交差角の大きい $s = 1.57$ の方がこれらの値も大きい。しかしそれ以外の部分では、例えば乱れエネルギーについて見た場合、その大きさは両ケース間でそれほど大きな差異は認められない。このことは、平均流に関して考察した幾何形状と干渉過程の関係により説明され得る結果であるが、重要なのは乱れの大きさが蛇行度に伴ってあまり変化しない点である。Hardwick²⁾は染料を用いた可視化結果から「この範囲の蛇行度の変化（ $s = 1.3 \sim 2.0$ ）に対して乱れの大きさはあまり変わらない」と定性的に推量を行っているが、ここで示した乱れ計測結果はこの点を定量的に検証し、かつ蛇行度の増加に伴う水路の疎通能の減少は乱れの増加によりもたらされるものではないことを示唆している。

(2) $s = 1.09$ の場合

前節とは逆に低水路の蛇行度が小さくなれば、1)複断面水路全体としてみた場合、形状が直線水路に近づくことから流れの特徴も直線水路のそれに類似してくる、2)交差角が小さくなることから、上・下層流れ間

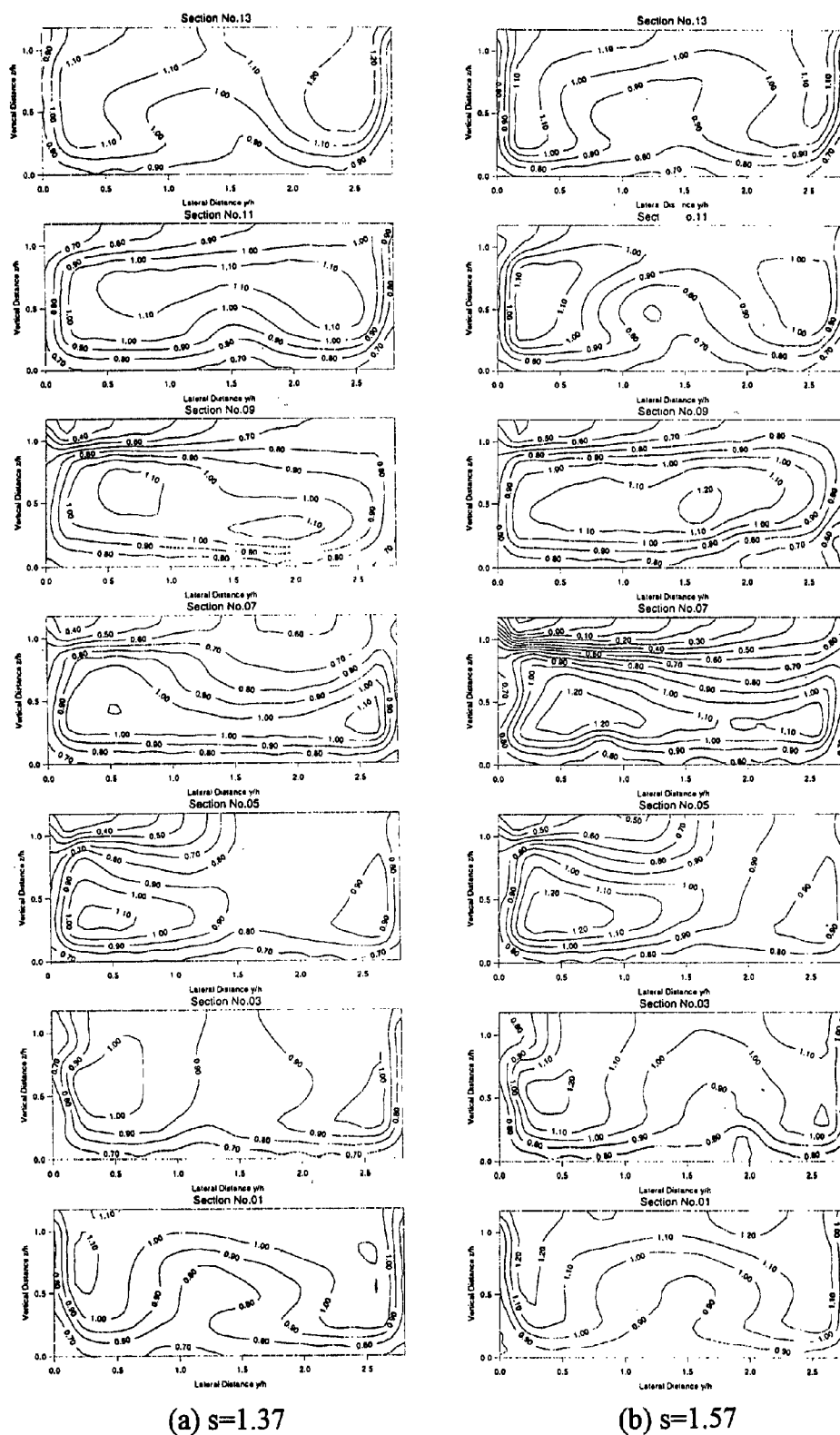


Fig. 2 Streamwise velocity for the overbank flow, $Dr = 0.15$, (a) $s = 1.37$ (left) and (b) $s = 1.57$ (right)

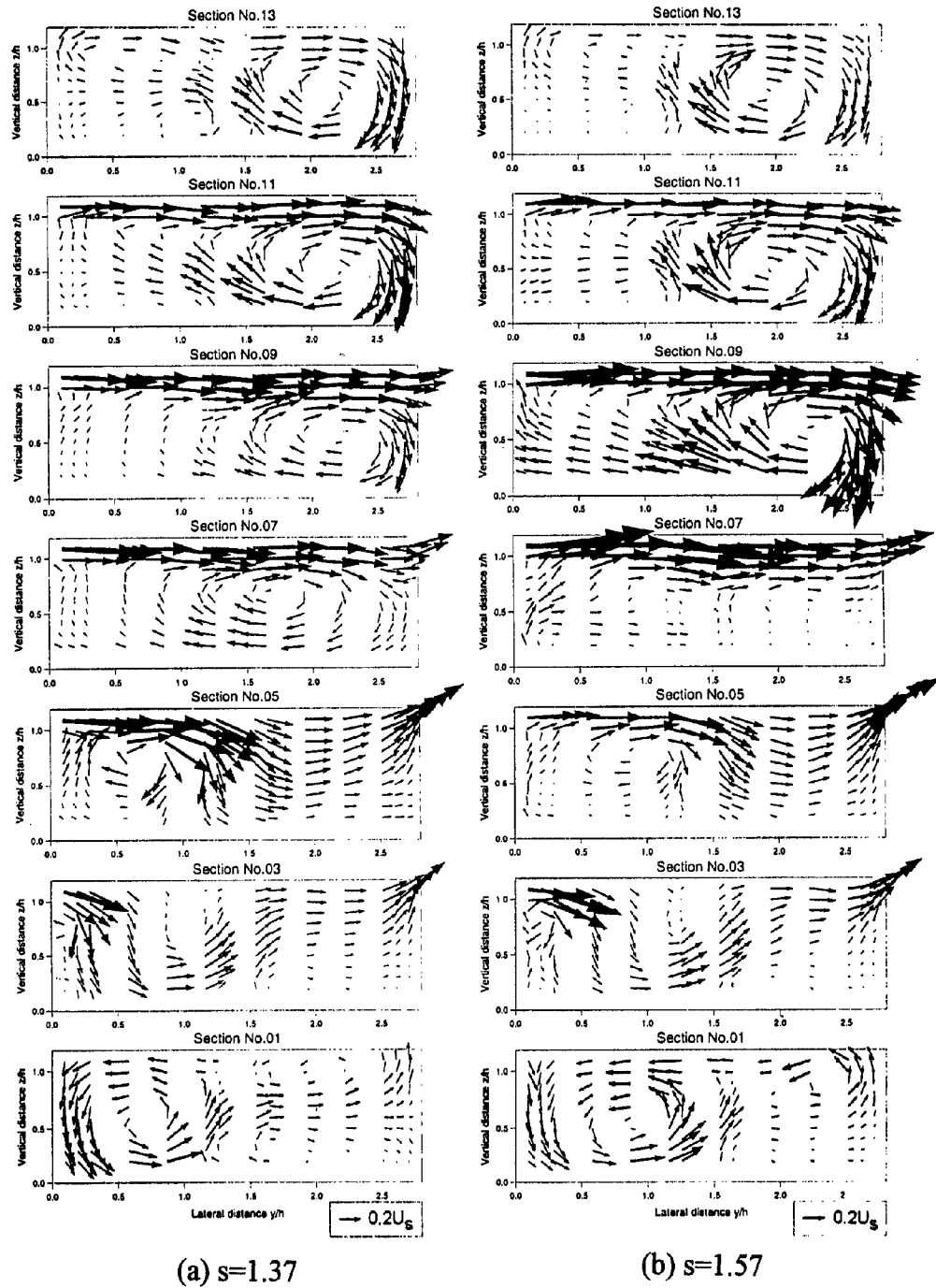


Fig. 3 Secondary flow vectors for the overbank flow, $Dr = 0.15$, (a) $s = 1.37$ (left) and (b) $s = 1.57$ (right)

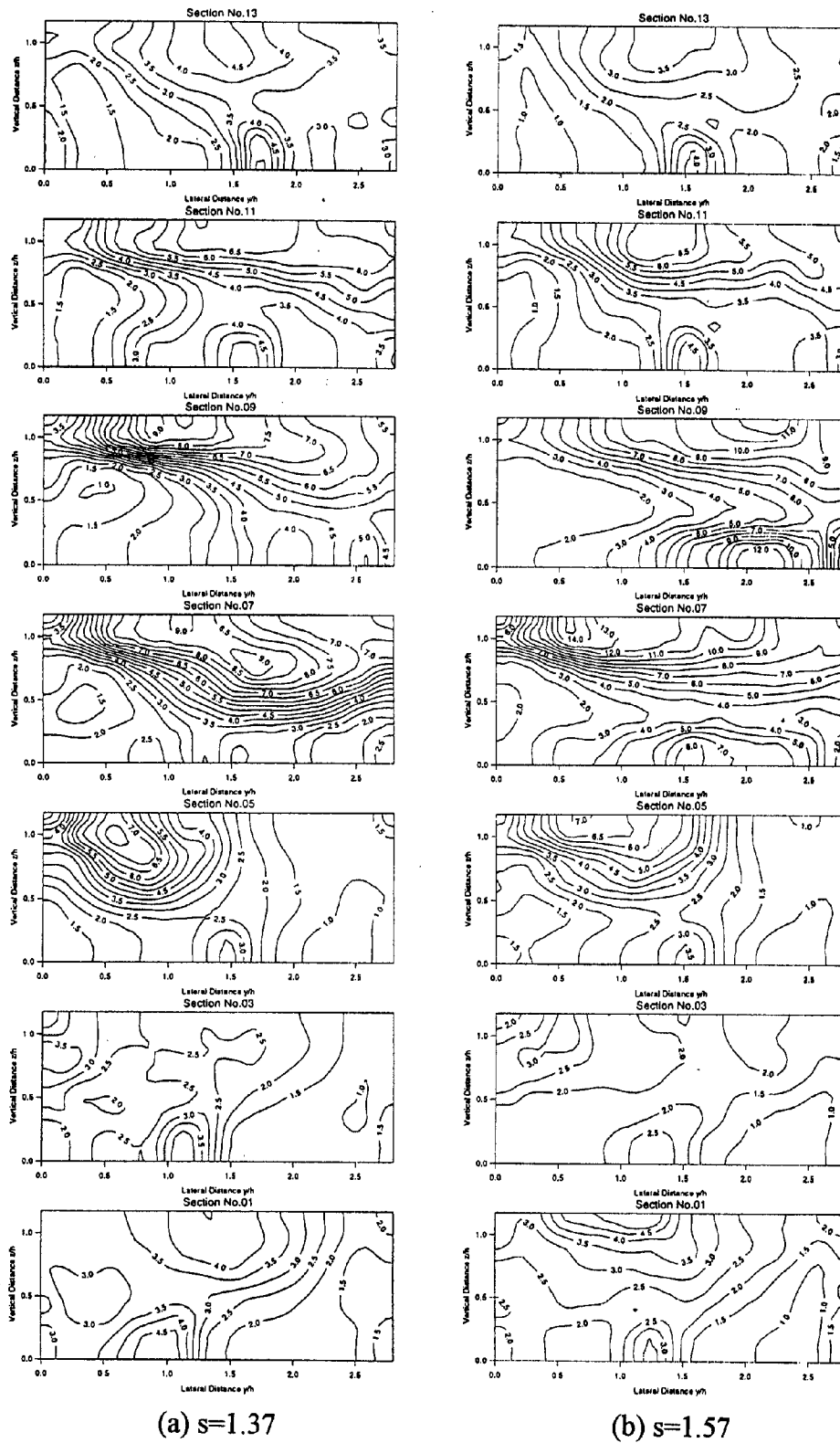
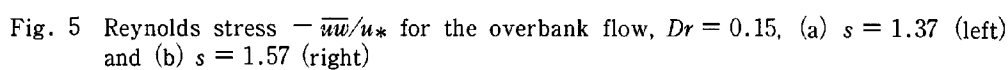


Fig. 4 Turbulent kinetic energy k/u_* for the overbank flow, $Dr = 0.15$, (a) $s = 1.37$ (left) and (b) $s = 1.57$ (right)



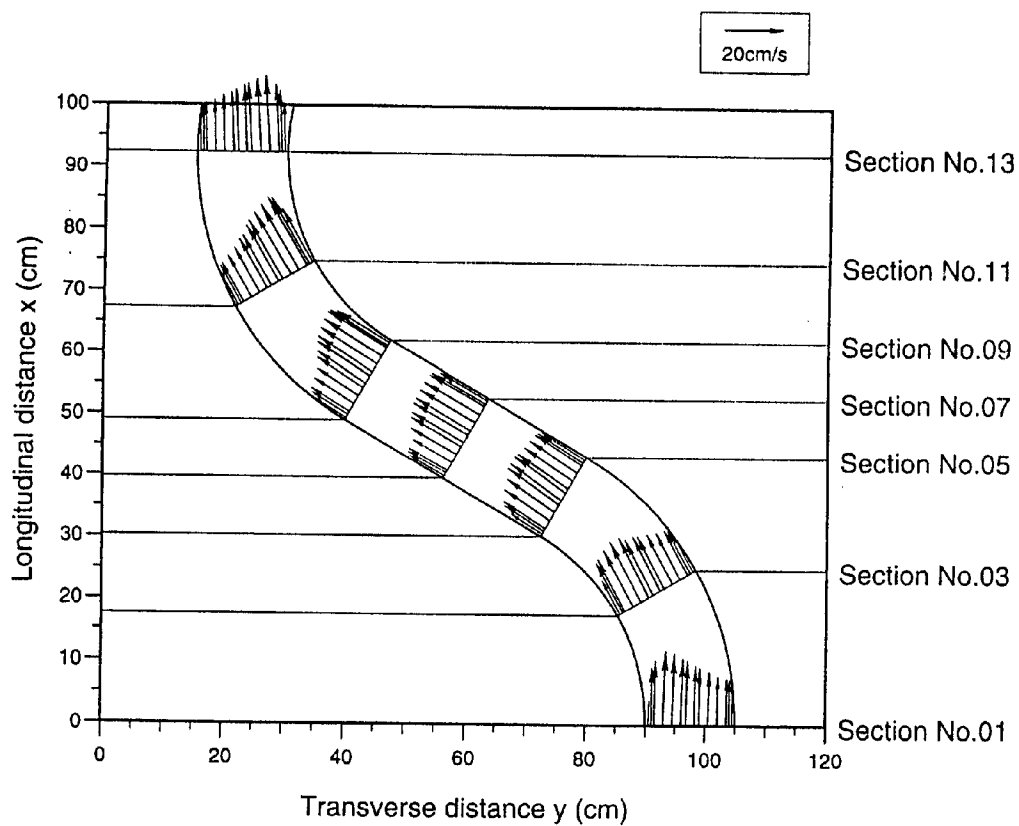
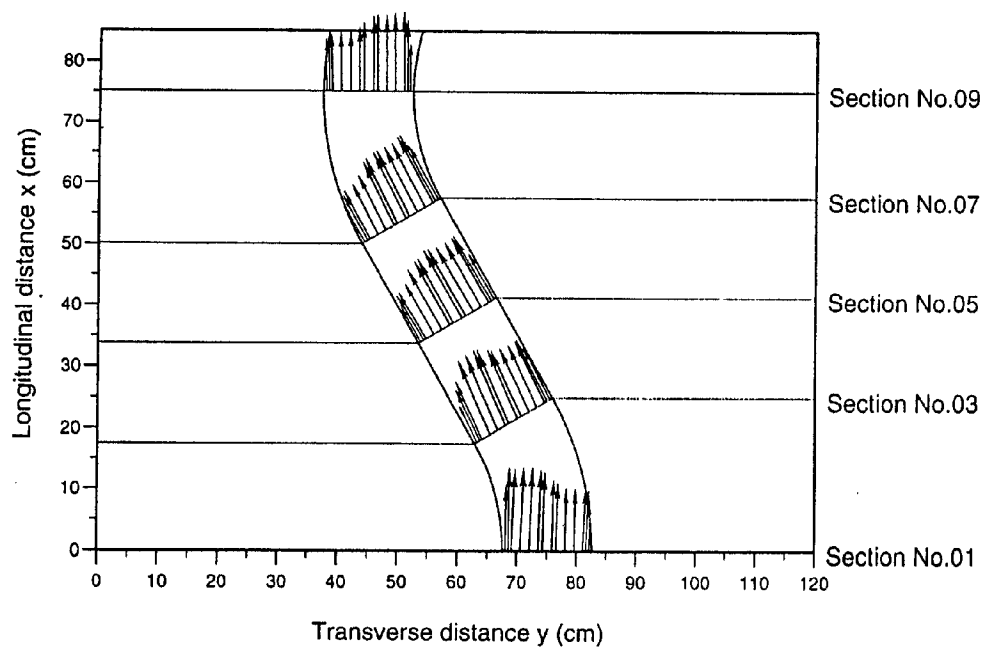
(a) $s=1.37$ (b) $s=1.09$

Fig. 6 Depth averaged velocity distribution for the bankfull flow, (a) $s = 1.37$ (top) and (b) $s = 1.09$ (bottom)

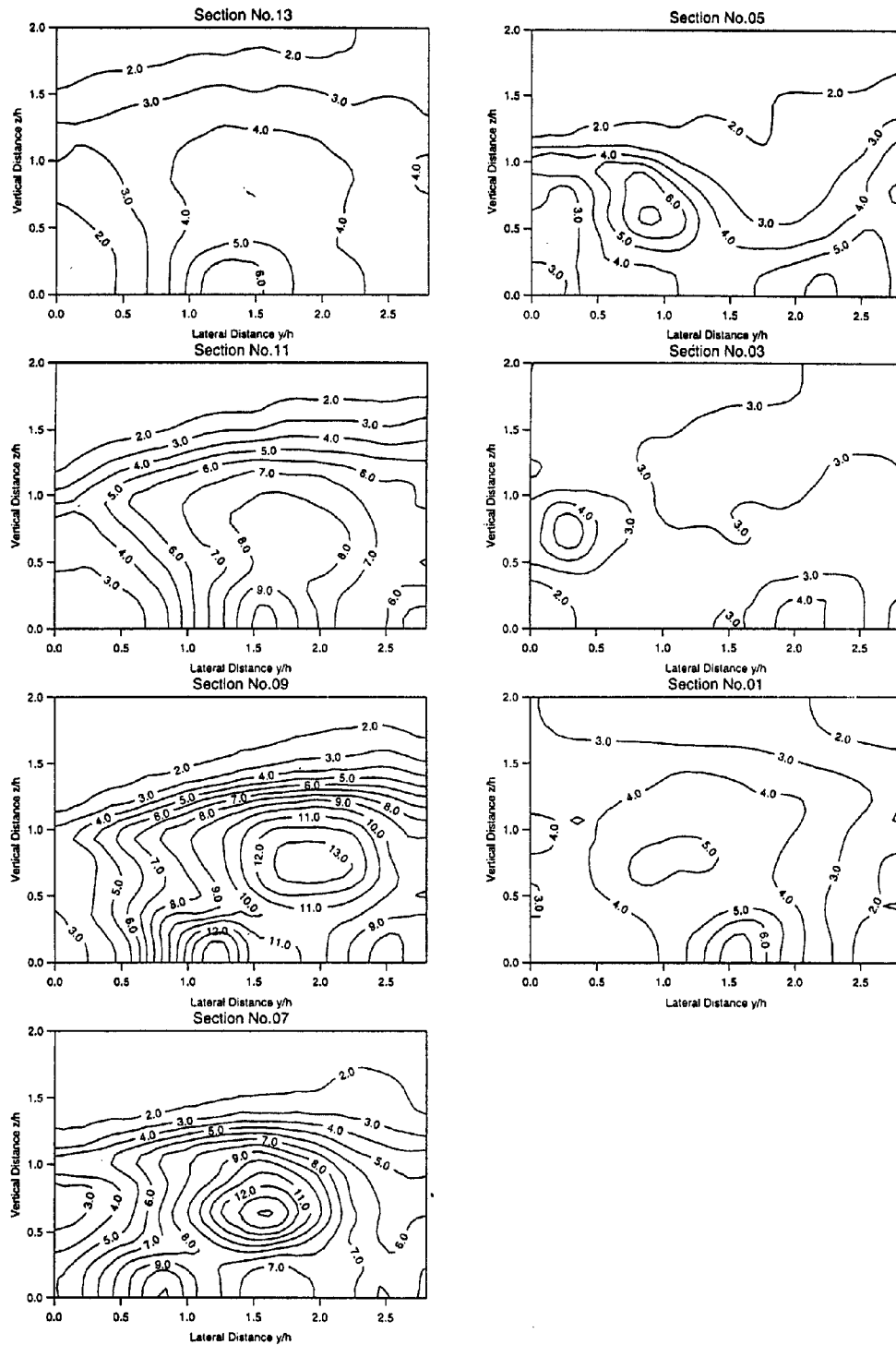


Fig. 7 (a) Turbulent kinetic energy k/u_* for the overbank flow, $Dr = 0.50$, in the $s = 1.37$ channel

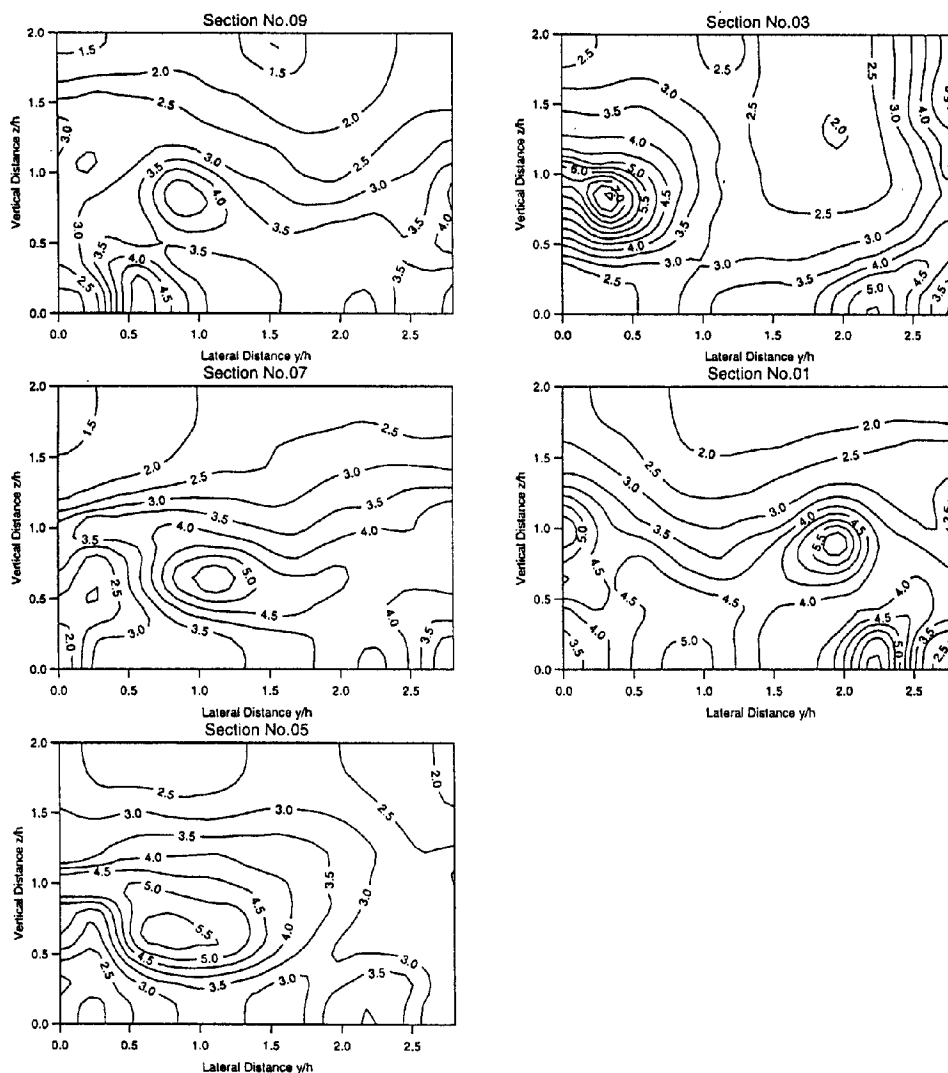


Fig. 7 (b) Turbulent kinetic energy k/u_* for the overbank flow, $Dr = 0.50$, in the $s = 1.09$ channel

の干渉過程は緩和される方向へ進む、等の結果が予想される。このことから2次流や乱れの分布といった流れの内部構造はより単純なものになると考えられる。しかしながらこれらの予想に反し、実際の計測結果は、特定の水利条件のもとでは以下に示すようにかなり複雑な構造の存在を示唆するものとなった。

流れの様子が直線水路でのそれに類似してくる様子を表す例としては、Fig. 6に示した単断面水路(inbank)での水深平均流速分布がある。そこでは同時に示した $s = 1.37$ のケースに比して横断方向の流速分布がより一様化している様子が見て取れる。あるいはFig. 7には $Dr = 0.50$ 時の乱れエネルギー k の分布を示しているが、 $s = 1.37$ のケースに比して全般に乱れの大きさは小さく、内部干渉による局所的な乱れのピークがより目立つ。このことは前節で述べた $s = 1.3 \sim 2.0$ での乱れのレベルの保持とは対照的に、 $s = 1.3$ 程度までは蛇行度が大きくなるにつれて乱れのレベルも増加することを示唆し興味深い。

次に、せん断による干渉過程の変化を示す例としては、Fig. 8および9に示した $Dr = 0.15$ 時の計測結果がこれを明確に表す。Fig. 8は2次流ベクトルについて、またFig. 9はレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ についてそれぞれ $s = 1.37$ のケースと共に示したものである。これらの結果には通常干渉過程の及ぶ範囲やその強

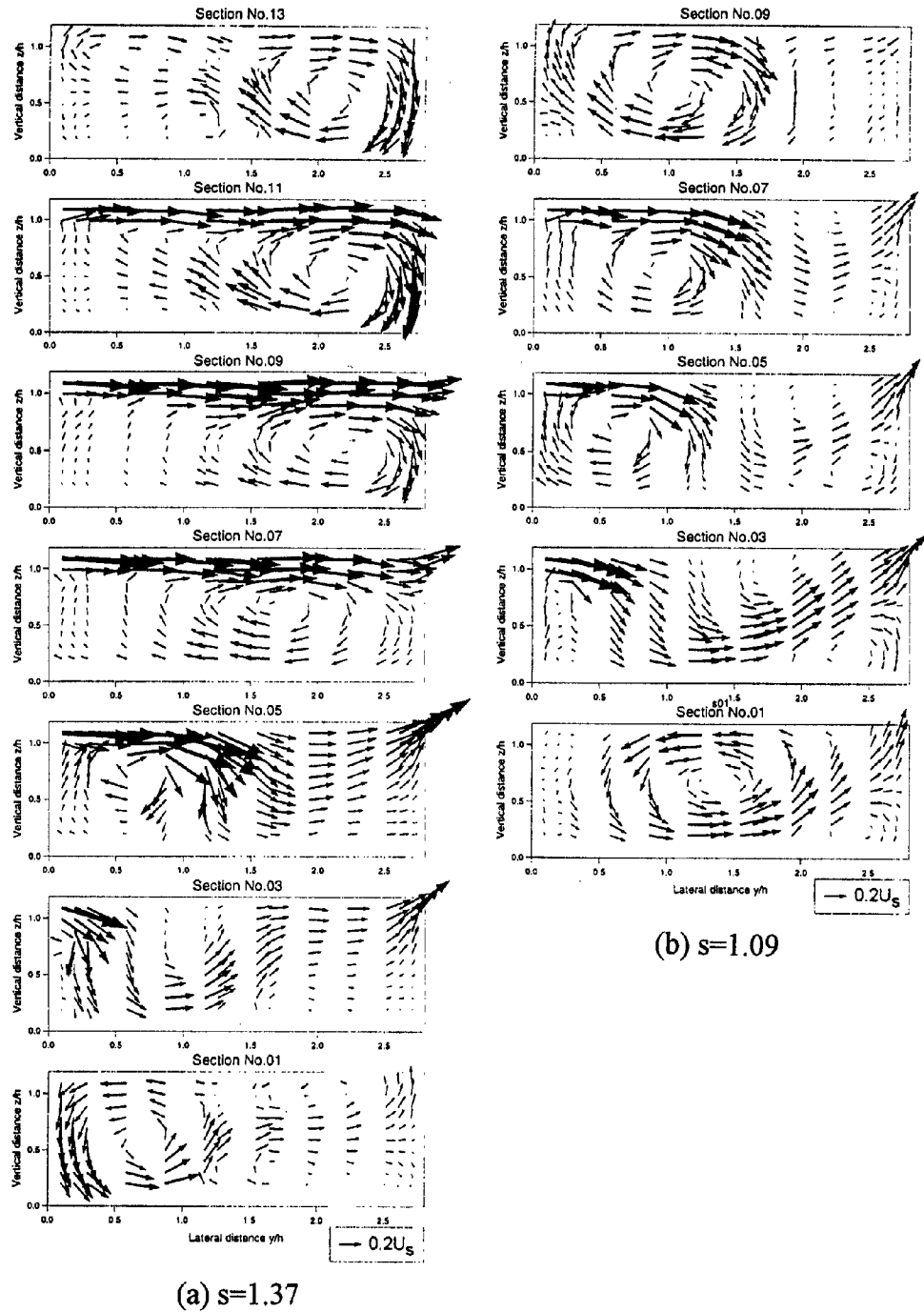


Fig. 8 Secondary flow vectors for the overbank flow, $Dr = 0.15$, (a) $s = 1.37$ (left) and (b) $s = 1.09$ (right).

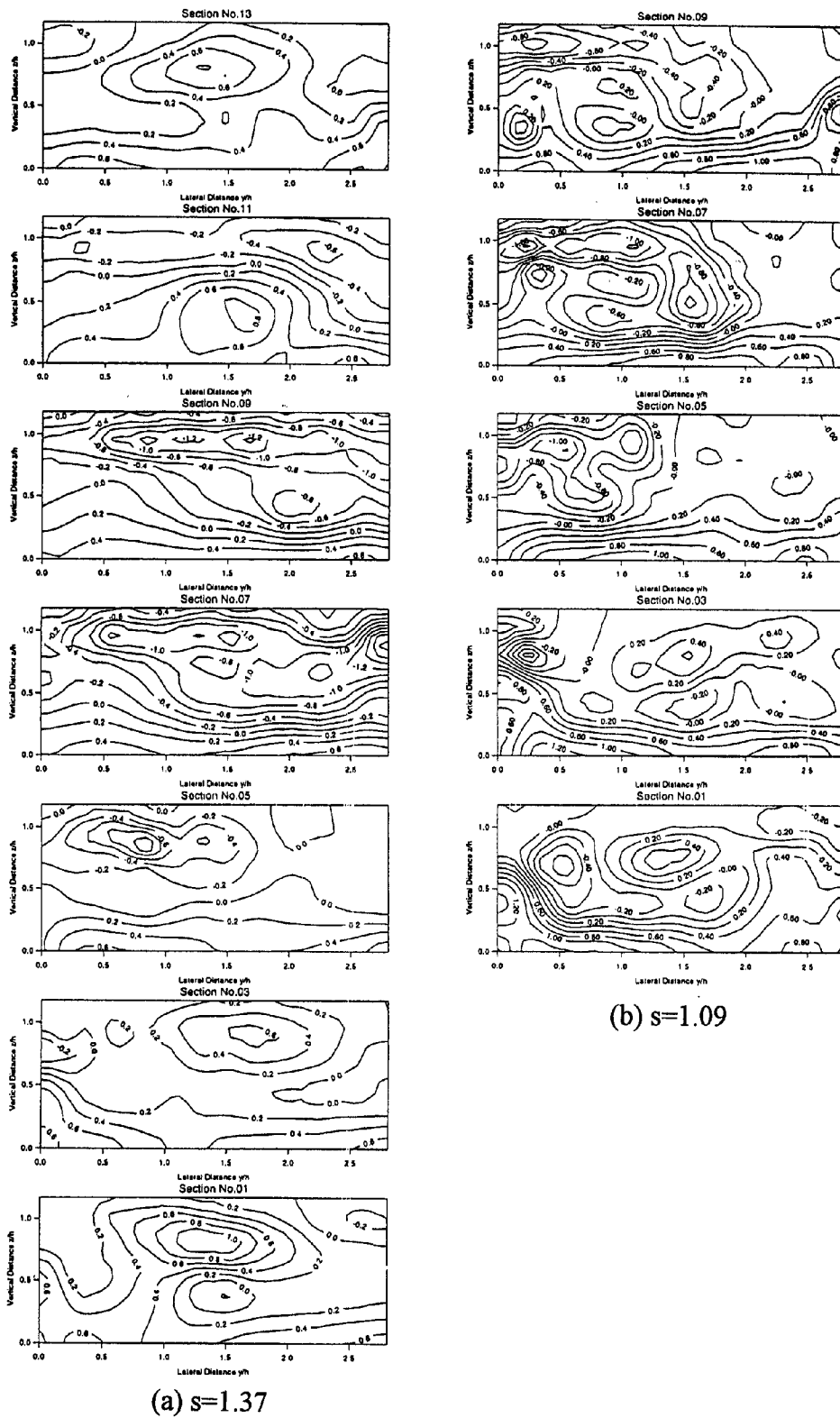


Fig. 9 Reynolds stress $-\overline{uw}/u_*$ for the overbank flow, $Dr = 0.15$, (a) $s = 1.37$ (left) and (b) $s = 1.09$ (right)

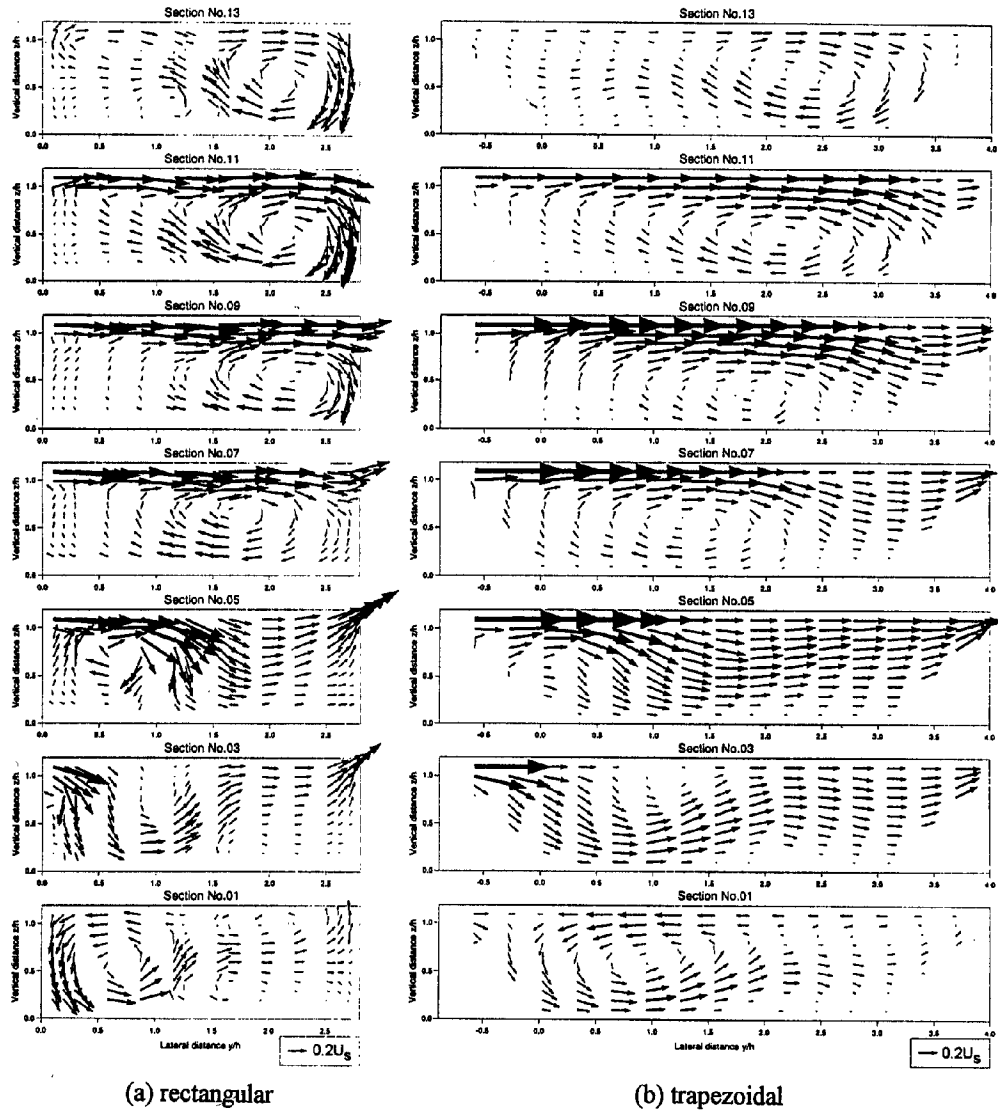


Fig. 10 Secondary flow vectors for the overbank flow, $Dr = 0.15$, in the $s = 1.37$ channels, (a) rectangular (left) and (b) trapezoidal (right)

さすなわちせん断層の特徴が見て取れるが、 $s = 1.37$ のケースに比して $s = 1.09$ ではまず干涉範囲が狭く、交差部の出口においても低水路左岸側の水路半幅程度に収まっていることがわかる。この結果低水路内に誘引される2次流セルの大きさも $s = 1.37$ のように低水路全幅に渡ることはなく、さらに曲線頂部でセルが内岸側へ移動させられることもない。しかし、干涉の強さについては交差部における $-\overline{uw}$ のピークで見ればあまり変わらず、 $-\overline{uw}/u_*^2 = -1.2$ 程度である。以上のことから、交差角が小さくなることにより干涉の横断方向への空間的広がりも縮小するが、干涉機構そのものはむしろ流体間の速度差に起因するものであるため、ここで検討した実験ケースの場合あまり変化しないと言える。

2.2 低水路断面形状の影響

単断面直線水路において長方形断面と台形断面における流れの構造を比較した場合、台形断面では隅角部における境界の影響が緩和され、2次流や乱れ分布等に顕著な差異が表れることが報告されている³⁾。また

直線複断面水路の場合、低水路のり勾配は水深規模の渦構造にはあまり大きな影響を与えないものの⁴⁾、横断方向のそれより大きなスケールの運動に影響し、その結果として低水路・高水敷間の流体混合現象が異なるものとなることが報告されている⁵⁾。このように混合現象が変化する場合、水路の疎通能に大きな差異が表れるものと推測されるが、実際複断面蛇行開水路流れにおいても低水路の断面形状により水位～流量関係が変化することが Willetts & Hardwick⁶⁾により指摘されている。

Fig. 10 は長方形断面と台形断面における 2 次流ベクトルの分布を示したものである。なお水深は $Dr = 0.15$ である。上述した両断面形における流れの構造の差異は全て **Fig. 10** から明確に読みとることができる。すなわち、隅角部（あるいは水路側壁）近傍における緩和効果はそこでの 2 次流速の大きさに見て取ることができる。また混合現象の変化は、高水敷上流れが低水路内に流入し、再び高水敷上へ乗り上げるときの減・加速過程からその存在が推測される。特に高水敷再乗り上げの際の加速の程度の差異は顕著であり、台形断面における緩やかな勾配を持った側壁がこのような流況変化部における遷移部として機能していることがわかる。**Fig. 11** に示したレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の分布における干渉域のピーク値は両断面形間であまり変化せず、 $-\overline{u'v'}/u_*^2 = -1.2 \sim -1.4$ 程度であることを考えると、断面形状の差異による水路の疎通能の変化に大きく寄与しているのは混合現象の違いであるものと思われる。さらに、せん断による干渉過程を主に規定するのはこの場合は上・下層流れ間の交差角であり、断面形状はあまり関係しないと言える。

3. 流れの 3 次元性に関する考察

前述したように、複断面蛇行開水路流れにおける 3 次元性については、低水路内の強い 2 次流、上層流れと下層流れ間のせん断および混合過程、あるいは低水路と高水敷間の流体交換などの特徴が従来指摘されている^{7), 8)}。これらの特徴が、ここで取り上げた幾何条件の変更に伴う流れの構造の変化とどのように関連するかを簡単に考察する。

複断面蛇行開水路流れにおいて低水路内に 2 次流を発生させる機構は、幾何形状の変更に依らず、ある交差角を持って低水路上方を横切る上層流れの存在であると言える。このことは、各ケースにおける 2 次流ベクトルの計測結果が、全て交差部における時計回りの 2 次流セルの発生・発達過程を示していることから明白である。Elliott & Sellin⁹⁾あるいは Ervine & Jasem¹⁰⁾が指摘するように、低水路法線と高水敷法線がある角度を持って交差する場合、流れの構造は歪み、低水路内に 2 次流が発生するが、その際の 2 次流の強さ・大きさは交差角の大きさに規定される。このことは複断面蛇行水路に対しても適用され得ることが今回の計測結果から明らかとなった。

上層流れと下層流れのせん断による干渉過程は、全ケースについて交差部において明瞭に観察された。特に交差角が 60 度以上（蛇行度 s で 1.37 以上）になると界面で発生するせん断応力が非常に大きくなる。このことは、界面における鉛直方向の流速勾配を考えると理解することができる。このせん断による干渉は、2 次流と同じく交差角の大きさによって大きく規定されることが示唆され、横断面形状の変化による流速変化の緩和効果はこの場合ほとんど関係しない。界面せん断応力の絶対値は、今回検討した条件のうち最も交差角の小さい $s = 1.09$ においても底面せん断力より大きく、水路の抵抗則を考える上で重要な損失項となる。

低水路・高水敷間の流体交換は、その存在が曲線部出口から交差部にかけて明確に特定される。この流体交換現象が存在するのは低水路内に 2 次流が完全に発達していない領域であり、2 次流が発達した後は流体交換よりはむしろ界面におけるせん断と混合が卓越するようになる。したがって、流体交換過程も上記した 2 つの特徴と同様に流れの交差角により間接的にではあるが規定されることとなる。水路の疎通能を考える場合、上・下層流れの内部干渉機構が空間的に変化することは非常に重要な要素と考えられ、水位～流量関係の定式化にあたってはそのような構造を考慮した予測モデルを検討する必要がある。

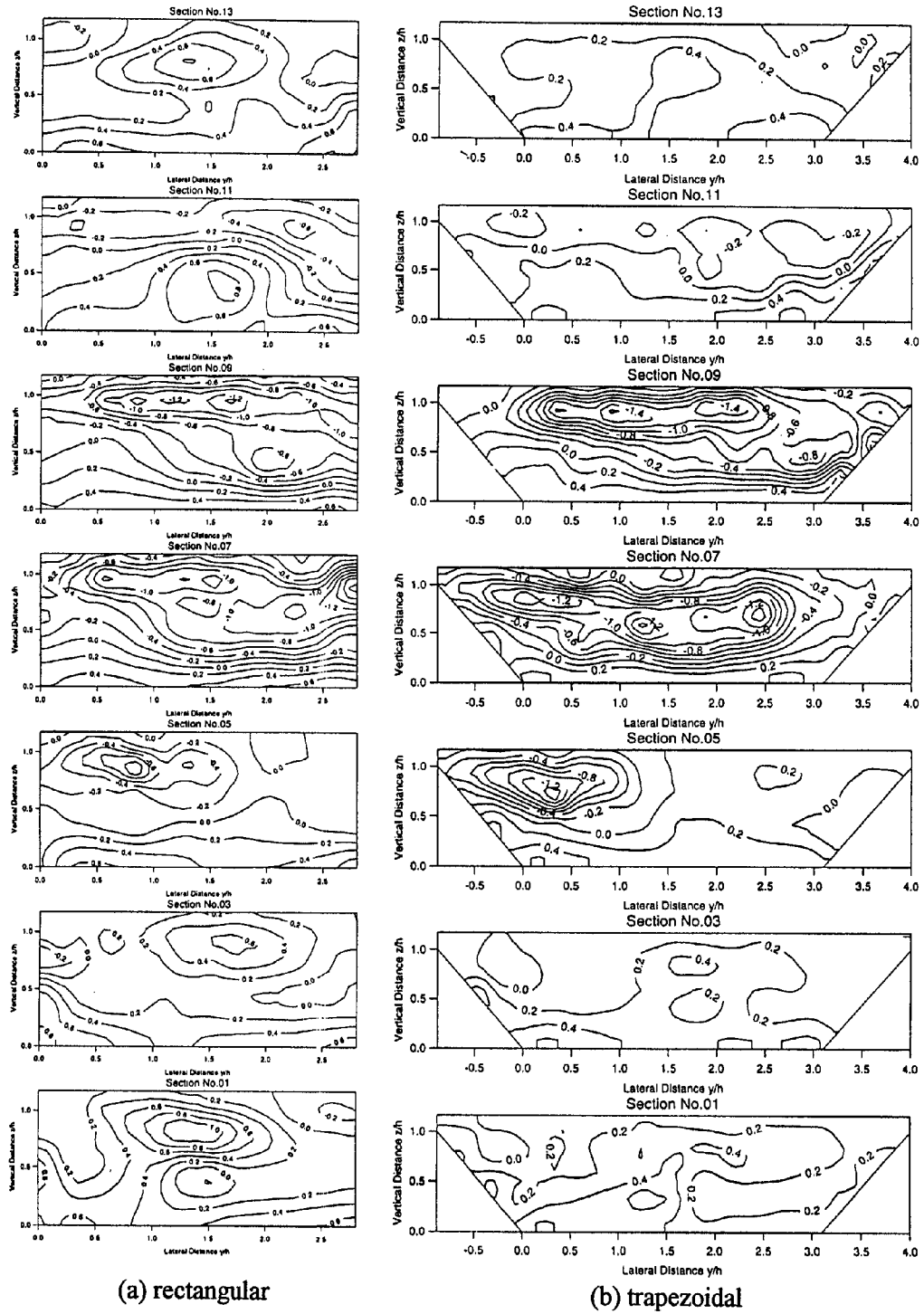


Fig. 11 Reynolds stress $-\overline{uw}/u_*$ for the overbank flow, $Dr=0.15$, in the $s = 1.37$ channels, (a) rectangular (left) and (b) trapezoidal (right)

4. おわりに

本報告において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) 複断面蛇行開水路流れにおいて、低水路の蛇行度が変化した場合、上層流れと下層流れの交差角が変わることにより 2 次流構造やせん断過程が変化する。
- 2) 上記の流れの構造の変化は、幾何条件の全く異なった地点における局所的な発露に留まり、相似の幾何形状の箇所では類似の構造が表れる。
- 3) 乱れエネルギーで見た場合、蛇行度が 1.0 から 1.3 程度までは蛇行度が大きくなるにつれて乱れが大きくなるが、それより少なくとも 1.5 程度までの蛇行度では乱れのレベルはほぼ一定である。
- 4) 低水路の断面形状は、複断面蛇行開水路流れに特有の現象である低水路・高水敷間の流体交換現象に対して大きな影響を与える。
- 5) 断面形状の差異による流体交換現象の変化は、複断面蛇行水路の疎通能を決定し得る重要な要素である。
- 6) 既報告⁸⁾において特定した複断面蛇行開水路流れの 3 次元構造、すなわち低水路内の 2 次流、上・下層間のせん断による干渉および流体交換は幾何形状の変化に依らず全てのケースで観察され、そのような 3 次元構造の普遍性が確認された。

参考文献

- 1) 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水利特性について (1)，京大防災研年報第 38 号 B-2, 1995, pp.561-580.
- 2) Hardwick, R.I. : The behaviour of meandering channels in flood, A thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy, University of Aberdeen, UK, 1992.
- 3) 今本博健・石垣泰輔・西田 雅：台形断面開水路流れの水利特性について，京大防災研年報第 32 号 B-2, 1989, pp.935-949.
- 4) 今本博健・石垣泰輔・木下聖司：複断面開水路流れの水利特性について (2)，京大防災研年報第 27 号 B-2, 1984, pp.433-444.
- 5) 今本博健・石垣泰輔：複断面開水路流れの水利特性について (4)，京大防災研年報第 33 号 B-2, 1990, pp.559-569.
- 6) 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.
- 7) Kiely, G. : Overbank flow in meandering compound channels, The important mechanisms, Int. Conf. on River Flood Hydraulics, Wallingford, UK, 1990, pp.207-217.
- 8) 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, 1996, pp.711-716.
- 9) Elliott, S.C.A. and R.H.J. Sellin : SERC flood channel facility : skewed flow experiments, J. Hydr. Res., Vol.28, No.2, 1990, pp.197-214.
- 10) Irvine, D.A. and H.K. Jasem : Observations on flows in skewed compound channels, Proc. ICE Wat., Marit. and Energy, Vol.112, 1995, pp.249-259.