

複断面蛇行開水路流れの3次元構造について

3-Dimensional Structure for Overbank Flow in Meandering Channels

武藤裕則*・塩野耕二**・今本博健***・石垣泰輔****

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

3-dimensional flow structure in meandering channels during flood is discussed based on the velocity measurements results by 2-component fiber optic laser Doppler anemometer. Growth and decay processes of secondary flow cells in meandering channels and their differences between before and after inundation are particularly highlighted. Interaction between the lower layer flow (the main channel) and the upper layer flow (the flood plain) is also stressed. The matters pointed out in the paper are closely related to the energy loss mechanism in compound meandering flows and should therefore properly be estimated in mathematical or numerical methods for engineering purposes.

Keywords . Meandering Channel, Overbank Flow, Secondary Flow, Turbulence, Fluid Mixing

1. はじめに

複断面開水路流れにおいては、低水路内の流れと高水敷上の流れの速度差に起因する瞬間的な強い2次流の発生・激しい流体混合・大きなせん断力の発生などの現象が知られ、流れを複雑にするのみならず、水路の抵抗特性や河床形態を論議する上でも重要な要素となることが知られている¹⁾。直線複断面開水路流れを対象とした基礎的な研究²⁾が精力的に行われた結果、上述したような流れを支配する現象が明らかになると共に流れの構造に関する知見が蓄積され、それらの影響を考慮した流量算定法の提案³⁾や、あるいはそれら現象をうまく再現する数値モデルの開発⁴⁾が試みられた。実際これらの新しい手法は直線複断面流れに対しては非常に有効であり、流れの基礎的な構造を把握することの重要性を示唆している。ところがこれらの手法を複断面蛇行開水路流れに拡張適用することは限られた条件の場合を除いては許されず⁵⁾、新たなアプローチが必要とされる。その理由は、直線複断面流れと複断面蛇行流れの構造が決定的に異なるからである。本研究は、複断面蛇行開水路流れを対象とした詳細な速度分布計測結果⁶⁾に基づき、流れの構造、特に水路の抵抗特性を評価する上で重要と思われる項目について検討を加えたものである。

* 正員 工修 京都大学助手 防災研究所附属宇治川水理実験所
(〒612 京都市伏見区横大路下三栖)

** PhD ラフバラ工科大学首席講師 土木工学科
(Loughborough, Leices, LE11 3TU, UK)

*** 正員 工博 京都大学教授 防災研究所附属宇治川水理実験所

**** 正員 博(工) 京都大学助教授 防災研究所附属宇治川水理実験所

2. 複断面蛇行開水路流れに関する実験

実験装置ならびに方法については、既報⁹⁾に詳述されているので、ここではその概略を述べるにとどめる。

実験に用いたアクリル製水路は、長さ 10 m、幅 1.2m であり、その水路内に厚さ 53mm のポリスチレン板により成形された高水敷を設置して複断面とした。路床勾配は、高水敷上において 1/1000 である。蛇行低水路の平面形状は、半径 0.425m の曲線部と長さ 0.374m の直線部との組み合わせで成形した。対象とした水路の蛇行形状は、曲線部中心角を 60°、120° および 180° と変化させることによって得られる 3 種とした。蛇行の程度を表すパラメータとして蛇行度 s (=蛇行水路長/蛇行波長) を用いれば、それぞれ 1.09、1.37 および 1.57 となる。図-1 に $s = 1.37$ についての水路の平面形状を示す。なお低水路の横断面は長方形であり、幅 150mm、深さ 53mm である。

流速の計測には、2 成分光ファイバ・レーザ・ドップラ流速計 (FLDA) を使用した。各計測点における 3 成分流速およびレイノルズ応力を得るために、図-2 に示すようにプローブのセットならびにレーザの入射方法を変えて、1 計測点につき 2 ないし 3 回計測を行った。ここで水面の微少な擾乱およびプローブ自身による攪乱が計測点に及ぼす影響が問題になるが、これらは予備実験よりその影響の少ないことが確認されている。また、異なる方法による同一成分の計測誤差は、スペクトル等から無視しうることを確かめている。サンプリング周波数は、シーディング (アルミニウム粉) を用いて平均 100Hz 以上を確保した。なお計測時間は 60sec である。図-3 に計測断面 ($s = 1.37$ の場合) を示す。

表-1 は、水理条件を示したものである。計測は各ケースとも、低水路がほぼ満水状態の流れ (bankfull) と、2 種の複断面流れ ($Dr=(H-h)/H=0.15$ および 0.50、ここに H :低水路水深、 h :高水敷高さ) で行われた。

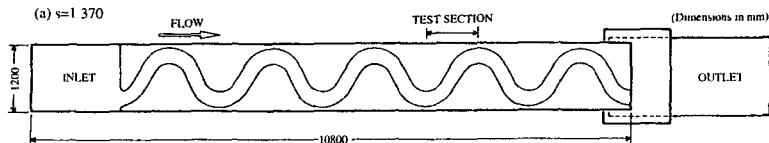


図-1 実験水路平面図

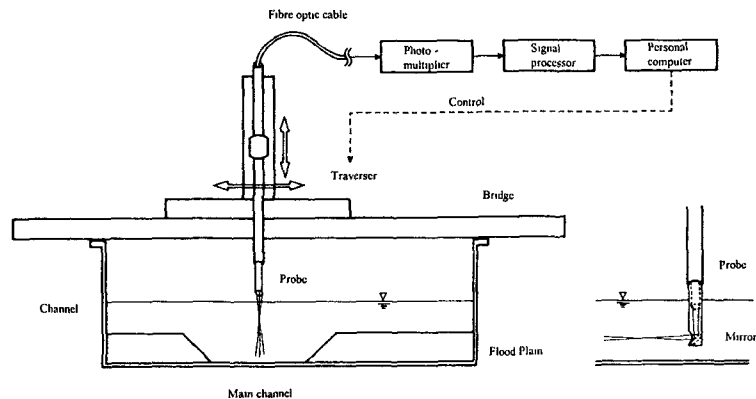


図-2 FLDA による速度計測法

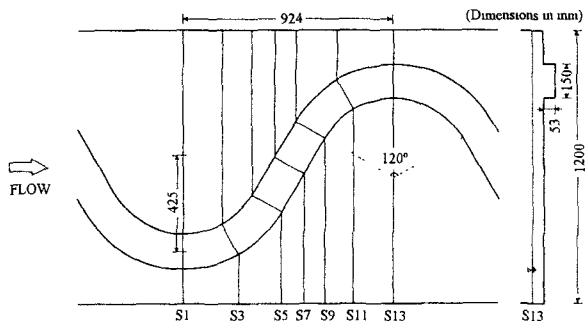


図-3 速度計測断面

表-1 水理条件表

Sinu- osity s	Depth condition Dr	Discharge Q ($\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)	Water depth H (m)	Mean velocity U_g (m/s)	Friction velocity ^a u_* (m/s)	Reynolds number ^b Re ($\times 10^4$)	Froude number ^c Fr
1.09	bankfull	1.876	0.0525	0.237	0.0166	2.63	0.431
	0.15	3.102	0.0633	0.157	0.0121	0.82	0.412
	0.50	25.755	0.1078	0.352	0.0225	6.26	0.495
1.37	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
1.57	bankfull	1.382	0.0532	0.170	0.0140	1.95	0.307
	0.15	2.204	0.0631	0.113	0.0120	0.62	0.299
	0.50	19.881	0.1087	0.268	0.0226	5.16	0.374

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

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

c $Fr=U_g/\sqrt{gR}$

3. 複断面蛇行開水路流れの3次元構造

複断面蛇行開水路流れは、低水路内・高水敷上の速度差に起因する現象のほか、低水路蛇行の影響により高水敷高さより上方（上層）と下方（下層）で主流方向が異なるため、その構造は直線複断面流れに増して複雑である。Kiely⁷⁾は、複断面蛇行流れにおける主流速横断分布計測結果に基づき、流れの構造について論じている。本研究では、既報⁹⁾に示した3成分速度ならびに乱れ計測結果に基づき、複断面蛇行開水路流れの構造を論じる上で最も特徴的と思われる項目について、以下に2、3述べる。

3.1 低水路内の2次流

図4は、 $s=1.37$ におけるbankfullと $Dr=0.15$ について低水路内の2次流をベクトルで表したものである。視点は各断面の上流側である。これより、2次流の発生・発達機構が単断面（bankfull）の場合と複断面（ $Dr=0.15$ ）の場合で大きく異なることがわかる。すなわち、単断面では2次流は水路の曲がりによって発生し、曲線部出口に続く直線部に入ると減衰していく。対して複断面流れでは、2次流は直線部に沿って発生し、曲線部に入って徐々にその強さを弱めるが、逆回転のセルが次の直線部入り口において誘引されると急激に消滅する。単断面蛇行流れにおいては水路の曲がりから発生する遠心力により2次流が引き起こされることが従来から指摘されているが、本計測結果はこのことと矛盾しない。一方複断面流れではその発生箇所および発達過程から考察して、2次流は上方を横切る高水敷上からの流れにより誘引されているものと思われる。発達した2次流セルは、曲線部の内岸側に沿ってその位置を占めるが、単断面流れにおいてはそこには逆回転のセルが位置する。これより、曲線部における単断面時と複断面時の2次流の違いは、その発生機構の差異にその原因を求めることができる。なお、蛇行度の変化に伴う2次流構造の変化は、今回対象とした蛇行度の範囲ではそれほど明確ではなく、2次流の発生要因は蛇行度に依らず同一であると考えられる。

図5は、 $s=1.57$ において水深をbankfullから徐々に増やしていった場合の2次流ベクトルである。計測断面は曲線頂部（Section 13）である。図4において観察される、遠心力による2次流（単断面）と相互干渉による2次流（複

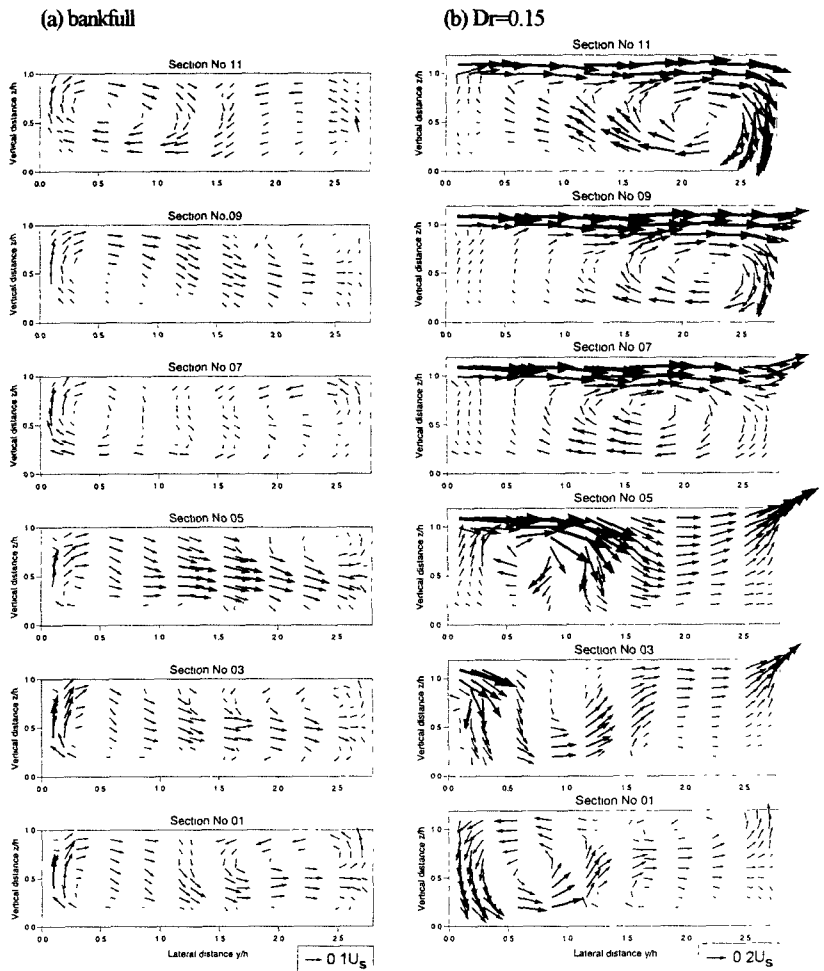


図4 低水路内の2次流ベクトル ($s=1.37$)

断面)を考慮すれば、 $Dr=0.03$ では後者が発達し始めているものの、未だ両者の混在している様子がうかがえる。しかし $Dr=0.05$ になれば、遠心力による反時計回りのセルは消滅し、ほぼ全断面が時計回りのセルで占められる。これより、相互干渉による運動が遠心力によるものを打ち消し、かつ流れの構造を決定するようになるのは $Dr=0.05$ 程度からと考えられ、換言すればこの程度の水深になって流れは複断面としての特徴を持つようになると言える。

3.2 低水路内流れと高水敷上流れの相互干渉

前項でも述べたように、低水路内流れと高水敷上流れの干渉、特に低水路直線部(交差部)におけるそれは、複断面蛇行流れの構造を決定する最も重要な要素である。相互干渉の様子は、図-6に示した層平均流速分布($s=1.37$, $Dr=0.50$)からもうかがい知れるように、上層・下層間に流速の大きさ・方向の断絶が存在するため、高水敷高さ付近で活発な流体の混合が行われ、大きなせん断力が発生している。図-7は、図-6に示したのと同じケースの高水敷高さ($z/h=1.0$)における $-\overline{uw}$ の分布を示したものであるが、上・下層間の流向の差異の大きい交差部において大きなせん断力が発生しているのがわかる。

図-8は、交差部(Section 9)における $-\overline{uw}$ の鉛直分布を示したものである($s=1.37$, $Dr=0.50$)。図中、底面での値はプレストン管により計測された壁面せん断力である。これより上・下層界面($z/h=1.0$)でのせん断力は、絶対値にして底面せん断力の5倍程度の値を示すことがあることがわかる。図中の破線は、Knight & Shiono⁸⁾による次式

$$-\overline{\rho uw} = \tau_b - \rho g z S_0 + \int_0^z \left\{ \frac{\partial(-\rho uv)}{\partial y} \right\} dz - \int_0^z \frac{V \partial U}{\partial y} dz - \int_0^z \frac{W \partial U}{\partial z} dz \quad (1)$$

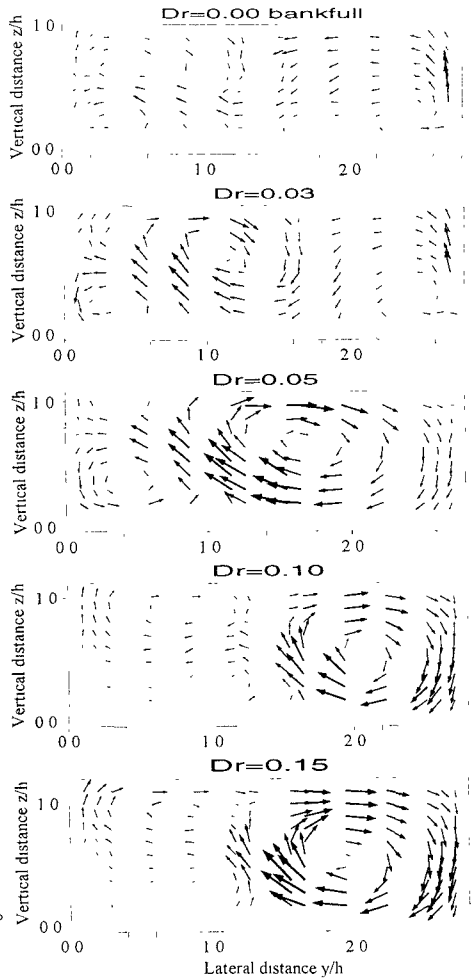


図-5 曲線頂部の2次流 ($s=1.57$)

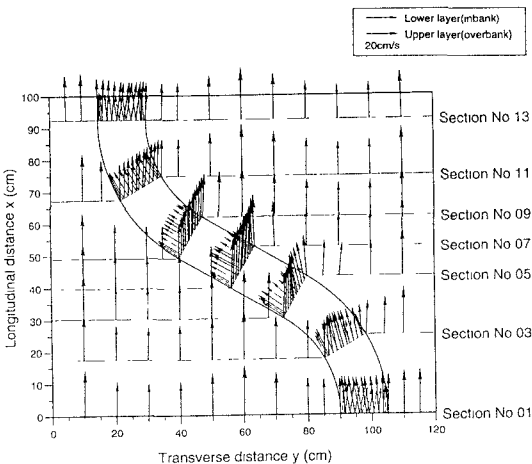


図-6 層平均流速分布 ($s=1.37$, $Dr=0.50$)

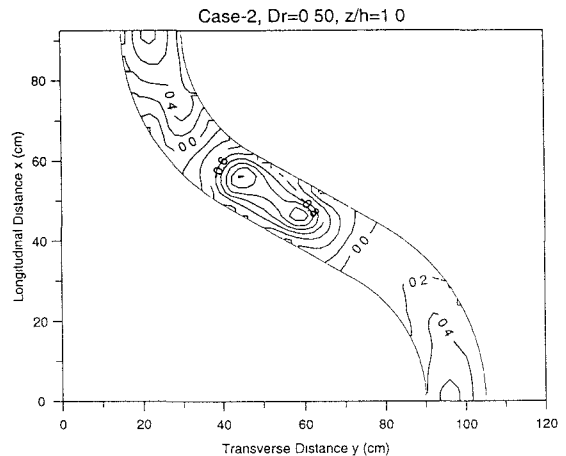


図-7 上・下層界面における $-\overline{uw}/u_*^2$ の分布

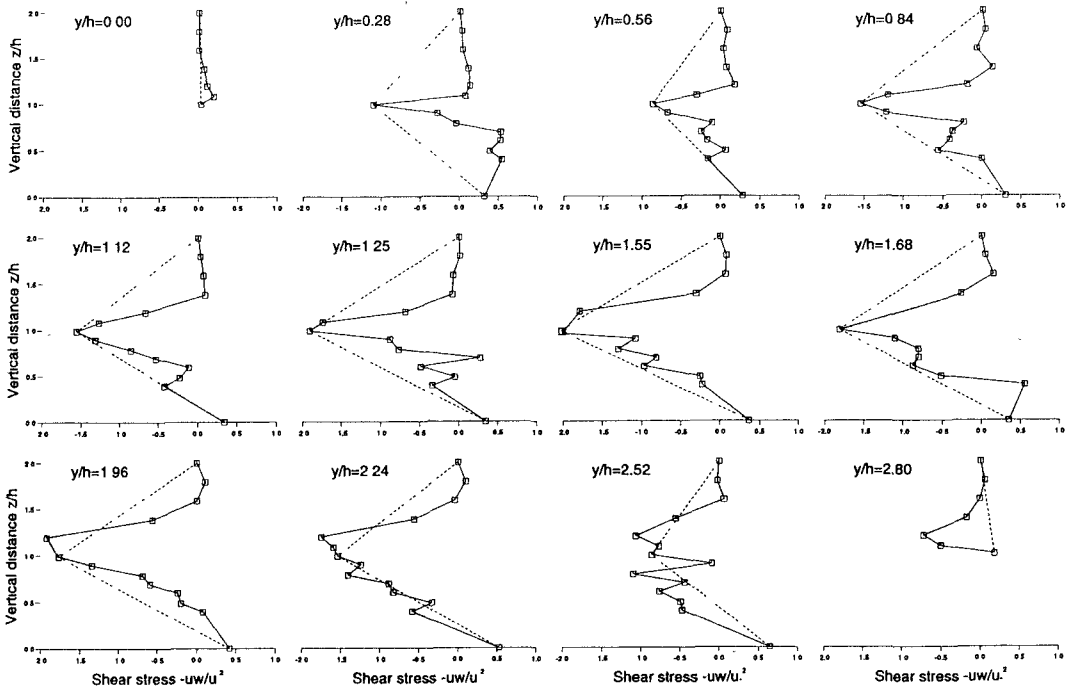


図-8 交差部における $-uw/u_*^2$ の鉛直分布 ($s=1.37, Dr=0.50$)

に基づく $-uw$ の鉛直分布に関する考察を拡張適用して描いたものである。すなわち、「高水敷高さを境界として流れの様相が大きく異なることから、上・下層の界面が一種の柔軟な boundary として働く」と考える。この時、 $-uw$ の鉛直分布が直線で近似されるならば、その分布は境界条件としての水面(=0)および底面(= τ_b)とともに界面でのせん断力によって決定される。」と仮定した時の分布形である。下層においては2次流の影響による多少のずれが見られるものの $-uw$ はほぼ上記の仮定に基づく直線に沿って分布する。対して上層では水面から上層半水深付近までは0でほぼ一定であるが、界面に近づくにつれて急激に変化し、界面での値に近づく。また、 y/h が大きくなるにつれて $-uw$ が0付近から離れ始める位置が高くなっており横断方向に混合層厚が増加していることを示唆する。したがって少なくとも上層においては、 $-uw$ の鉛直分布は上記の仮定に基づく直線分布により近似し得ない。

3.3 低水路/高水敷間の流体交換

Willetts & Hardwick⁹⁾は、染料を用いた可視化結果から、曲線部出口から直線部にかけて低水路内流体が高水敷上へ乗り上げると同時に、それを補う形で高水敷上の流体が低水路内に取り込まれるのを指摘している。

このことは図-4や図-6からもその様子がうかがい知れる。図-9は、乱れエネルギー $k=(u^2+v^2+w^2)/2$ を各層について鉛直

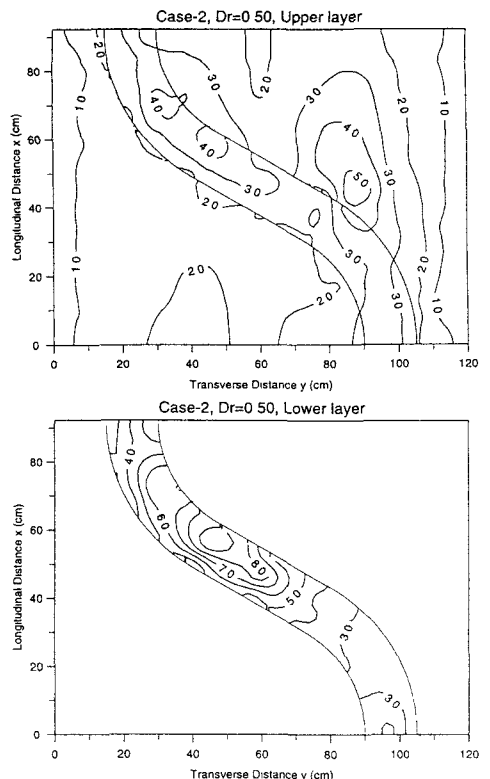


図-9 層平均乱れエネルギー $\bar{k}/u_*^2$

方向に平均したものの分布を示したものである ($s=1.37$, $Dr=0.50$)。図より、上層では曲線部出口の下流側高水敷上において、また下層では直線部から曲線部入り口にかけて乱れの大きな部分が広がっている。上述した低水路／高水敷間の流体交換現象を考慮すれば、これらの部分はこの流体交換と密接な関連を持っている。したがって、複断面蛇行水路における流体交換によるエネルギー損失は乱れを通して行われ、またその値も極めて大きいと言える。

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) 複断面蛇行開水路流れを対象とした詳細な速度計測結果に基づき、流れの構造を検討した結果、水路の抵抗特性を論じる上で特に重要と思われる以下の項目、すなわち低水路内の2次流、低水路内流れと高水敷上流れの相互干渉および低水路／高水敷間の流体交換が特徴的であることが指摘された。
- 2) 低水路内の2次流は、単断面蛇行では水路の曲がりによる遠心力によって引き起こされるのに対し、複断面蛇行では高水敷上流れによる横断方向へのせん断によって誘引される。その結果、2次流の構造は全く異なったものとなるが、単断面から複断面への遷移は2次流の構造に関しては $Dr=0.05$ 程度の水深で起こる。
- 3) 低水路内流れと高水敷上流れの相互干渉の結果、高水敷高さ付近において大きなせん断力が発生する。またそれは上・下層流れが複雑に混合する直線部(交差部)において顕著である。 $u-w$ の鉛直分布を検討した結果、複断面蛇行流れを高水敷高さを境界として上層・下層に分割する、いわゆる2層モデルとしての取り扱いの可能性を指摘した。
- 4) 低水路／高水敷間の流体交換によるエネルギー損失を、乱れエネルギーの計測結果より明らかにした。
- 5) 複断面蛇行流れに対する抵抗特性の算定法や、あるいは数値モデルの開発にあたっては、本研究で指摘した上記の特徴的な流れの構造を適切に評価し、その手法に組み入れることが重要である。

なお、本研究を遂行するにあたり、英国 Engineering and Physical Sciences Research Council より補助を頂きました(補助番号 GR/H14755)。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 石垣泰輔：複断面開水路流れの3次元構造に関する研究、京都大学工学博士学位論文、1993。
- 2) 例えば、Tominaga, A. and I. Nezu : Turbulent structure in compound open-channel flows, J Hydr Eng, Vol 117, No.1, pp.21-41, 1991.
- 3) 例えば、Ackers, P. : Flow formulae for straight two-stage channels, J. Hydr Res., Vol.31, No.4, pp.509-531, 1993
- 4) 例えば、Shiono, K. and D.W. Knight : Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel, J. Fluid Mech, Vol.222, pp.617-646, 1991
- 5) James, C.S. and J.B. Wark : Conveyance estimation for meandering channels, Report SR329, HR Wallingford, UK, 1992
- 6) 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)、京都大学防災研究所年報、第38号B-2、1995。
- 7) Kiely, G. : Overbank flow in meandering compound channels, The important mechanisms, Int Conf on River Flood Hydraulics, Wallingford, UK, pp.207-217, 1990.
- 8) Knight, D.W. and K. Shiono : Turbulent measurement in a shear region of a compound channel, J. Hydr. Res., Vol 28, No 2, pp.175-196, 1990.
- 9) Willetts, B.B. and R.I. Hardwick : Stage dependency for overbank flow in meandering channels, Proc. ICE Wat., Marit and Energy, Vol.101, pp.45-54, 1993.