

高水敷蛇行流の乱流構造に関する研究

Study on turbulent structure in a meandering compound open-channel flow

山上路生*, HOANG QUANG**, 瀬津家久***, 土井智礼**

Michio Sanjou, Quang Hoang, Iehisa Nezu, Tomonori Doi

*正会員, 博(工) 京都大学大学院助手, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

**学生員, 京都大学大学院修士課程, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

***フェロー, 工博, 京都大学大学院教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

The object of the present study is to investigate 3-D turbulent structure in a meandering compound open-channel flow with floodplains. This complex flow consists of a meandering main-channel flow and the associated straight floodplain flows, and thus the significant interactions are observed between the meandering flow in a lower-stage and the straight flow in a higher-stage. It is therefore very important to reveal that the interaction may have strong effects on turbulent structure and the transport of suspended sediment. In particular, it is inferred strongly that hydrodynamic characteristics vary significantly in the transition region from the straight to meandering channels.

In this study, the detailed turbulence measurements were conducted by using 3-D electromagnetic velocimetry. As the results, the distributions of bed-shear stress and velocity components and the relation between the velocity and the corresponding turbulence were examined in the straight to meandering compound open-channel flows.

Key Words: meandering compound open-channel flows, turbulence structure and 3-D measurement

1. はじめに

複断面開水路流れは, 一般に洪水河川でよく観察される低水河道と高水敷氾濫流から構成される複雑な流れである。低水路と高水敷流れでは大きな流速差があるため, セン断不安定に起因する水平組織渦が発生し, 低水路と高水敷の間では運動量や質量の交換が促進される。したがって既往研究においても高精度な乱流計測や3次元乱流モデルを駆使した数値シミュレーションが数多く行われてきた。例えば Tominaga & Nezu (1991)¹⁾ はレーザー Doppler 流速計(LDA)を用いて, 直線複断面定常開水路流れの主流速分布や乱れの非等方性に起因する第2種2次流を実験的に明らかにした。Cokljat & Younis (1995)²⁾ は3次元の乱流計算モデルを提案して, Tominaga & Nezu¹⁾ が計測した2次流分布の再現に成功した。

一方で, ほとんどの実河川が湾曲部や蛇行部をもつことから, 最近では複断面蛇行流れに関しても研究が進んでいる。石垣ら(1998)³⁾ はフィルムセンサーを用いて蛇行度の

大きな複断面蛇行開水路流れにおけるせん断応力分布の測定を行い, 高水敷高さに対する水深スケールによってせん断応力の分布が変化することを示した。また, 福岡ら(1998)⁴⁾ は高水敷と低水路がともに蛇行形状をもつ流れに着目して, 高水敷と低水路の位相差と水理特性の関係を明らかにした。Shiono & Muto (1998)⁵⁾ は, LDAを用いて, 蛇行低水路と直線高水敷流が混在する複断面蛇行流れを乱流計測して主流速, 2次流分布およびレイノルズ応力などを考察した。

しかしながらこれらの研究の多くが連続蛇行流を対象としたものであり, 水理特性や2次流パターンが大きく変化する直線河道から蛇行河道への遷移区間における流れ特性についてはほとんど解明されていない。このような断面遷移区間では, 直線部で発生した水平渦の構造が蛇行部で変化し, 低水路と高水敷間の運動量交換特性も大きく変わるので環境水理の点からも大切な課題の一つと思われる。最近, Nezu ら(2004)⁶⁾ は電磁流速計を用いてこの断面遷移区間を対象にした水理計測を行っているが, 測定点数

表-1 水理条件

Q (l/s)	H (cm)	U_m (cm/s)	Re	Fr	D (cm)	ks (mm)	B_m (cm)	B_{fl} (cm)	B_{fr} (cm)	Si
7.51	6.75	25.5	17200	0.3	4.75	0.2	20	20	60	1.09

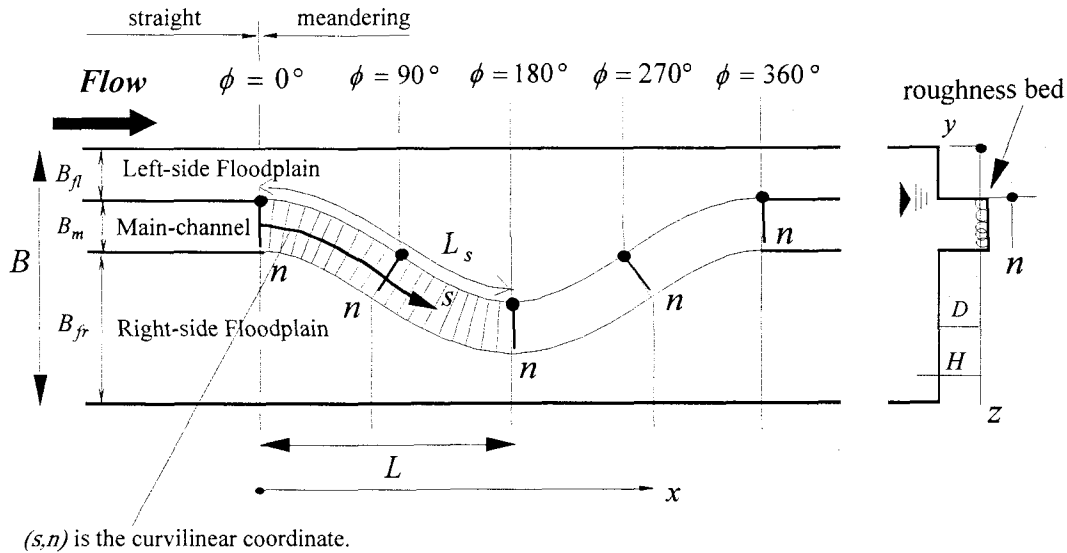


図-1 実験水路と座標系

が乱流特性を詳細に考察するには十分ではなかった。そこで本研究では、このような直線から蛇行への遷移区間に注目し、特にかぶり流れの影響を大きく受ける低水路内部を対象にした乱流計測を詳細に行う。具体的には空間的に細密に設定したメッシュ上を電磁流速計によって瞬間流速の3成分を計測し、高水敷を有する蛇行開水路流れにおける乱流特性を明らかにする。

2. 実験方法

2.1 水理条件

本実験で用いた固定床複断面蛇行水路を図-1に示す。実験水路は、水路全長 9.2m、水路幅 1m の開水路である。本実験では、都市内河川のように高水敷が比較的整備されている蛇行河川を想定して低水路の底面は平均粒径 2.0mm のガラスビーズを貼り付けて低水路と高水敷の粗度に差を付けた。図中の D は高水敷高さ、 B_m 、 B_{fl} 、 B_{fr} はそれぞれ直線部における低水路幅、左岸高水敷幅および右岸高水敷幅である。 $B = B_m + B_{fl} + B_{fr}$ は水路全幅、 H は低水路河床からの水深、 L はサインカーブの半波長である(図-1)。水路の中に幅 $B_m = 20\text{cm}$ の低水路を設置した。

座標系に関しては次のように設定する。 x は直線高水敷に沿った流下方向のデカルト座標で、蛇行入流口で原点

($x = 0$) とする。 y は鉛直座標であるが、路床が粗面であるため、既往研究を参考に粗度頂部から $\delta = k_s/4$ 下方を仮想原点($y = 0$)とする。ここで k_s は等価砂粗度である。 z は横断方向座標で左岸高水敷の側壁左端を原点($z = 0$)とする(図-1)。 x 、 y および z 方向の時間平均流速成分はそれぞれ U 、 V および W 、乱れ変動成分はそれぞれ u 、 v および w と定義する。 s はサインカーブ状の低水路に沿った一般曲線座標で、蛇行入流口つまり $x = 0$ の断面で $s = 0$ となるようにとる。 n は s に対する法線方向座標で低水路と左岸高水敷の境界部を原点($n = 0$)とする。直交座標と曲線座標の流速成分を区別するために、低水路に沿った流速成分および低水路内の横断流速成分は、それぞれ u_s および w_n のように添字をつけて表す。

本蛇行水路は、直線部から遷移する低水路のセンターラインの座標(x_c, z_c)が、次式で定義されるサインカーブとなるように製作した。

$$z_c(x_c) \equiv \frac{B}{2} - A_m \cos \phi \quad (1)$$

$$\phi \equiv \pi \frac{x_c}{L} \quad (2)$$

ここで、 ϕ はサインカーブの位相角、 A_m は振幅であり、本研究では $A_m = 20\text{ cm}$ とした。また図中の L_s は流入部 $x = 0$ から蛇行部 $x = L$ までの s に沿った曲線長さで、

$$L_s \equiv \int_0^L \sqrt{1 + \left(\frac{dz_c}{dx_c} \right)^2} dx_c \quad (3)$$

と与えられる。

表-1 に水理条件を示す。本研究では1種類の流れ場を対象にした。表中の Q は流量、 U_m は直線部での断面平均流速、 $Si \equiv L_s / L$ は低水路の蛇行度である。福岡ら(1999)⁷⁾は日本の大河川の蛇行度 Si は1.00 から 1.04 までに集中し、大きくても 1.10 程度であることを示しているが、複断面蛇行開水路に関する既往研究の多くは 1.10 前後の蛇行度をもつ流れを対象としているので、本研究ではこれらのことを参考に $Si = 1.09$ とした。

2.2 計測方法

図-1 に示すように直線部($\phi = 0^\circ$)から蛇行部の頂部($\phi = 180^\circ$)にいたる低水路領域の21断面を計測対象とし、その流れ場の変化過程に着目した。これらの断面の流下方向位置はサインカーブの位相角 ϕ あるいは流入部からの一般曲線座標 s で決定される。21個の各断面に横断方向に13点、鉛直方向に10点の計測メッシュを設定して、電磁流速計を駆使して合計($s \times y \times n$) = (21 × 10 × 13) = 2730個の計測点を詳細に水理測定した。本研究では、直径4mmのI型およびL型プローブをもつ超小型電磁流速計を用いて、I型プローブでは s 方向と n 方向の流速成分を測定し、L型プローブでは s 方向と y 方向の成分を測定して複断面蛇行流れの3次元点計測を行った。なお、1測点あたり、測定周波数を18.6Hz、サンプリング時間を51秒とし、合計1024個をサンプリングして乱流解析を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 主流速の分布特性

図-2 は、蛇行低水路における主流速 $U_s / U_{\max}$ の $n-s$ 面の水平コンター図を3種類の高さ、 $y/D = 0.20, 0.79$ および1.21について示す。ここで $U_{\max}$ は蛇行流入部($s/L_s = 0.0$)断面の主流速の最大値であり次節以降でも無次元化に用いる。なお本図は一般曲線座標系から直交座標系に変換して示した。

まず、低水路内部($y/D = 0.20$ および0.79)の結果に着目すると、高速領域が $0 < s/L_s < 0.5$ 区間の右岸高水数側に観察される。これは上流部の直線流れが蛇行部に流入した際に左岸領域の流れは高水数壁面の影響により流速が小さくなり、その結果、相対的に右岸側の流れが大きい分布をもつためと考えられる。また蛇行頂点部($s/L_s = 1.0$,

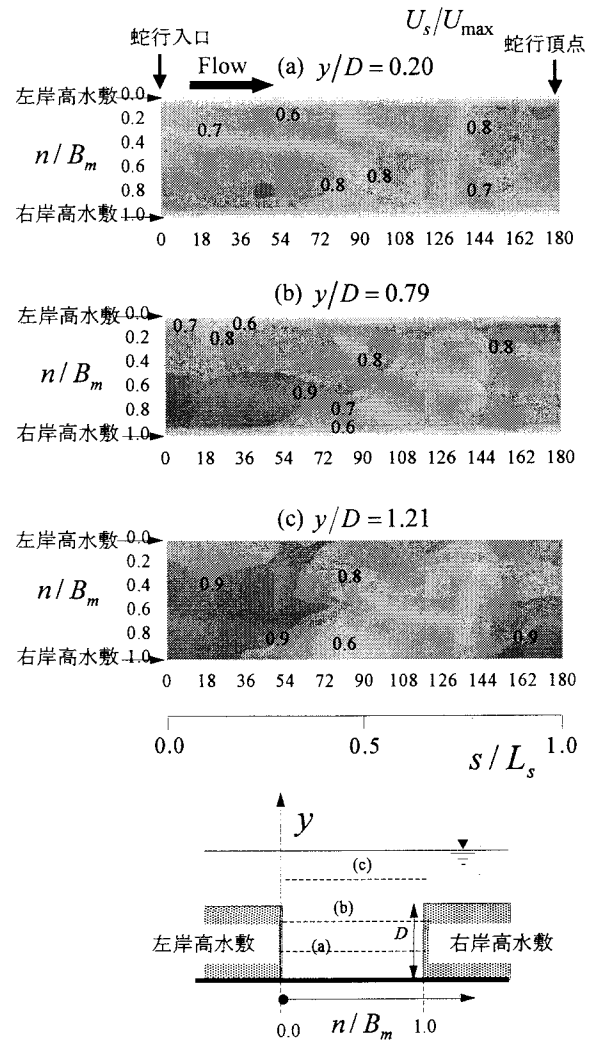


図-2 主流速の水平面コンター図

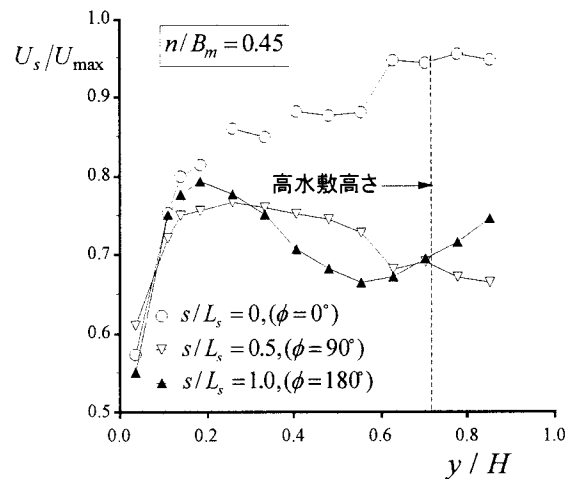


図-3 主流速の鉛直方向分布

$\phi = 180^\circ$)の付近では、 $y/D = 0.20$ の結果から高速領域が左岸高水数側に現れることがわかる。これは高水数のかぶり流れに起因する低水路内部の2次流によって主流速

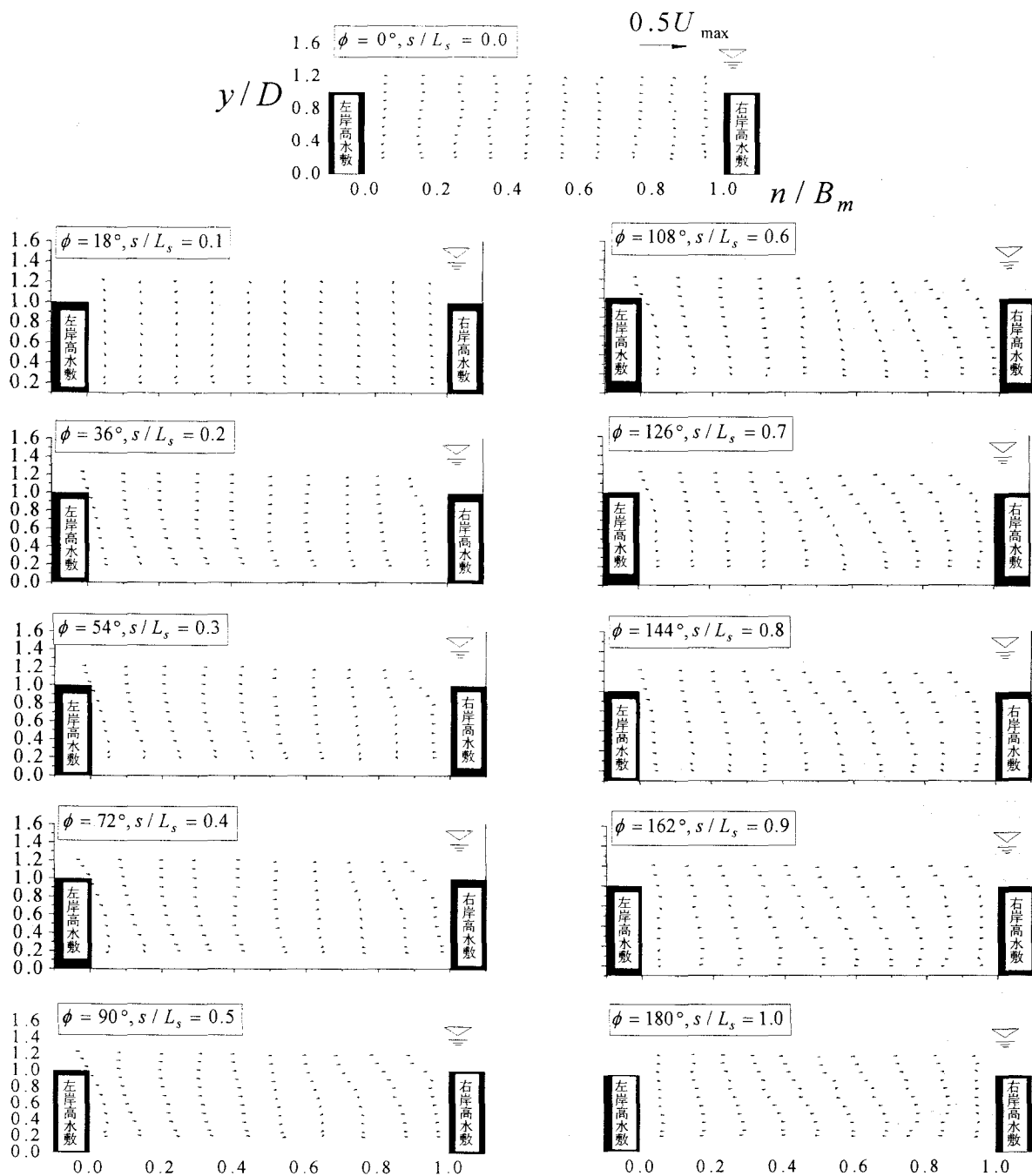


図-4 2次流の横断分布(W_n, V)

が湾曲内部に集中するためである⁹⁾。このように蛇行内岸部($n/B_m < 0.5$)における高速分布の発生は複断面蛇行流れに特有の現象で、福岡ら(1998)⁴⁾の研究結果と一致している。次に低水路の上層($y/D \geq 1.0$)に着目すると、低水路内流れと高水敷上流れがクロスする $s/L_s = 0.5$ 付近において、2つの流れの交差によって右岸側に低速領域が発生し、この低速域が流下とともに左岸側に広がる。

図-3は低水路中央部($n/B_m = 0.45$)における主流速の鉛直方向分布を示す。図には代表的な流下方向位置である $s/L = 0.0, 0.5$ および 1.0 について示した。値は $U_{\max}$ で無

次元化した。蛇行流入部($s/L_s = 0.0$)で底面から自由水面に向かって流速分布が増加するが、蛇行内部($s/L_s = 0.5$)および蛇行頂点部($s/L_s = 1.0$)では、流速分布が $y/H = 0.2$ 付近で最大値をもつ。これは蛇行内部では直線水路と異なり、流速分布が単に底面シアーにのみ支配されるわけではなく、高水敷上のかぶり流れからのシアーや2次流による影響も受けるからと考えられる。

3.2 2次流分布と渦度分布の流下方向変化

図-4は横断面における時間平均した2次流ベクトル

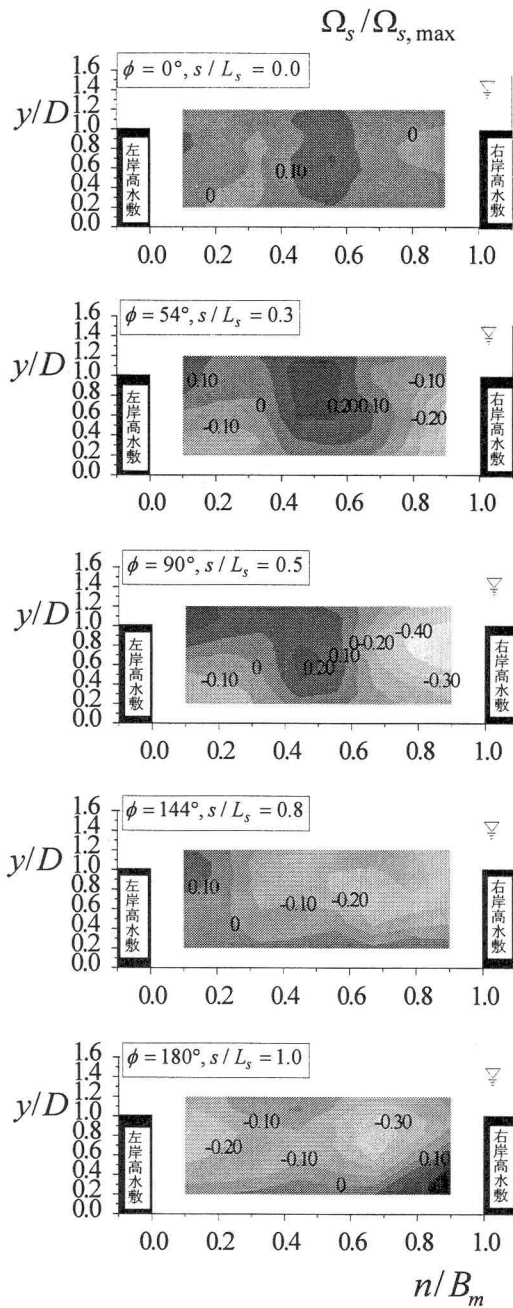


図-5 渦度の横断面分布

(W_n, V) の分布を示す。蛇行流入直後の $s/L_s = 0.0$ および 0.1 では大きな 2 次流成分は観察されないが、 $s/L_s = 0.2$ から右岸から左岸境界に向かう大きな流れがみられる。これは x 方向に直流下する高水敷上のかぶり流れでの影響である。さらに蛇行に沿って流下すると $s/L_s = 0.4$ の右岸高水敷側に反時計周りの渦が観察される。この 2 次渦は流下とともに発達し、蛇行頂点部の $s/L_s = 0.8 \sim 1.0$ では低水路断面の大部分を占める領域スケールをもつことがわかる。

図-5 は代表的な横断面における渦度 Ω_s の分布を示す。結果は流入部 ($s/L_s = 0.0$) の断面最大値 $\Omega_{s, \max}$ で無次元化した。ここで低水路の流下方向 s を軸とする渦度 Ω_s は

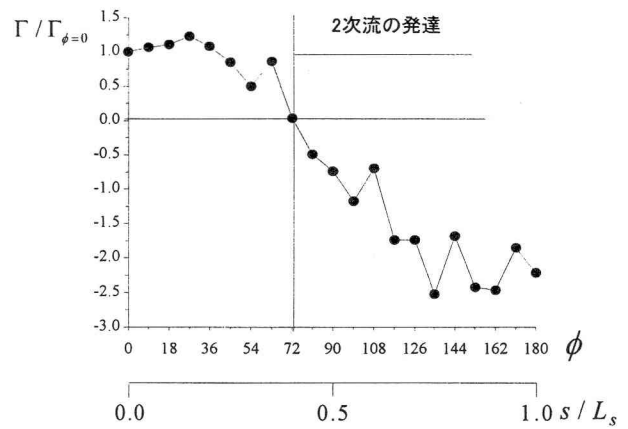


図-6 横断面内の循環の流下方向変化

次式のように定義される。

$$\Omega_s \equiv \frac{\partial W_n}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial n} \quad (4)$$

渦度は微視的に渦を見たとき流体がどの程度どの向きに回転しているかを表すものである。本研究では渦度 Ω_s は、反時計に回るケースは負、時計回りに回転するときは正となる。ここでは、 $s/L_s = 0.3$ の断面に着目すると、右岸境界部の付近で負の領域が表れることが確認できる。 $s/L_s = 0.5 \sim 1.0$ にかけて流下するとともにこの負の領域は低水路内部まで拡大してくる。これは図-4 で考察した反時計回りの 2 次流セルの発生・特性と対応する。すなわち直線から蛇行への遷移領域 ($s/L_s = 0.0 \sim 1.0$) では、蛇行する低水路と直進する高水敷流れがクロスするため、これらの間に大きな流速シア $\partial U / \partial y$ が発生する。このせん断によって遠心力に起因する単断面蛇行流れの 2 次流とは逆回転の 2 次流が発生する。高水敷流れが低水路に流れ込む右岸境界部付近で発生した 2 次流は流下とともに発達し、その存在領域は低水路断面全域に拡大する。

次に、2 次流のスケールを定量評価するために、横断面循環の流下方向変化について考察する。横断面の循環 Γ は、式(5)のように定義される。

$$\Gamma \equiv \oint_A \Omega_s dA \quad (5)$$

ここで Ω_s は微小面積 dA に存在する渦度の大きさである。したがって Γ は図-5 の渦度分布を用いて断面ごとに計算できる。図-6 に、低水路の各断面における循環の流下方向変化を示す。図から循環 Γ は細かな変動を除けば、蛇行流入口 $s/L_s = 0.0$ で正值をもつが、流下とともに値が減少し、負の値をもつようになる。特に、蛇行低水路流れと直進高水敷流れのクロス効果が顕著となる $s/L_s = 0.4$ 付近から負の値に変わり、さらに減少する傾

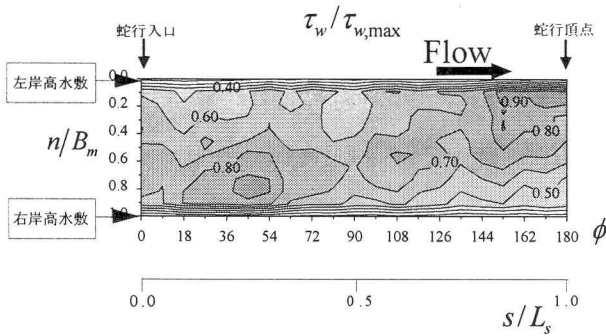


図-7 底面せん断応力分布

向が確認できる。このことは前述した、負の渦度を有する反時計回りの2次流の発生と発達特性に関係していると考えられる。

3.3 底面せん断応力の分布特性

本節では流れの抵抗特性を議論するための重要な物理量である底面せん断応力 $\tau_w \equiv \rho U_{s*}^2$ について考察する。ただし、 ρ は水の密度、 U_{s*} は底面摩擦速度である。禰津ら(2003)⁸⁾は高水数に乗り上げる水深変化する複断面開水路流れを対象にしたLDA計測の結果から、乗り上げ直後の低かぶりステージにおいても対数則が比較的良好に成立することを報告している。したがって本研究でも式(6)で与えられる粗面对数則が全領域に適用するものとして、 U_{s*} を求めて τ_w を評価した。

$$U_s / U_{s*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y}{k_s} \right) + 8.5 \quad (6)$$

ここで、 κ はカルマン普遍定数で、本研究では Nezu & Rodi(1986)⁹⁾が提案した $\kappa = 0.412$ の値を用いる。図-7はその最大値 $\tau_{w,max}$ で無次元化された底面せん断応力 τ_w の平面コンター図を示す。図-2(a)と比較すると、底面付近の主流速と同様に低水路内では内岸側から内岸側に結ぶように、 τ_w の大きな領域が現れ、既往研究と同じ結果を得た。特に2次流が発達している蛇行頂点の付近 ($s/L_s = 1.0, \phi = 180^\circ$) の左岸側には非常に大きな底面せん断応力の領域が存在する。これらの結果から低水路内に発生する2次流は主流速だけでなく底面せん断応力の分布にも大きな影響をおよぼすことがわかる。このような τ_w が大きくなる場所は洗掘が起こりやすい領域となり、河川工学的には危険な領域といえる。

3.4 乱れ強度の分布特性

図-8は主流方向の無次元乱れ強度 u'_s / U_{max} の横断面コンター図を示す。ここで、 $u'_s = \sqrt{u_s'^2}$ と定義される。

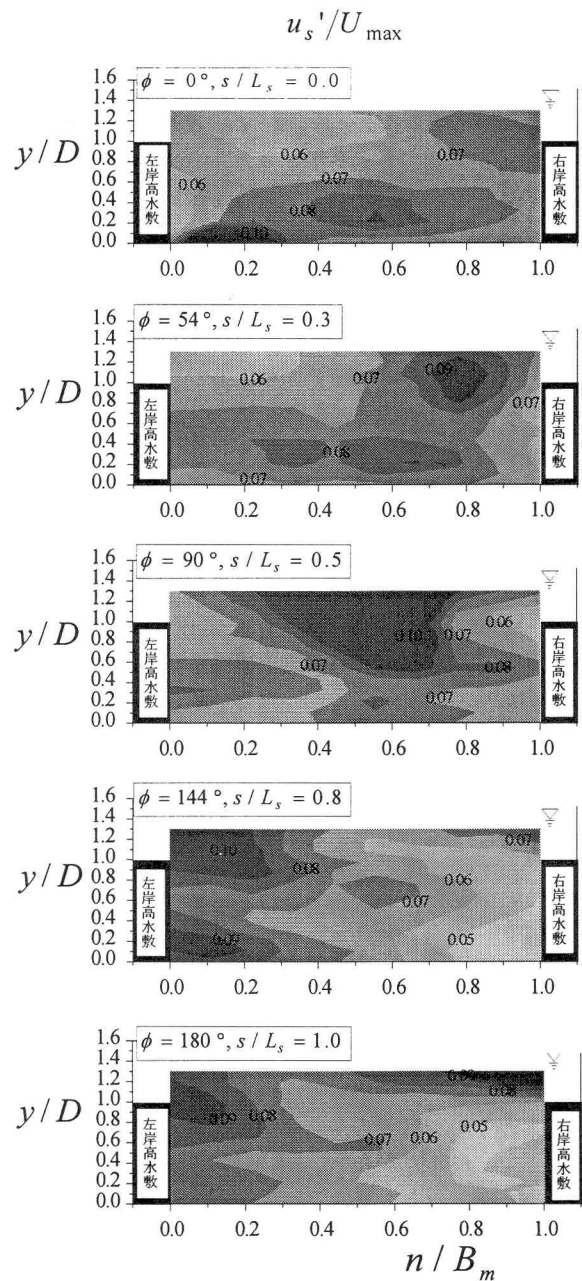


図-8 主流方向乱れ強度の横断面分布

直線部 ($s/L_s = 0$) では底面付近の方が水面付近よりも乱れが大きいことが確認できるが、これは底面付近では流速シア $\partial U / \partial y$ が卓越するためである。一方、蛇行部の $s/L_s = 0.3$ では右岸境界側の水面領域に乱れの大きな領域が観察される。これはかぶり高水数流れと低水路流れのクロス効果により生じた乱れによるものと考えられる。 $s/L_s = 0.5$ では乱れの最大領域が水路中央部に移動する。この領域は低水路内部 ($y/D < 1.0$) まで拡大する。さらに $s/L_s = 0.8$ および 1.0 では乱れの最大領域は左岸側の水面付近に観察される。また連続蛇行流では $\phi = 0^\circ$ と 180° の断面は対称的な分布をもつが、本実験の直線から蛇行への断面遷移区間では、乱れの大きさのオーダー差は小さいものの、全く異なった分布がみられ

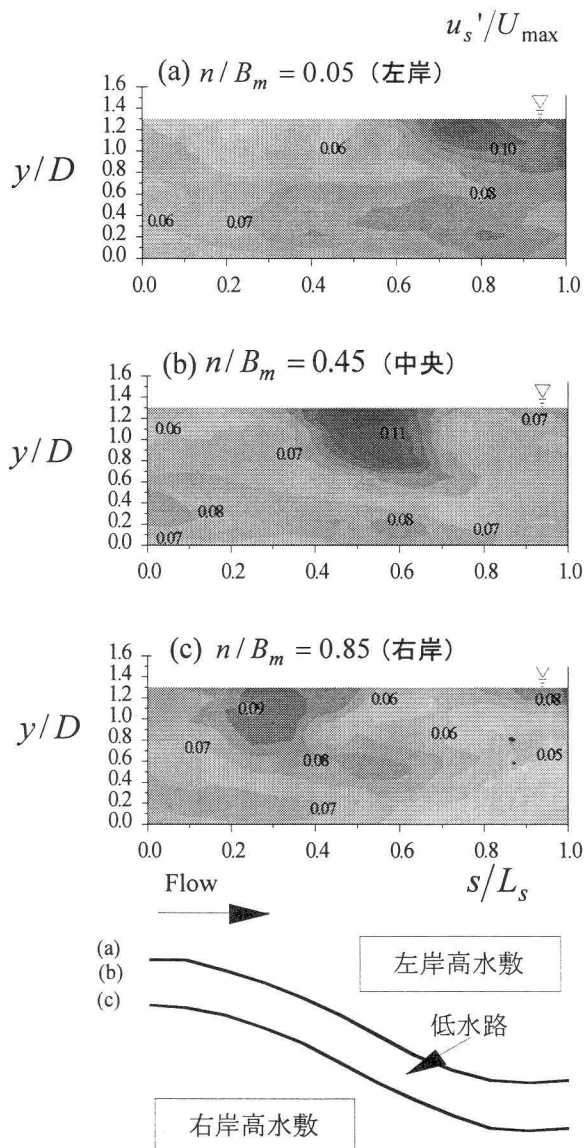


図-9 主流方向乱れ強度の縦断面分布

る。図-9 に $u'_s / U_{\max}$ の代表的な縦断コンターを示す。この図において、乱れの最大領域が左岸側 ($n/B_m = 0.05$) の蛇行頂点付近 ($s/L_s = 1.0$)、中央部 ($n/B_m = 0.45$) のクロス部付近 ($s/L_s = 0.5$) および右岸側 ($n/B_m = 0.85$) の蛇行流入部付近 ($s/L_s = 0.3$) に現れることがわかる。いずれも水面付近に u'_s の最大領域がみられることから図-8 で考察された複断面蛇行流れにおける主流方向乱れの移流特性が理解できる。

図-10 は鉛直方向の無次元化乱れ強度 $v' / U_{\max}$ 横断面コンター図を示す。 v' の分布も u' と同様に、蛇行領域においては右岸境界部で低水路流とかぶり高水敷流の衝突により生じた乱れが、左岸境界部方向に横断移動する特性をもつ。注目すべき点は、 u'_s と異なり v' の最大値が水面付近ではなく低水路内部 ($y/D < 1.0$) に現れる

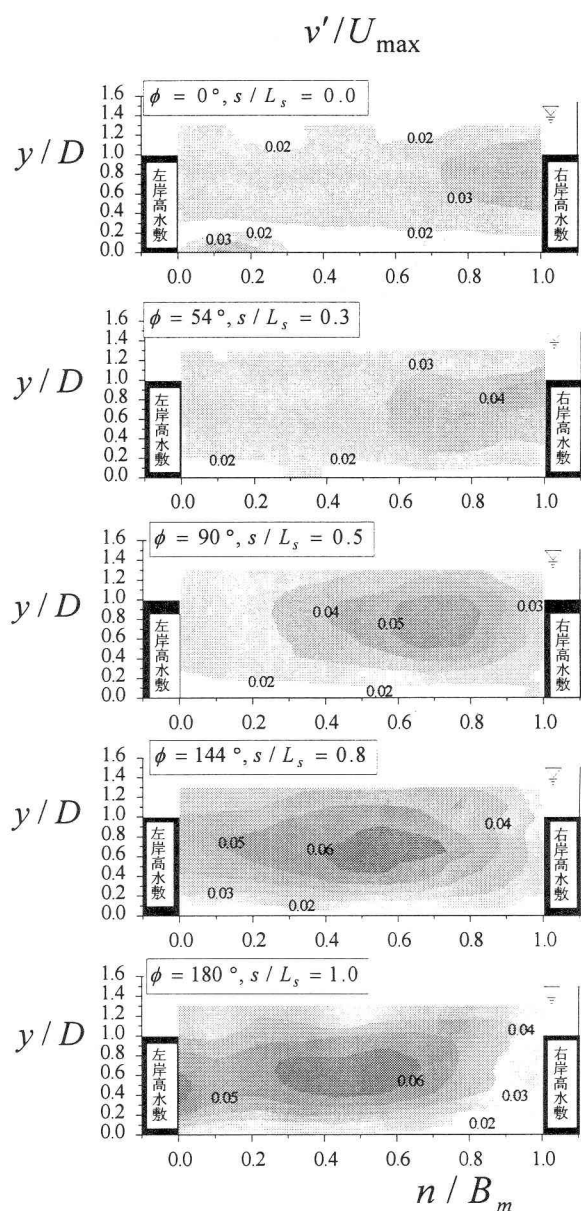


図-10 鉛直方向乱れ強度の横断面分布

ことである。これは2次流の発達によって鉛直方向の乱れが直線部に比べて増加したためと推測される。さらに蛇行頂点部 ($s/L_s = 1.0$) において、乱れの最大領域は左岸境界部まで移動しておらず、低水路の中央部に現れている。これは右岸境界部から輸送されてきた v' の最大領域が、右岸境界部に到達する前に2次流によって底面側に沈み込んだためと思われる。このように主流方向の乱れ強度と鉛直方向の乱れ強度の分布は大きく異なることがわかる。

図-11 は横断方向の無次元化乱れ強度 $w'_n / U_{\max}$ の横断面コンター図を示す。蛇行部に流入した直後の断面ステージの $s/L_s = 0.0$ および 0.3 では低水路内部に局所的に大きな分布はほとんどみられない。一方で $s/L_s = 0.8$ および 1.0 では水面付近に乱れの大きな分布が観察され

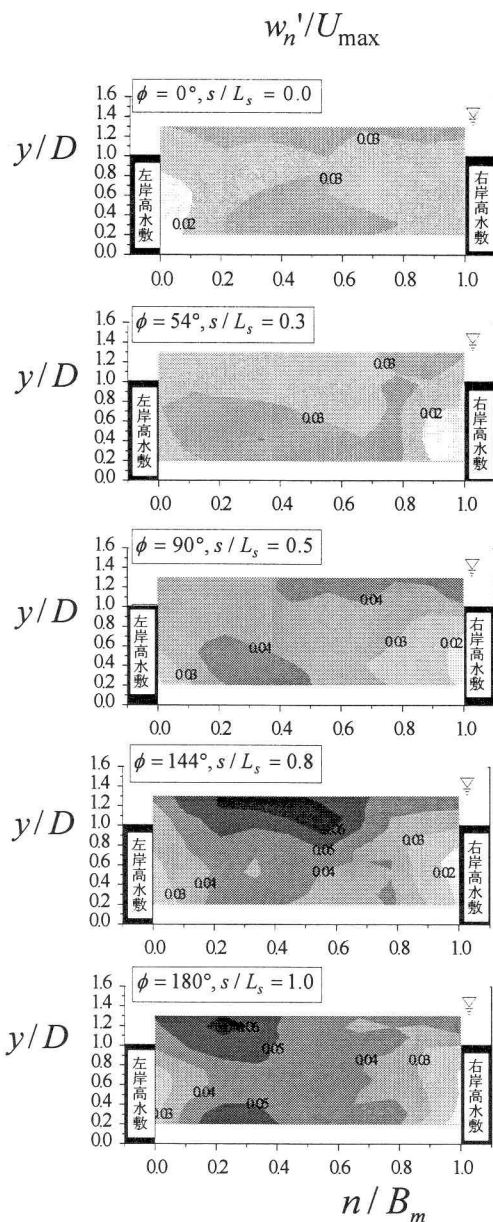


図-11 横断方向乱れ強度の横断面分布

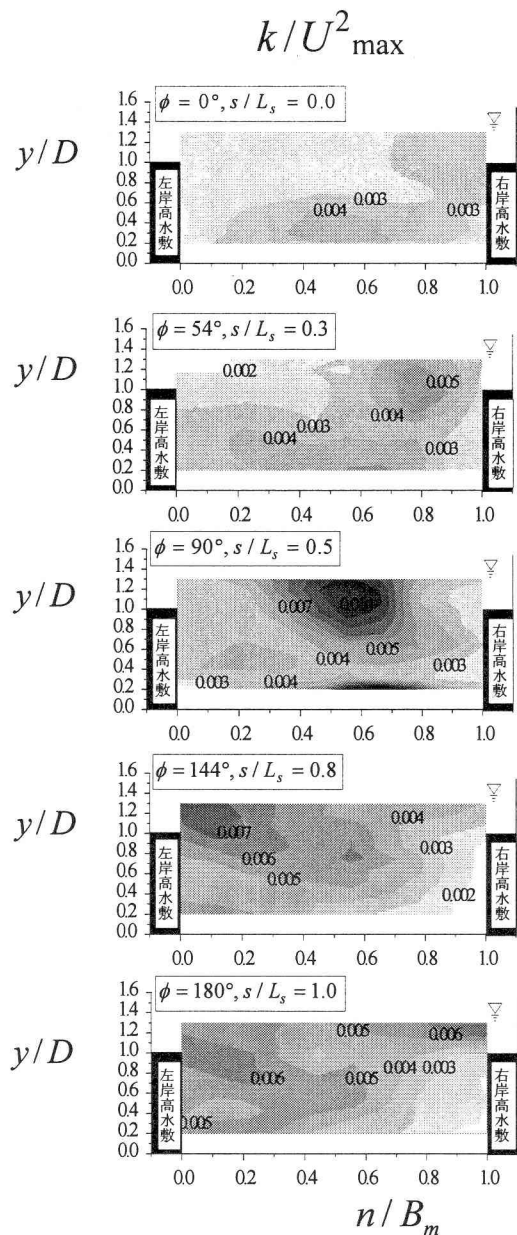


図-12 乱れエネルギーの横断面分布

る。これは発達した2次流によるものと思われる。また水面側の方が底面側よりも乱れが大きい、これは u'_s と同様に水面側ではかぶり高水敷流れと蛇行低水路流れの衝突によってより大きな乱れが生じるためと推測される。

図-12 は乱れエネルギー $k \equiv (u_s'^2 + v'^2 + w_n'^2)/2$ の横断面コンター図を示す。乱れ強度と同様に $U_{\max}$ で無次元化して表示した。全体的に u'_s と類似した分布を持ち、水面付近に発生する最大領域が右岸側から左岸側に輸送されることがわかる。 $s/L_s = 0.5$ において水路中央部で最大領域が観察されるが、その鉛直位置は u'_s と異なり、水面でなく高水敷高さ付近($y/D = 1.0$)に観察される。これは v 成分の影響により最大分布が水面から沈み込んだものと思われる。

3.5 横断方向レイノルズ応力

図-13 に横断方向の無次元レイノルズ応力 $-u_s w_n / U_{\max}^2$ の横断面コンター図を示す。横断方向のレイノルズ応力は低水路と高水敷の間の運動量交換を評価する重要な物理量であり、大規模な水平組織渦と密接に関係する。流入部($s/L_s = 0$)では右岸境界部で負、左岸境界部で正の分布がみられるが、これは低水路と高水敷の境界部に発生する水平渦によるものと推測される。蛇行領域($0 < s/L_s < 1.0$)では、流入部から分布が大きく変化する。特に蛇行頂点部($s/L_s = 1.0$)では右岸境界部で正、左岸境界部で負となり、運動量交換の特性が流入部と比べて異なることが予想される。実際に著者ら¹⁰⁾は直線から蛇行に遷移する複断面開水路を対象に、DV

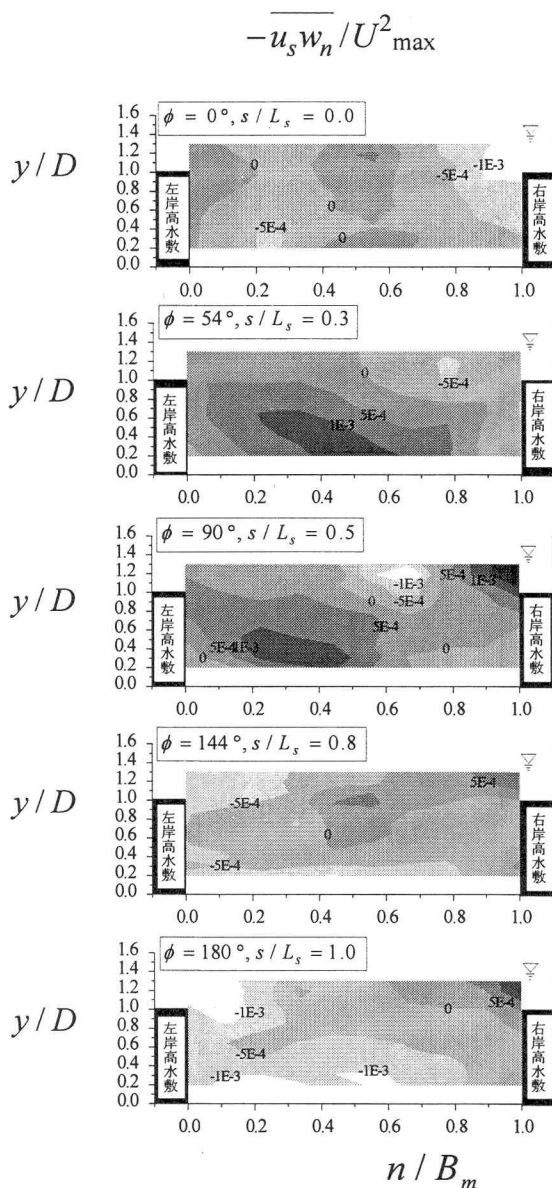


図-13 横断方向レイノルズ応力の横断面分布

カメラを用いた PIV 可視化計測を行い、蛇行水平渦の移流特性を明らかにした。しかしながら、蛇行水平渦の分裂・再生成プロセスおよび2次流との3次元的な関係性については不明な点が多く、今後数値計算も導入して明らかにしていきたい。

3.5 鉛直方向レイノルズ応力

本節では低水路内部 ($y/D < 0$) とかぶり領域 ($y/D \geq 0$) の運動量交換の指標である鉛直方向レイノルズ応力 $-\overline{u_s v}$ の分布特性について考察する。図-14 には鉛直方向の無次元レイノルズ応力 $-\overline{u_s v} / U_{\max}^2$ の横断面コンター図を示す。流入部 ($s/L_s = 0$) では、横断面全域に正の分布が広がっており、開水路直線流れと同様の傾向をもつ。一方でクロス部 ($s/L_s = 0.5$) では水路中

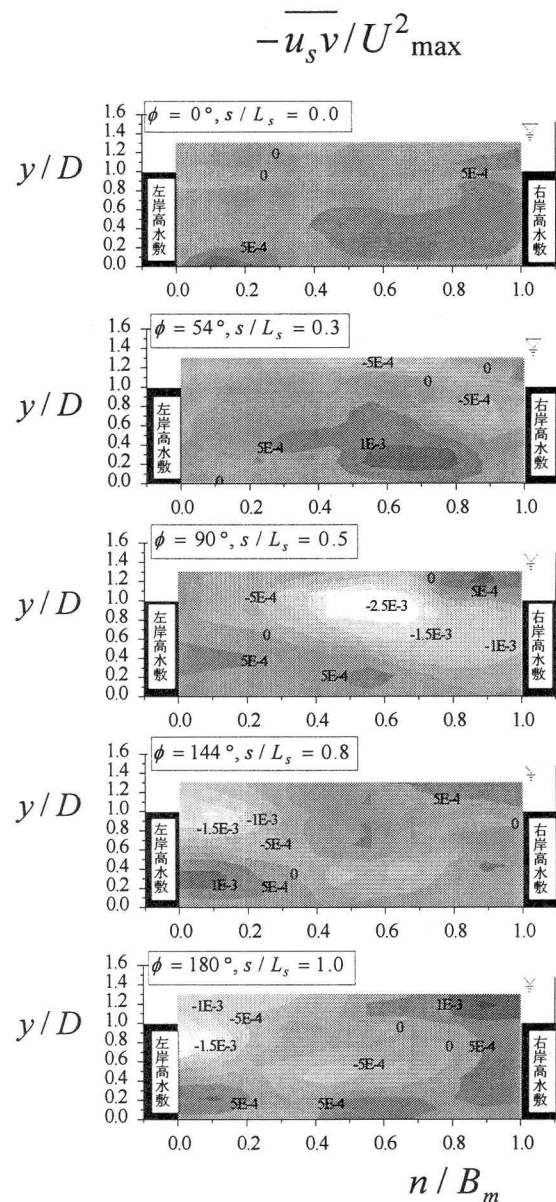


図-14 鉛直方向レイノルズ応力の横断面分布

央部に負の分布が卓越していることがわかる。これは図-3 で考察したように、この領域で流速の鉛直シアが負 ($\partial U / \partial y < 0$) となるためだと思われる。この結果から、低水路内部 ($y/D < 1.0$) と高水敷かぶり部 ($y/D > 1.0$) の間で運動量の交換が促進されることが理解できる。また蛇行頂点部 ($s/L_s = 1.0$) では高水敷高さ ($y/D = 1.0$) 付近から水面付近までの領域において、右岸境界側では正、左岸境界側では負の分布がみられ、横断方向に非対称な分布となる。これも主流速分布の変化に起因するものと思われる。

主流速の鉛直シア $\partial U / \partial y$ とレイノルズ応力 $-\overline{u_s v}$ の関係性を調べるために図-15 にこれらの流下方向変化を示す。図には底面付近の $y/D = 0.20$ と高水敷高さ付近の $y/D = 0.79$ における左岸側 ($n/B_m = 0.05$) およ

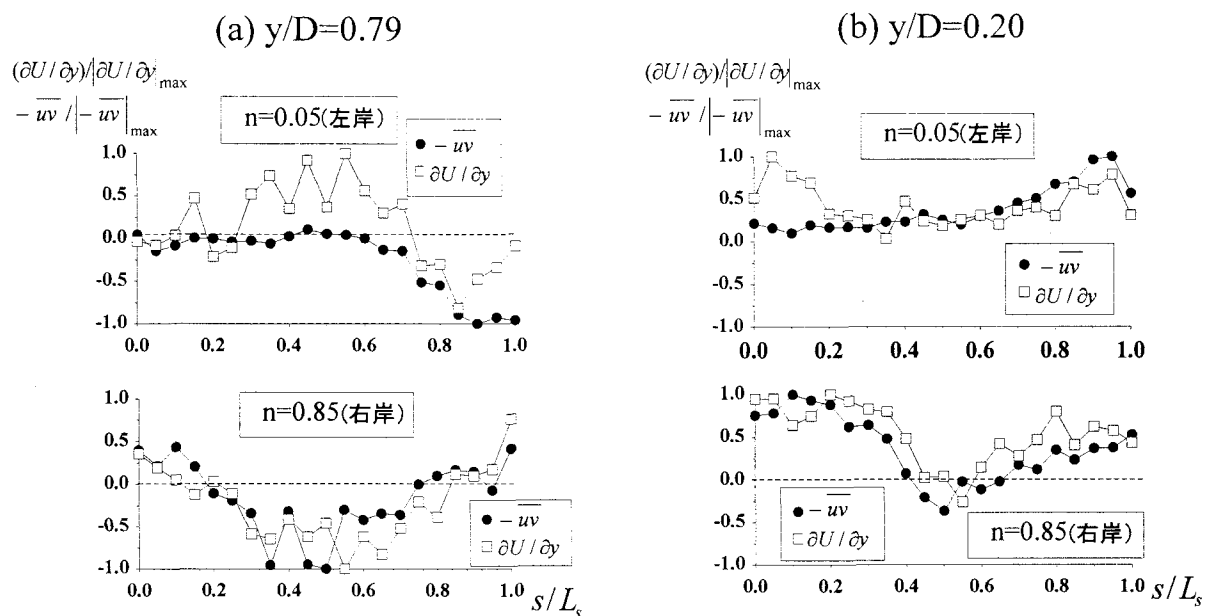


図-15 鉛直方向レイノルズ応力と主流速シアの関係

び右岸側($n/B_m = 0.85$)の結果を示しており、値はそれぞれの最大値で無次元化してある。計測値にばらつきがあるものの、蛇行クロス部($s/L_s = 0.5$)付近から頂点部($s/L_s = 1.0$)にかけて $\partial U/\partial y$ と $-\overline{u_s v}$ は同様の分布傾向をもっている。特に図-14で考察した、高水敷高さ付近($y/D = 0.79$)の頂点部($s/L_s = 1.0$)では、左岸域($n/B_m = 0.05$)と右岸域($n/B_m = 0.85$)で $-\overline{u_s v}$ の符号が異なるが、 $\partial U/\partial y$ の符号もこれに対応しており、複断面蛇行流れにおいても流速シアとレイノルズ応力には関係性があることがわかった。

4. 結論

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 高水敷上の流れが低水路内に流れこむクロス領域では、2次流セルに対応する渦度分布が観察され、流下とともに発達することがわかった。
- 2) 底面せん断応力は主流速分布に対応して、蛇行の内岸側に最大領域が発生する。また鉛直方向レイノルズ応力分布は、これに対応した類似の分布特性をもつ。
- 3) 低水路流れと高水敷流れのクロス効果によって大きな乱れが生成される。この乱れ分布の最大領域は低水路を横切るように流下するが、乱れの向きにより分布特性は大きく異なる。
- 4) 蛇行部の高水敷高さ付近では鉛直方向レイノルズ応力が卓越し、低水路領域と高水敷領域の運動量交換が活発であることが示された。

参考文献

- 1) Tominaga, A. and Nezu, I., Turbulent Structure in Compound Open-channel Flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.117, No.1, pp.21-41, 1991.
- 2) Cokljat, D. and Younis, B. A., Compound channel Flows, "a Parametric study using a Reynolds-stress transport closure", *J. of Hydraulic Res.*, IAHR, Vol.33, No.3, pp.307-320, 1995.
- 3) 石垣泰輔・武藤裕則：複断面蛇行開水路流れの構造と底面せん断力分布について，水工学論文集第42巻，pp.901-906，1998.
- 4) 福岡捷二・大串弘哉・岡部博一：複断面蛇行流れに及ぼす堤防と低水路の蛇行度と位相差の関係，水工学論文集，第42巻，pp.961-966，1998.
- 5) Shiono, K. and Muto, Y., Complex Flow Mechanisms in Compound Meandering Channels for Overbank Flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.376, pp. 221-261, 1998.
- 6) Nezu, I., Sanjou, M., Wakamoto, H. and Doi, T., 3-D Velocity Measurements in Transition Region from Straight to Meandering Open-channel Flow with Floodplain, *Proc. of IAHR congress, HongKong*, pp.1593-1599, 2004.
- 7) 福岡捷二・小俣篤・加村大輔・平生昭二・岡田将治：複断面蛇行河道における洪水流と河床変動，土木学会論文集 No.621/II-47, pp.11-22, 1999.
- 8) 瀬津家久・山上路生・若元洋樹：単断面から複断面へ遷移する非定常な複断面流れにおける高水敷上のせん断応力分布，水工学論文集，第47巻，pp.463-468，2003.
- 9) Nezu, I. and Rodi, W., Open-channel Measurements with a Laser Doppler Anemometer, *J. of Hydr. Eng.*, Vol.112, pp.335-355, 1986.
- 10) 瀬津家久・山上路生・若元洋樹・土井智礼：低水路が蛇行した直線状高水敷流における乱流構造と水平渦に関する実験的研究，土木学会論文集，2005年5月号（印刷中）

(2005年4月15日 受付)