

# 河川乱流の野外計測と2次流に関する研究

禰津家久\*・富永晃宏\*\*・中川博次\*\*\*

開水路乱流の基本的構造は実験室での高精度の実験データからほとんど明らかにされてきたが、これらの実験ではレイノルズ数  $Re \approx 10^4$  程度と比較的小さいため、これが高レイノルズ数の河川乱流にまで適用できるかは不明である。そこで、本研究では3成分電磁流速計を用いて琵琶湖疎水 ( $Re = 8 \times 10^5$ ) と愛知用水 ( $Re = 6 \times 10^5$ ) で乱流計測を行い、2次流セル群(並列らせん流)と自由水面近傍の2次流が実河川の流れにおいても存在することを始めて示した。これらの河川の二次流の特性は実験水路のものと同様一致した。

**Key Words** : secondary currents, river turbulence, field measurements

## 1. 緒 論

直線状の河川の流速分布に関する野外計測は、100年以上前から河川技術者によってすでに着手されている。例えば、米国の Stearns(1883)<sup>1)</sup> は、河川の流速分布を計測し、川幅が狭い河川では最大流速が水面ではなく水面より下方の流れの内部に現れること(これを最大流速点の降下現象という)を発見した。この年は、ちょうど英国のレイノルズが層流・乱流のパターンを可視化法で発見した乱流研究の元年ともいべき年であるが、レイノルズの論文が有名すぎて Stearns の河川乱流に関する重要な発見はこの陰に隠れてしまったように感じられる。一方、Gibson(1909)<sup>2)</sup> は、英国の河川を実測し、Stearnsの発見した最大流速点降下現象を確認するとともに、この現象が2次流セル(最近では、縦渦ともいう)によって引き起こされる可能性を指摘した。

Vanoni(1946)<sup>3)</sup> は、開水路流れの浮遊砂濃度分布を計測し、濃度が水路横断方向に規則的に濃淡分布を示すことを発見した。そして、彼は、浮遊砂濃度が縦筋状の濃淡分布になるのは2次流セルによる、あるいは逆に2次流セルが濃淡分布によって惹起されることを推測した。河川乱流に関する木下(1967)<sup>4)</sup> の研究は、この分野に多くの示唆を与えた。木下は、カメロン効果を航空写真測量に応用して洪水河川の水面流速を詳細に解析し、流れは川幅方向に決して一様ではなく、高速部と低速部が交互に水深規模の間隔で整然と並ぶことを発見した。そして、この原因を2次流セル(彼は、並列らせん流と命名した)の存在であろうと予測した。河川に同様な2次流セルが存在する可能性は、同時期に、河床形態の変化から主として地質学者によって指摘された<sup>5),6)</sup>。わが国でも

開水路の掃流砂や分散に及ぼす2次流の影響がいくつか報告されている<sup>7),8)</sup>。

しかし、後述するように直線河川の2次流は湾曲流で遠心力のため発生する2次流(流体力学ではこれをプラントルの第一種2次流という)に比べて、より普遍的な現象であるが乱れの非等方性のため発生するから主流の数%の微流速であり(プラントルの第二種2次流といふ本論文で対象とするもの)、これを野外で実測することは当時不可能であった。一方、1960年代後半から流体機器の合理的な設計の必要性から機械工学等の分野でダクト(閉管路)における第二種2次流に関する実験的研究が本格化し、70年代後半にはレーザ流速計でこれを計測する試みも行われた。また、代数応力モデルを用いて2次流を数値計算する試みも同時期に着手された。

Nezu & Rodi(1985)<sup>9)</sup> は、2成分レーザ流速計の高精度計測システムを開発し、水路の2次流を実測することに初めて成功した。そして、この計測結果は、それ以前に Naot & Rodi(1982)<sup>10)</sup> が代数応力モデルを用いて予測した数値計算結果によく一致し、注目された。その後各分野で、ダクト流や開水路流における2次流の構造やその発生機構がかなり研究され、両者の2次流は根本的に相違することが明らかになってきた<sup>11)</sup>。また、可視化法によっても2次流の存在が確認されるようになった<sup>12)</sup>。

これらは最もシンプルな単断面水路の2次流の研究であり、研究文献も多く、最近レビューされた専門書等を参照されたい<sup>13),14)</sup>。さらに、筆者らのグループは、複断面水路における2次流構造を光ファイバー型レーザ流速計を駆使して高精度に計測することに成功し<sup>15)</sup>、また、この2次流特性を代数応力モデルで良好に数値予測できることを示した<sup>16)</sup>。

以上の研究は、実験室規模のレイノルズ数 ( $10^4$  程度) を対象とし、開水路流れの3次元乱流構造がかなり解明

\* 正会員 工博 京都大学助教授 環境地球工学教室  
(〒606 京都市左京区吉田本町)

\*\* 正会員 工博 名古屋工業大学助教授 社会開発工学科

\*\*\* 正会員 工博 京都大学教授 環境地球工学教室

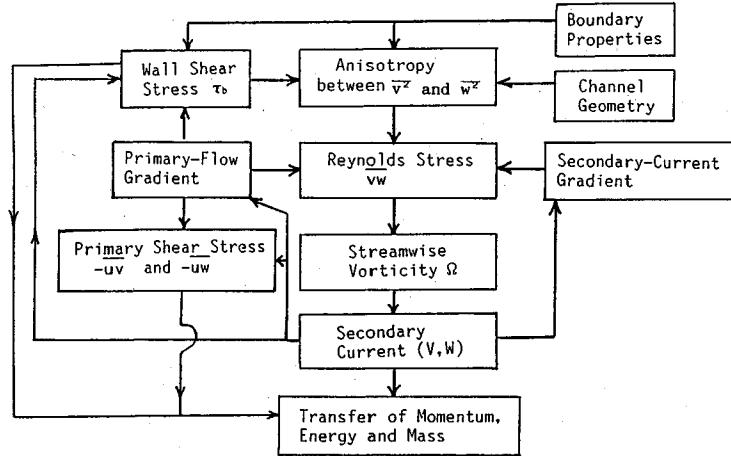


図-1 チャネル流における二次流の発生機構

されたが、これらの実験データや理論が高レイノルズ数の実河川の流れに適用でき、上述の複雑な河川乱流を説明できるか不明である。そこで本研究は、河川乱流を実験・解明する一歩として、よく整備された人工河川を研究対象にした。すなわち、琵琶湖疏水と愛知用水を対象とし、電磁流速計を用いて流速3成分全てを計測解析した。そして、これらの河川乱流の計測結果が高精度の実験室データや数値計算値と比較検討され、両者の乱流構造がよく一致することが確認された。

## 2. 水路乱流の2次流理論

直線水路の2次流  $V, W$  は、次の渦度方程式に支配される<sup>14)</sup>。

$$v \frac{\partial \Omega}{\partial y} + w \frac{\partial \Omega}{\partial z} = \frac{\partial^2}{\partial y^2} (\overline{v^2} - \overline{w^2}) + \left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \overline{vw} + \nu \nabla^2 \Omega \quad (1)$$

$$\Omega \equiv \frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z} \quad (2)$$

ここで、 $U, V, W$  は、それぞれ  $x$  軸（流下方向）、 $y$  軸（鉛直方向）、及び  $z$  軸（水路横断方向）の平均流速成分であり、 $u, v, w$  はそれらの乱れ変動成分である。式(1)は主流成分  $U$  を含まないから、2次流 ( $V, W$ ) のみの運動を厳密に表現している。A項は渦度の移流項であり2次流の存在を示す。B項が渦度を発生させるが、一方Cのレイノルズ応力項はそれを抑制する。粘性項Dは壁面近傍を除き一般に無視できる。Nezu & Nakagawa(1984)<sup>17)</sup>によれば、2次流構造は渦度発生項Bとレイノルズ応力項Cとが主要項となり、A項はこれらの項に比べ近似的に無視される。これと同様な仮定のもとでの2次流の解析が多く試みられている<sup>18), 19), 20)</sup>。したがって、直線水路の2次流は乱れによって惹起される現象であり、層流では存在しない。一方、湾曲流で遠心力のために惹起

される第一種2次流は、層流でも当然存在し、第二種2次流とは発生機構がまったく異なっている。

図-1は、直線状チャネル（管路と開水路の総称）で発生する2次流とそれによって惹起される水理挙動の変化を示したものである。式(1)からわかるように、 $\overline{v^2}$  と  $\overline{w^2}$  の非等方性のために横断方向のレイノルズ応力  $\overline{vw}$  を介して渦度  $\Omega$  が発生し、2次流成分  $V, W$  が生成される。2次流は主流の流速勾配（シェア）を変化させ、このため壁面せん断応力  $\tau_0$  は変化する。Nezu & Nakagawa(1984)<sup>17)</sup> や Knightら(1985)<sup>21)</sup>の研究によれば、2次流の上昇流部で  $\tau_0$  は減少し、下降流部で増加する。あるいは、逆に河床せん断応力  $\tau_0$  が水路横断方向に波状な分布を示せば、2次流が惹起させる。このように2次流と河床せん断応力とは図に示すような複雑なフィードバック系を構成している。水工学の分野では、土砂輸送を初め各種の物質輸送にとってせん断応力が最も重要な支配因子であるが、これに2次流が深く関与していることは乱流輸送による環境水理学を体系化するのに2次流の特性は決して無視できないと考えられる。

2次流の発生原因である乱れの非等方性は、壁面の特性（例えば粗滑面特性）やチャネルの幾何形状に起因する。なかでも、幾何形状の影響は大きく、例えば正方形ダクトでは対角線に関して  $\overline{v^2}$  と  $\overline{w^2}$  は対称となるから  $(\overline{v^2} - \overline{w^2})$  は反対称となり、プラントルが指摘したようにダクトの中心部から対角線に沿って隅角部に流れる2次流、いわゆるコーナ流が発生する。この種のコーナ流に関する研究は機械工学等の分野で精力的に研究され、その概要はほぼ解明されたと思われる<sup>13)</sup>。一方、開水路では自由水面も一種の“弱い壁”の様相を示し、特に、鉛直成分  $\overline{v^2}$  が水平成分  $\overline{w^2}$  に比べてはるかに急減し、非

表-1 水理条件表

	水深 $h$ (m)	水路幅 $B$ (m)	アスペクト比 $B/h$	平均流速 $U_m$ (m/s)	レイノルズ数 $Re$	フルード数 $F_r$
琵琶湖疎水	2.2	17.5	8.0	0.36	$8.0 \times 10^5$	0.08
愛知用水	1.6	4.1	2.5	0.42	$6.1 \times 10^5$	0.11

等方性のため、ダクトとはまったく相違した2次流が開水路で発生することを室内実験<sup>22)</sup>と数値計算<sup>10)</sup>とで説明されている。

このように開水路の2次流は、①ダクトと同様の側壁の影響と②開水路特有の自由水面の影響の2つの形状特性の影響を受け、コーナー流に比べてはるかに複雑であり、不明な点も多い。これまでの福津らの一連の研究によれば<sup>9),11),14)</sup>、①と②の影響度は水路幅  $B$  と水深  $h$  との比いわゆるアスペクト比  $B/h$  によって整理でき、すなわち開水路(河川)は2つのカテゴリーに区分される。

I) 狭水路 ( $B/h \leq 5$ ): 側壁による乱れの非等方性のためコーナー流(河床渦という)が発生する。一方、自由水面による乱れの非等方性によって強い2次流(水面渦という)が発生し、水路中央断面で下降流が生じるために最大流速点は水面より降下する。

### 3. 野外での3次元流速計測と水理条件

河川やエスチャリーの流れを乱れをも含めて実測しようとする試みは1960年代から行われ、これらの野外計測の重要性に関して簡単にレビューされている<sup>24)</sup>。計測の初期は小型プロペラ流速計が使用され、その後はホットフィルム流速計が駆使されたが、浮遊砂や微細なゴミ等の付着の影響が無視できず、計測はかなり困難であった。80年代になって、これらの水質等の影響を受けない小型の電磁流速計が開発され、野外での乱流計測が比較的容易に行えるようになった。特に、2成分電磁流速計が開発され、乱流研究で最も重要なレイノルズ応力等が野外計測できるようになった点は大きな進歩である<sup>14)</sup>。

本研究は、流速3成分を同時計測するために、直径6mmの2成分( $u, v$ )計測用の電磁流速計プローブと直径4mmの $w$ 成分計測用の電磁流速計プローブを一体化した3成分電磁流速計システムを、またこのプローブを取

り付ける安定した2次元の移動装置を開発した<sup>24)</sup>。

( $u, v, w$ )の流速変動は、AD変換後、磁気テープあるいはフロッピーディスクに記録され、その後、室内実験と同様の手順で電算処理された。

野外計測の河川として、琵琶湖疎水と愛知用水が以下の理由で選ばれた。①第二種2次流を検討する目的からできるだけ直線水路が望ましい。②解析の容易さから長方形断面水路が望ましい。③乱流計測は、橋に取り付けた上述のプローブ移動装置で行うが、この計測点の上流に橋脚等の障害物が無いこと。④2次流理論を検証するために、狭水路と広水路で行い、両者を比較検討することが望ましい。⑤その他、計測地点へのアクセスや安全性、計測電源の入手なども考慮した要点だった。

琵琶湖疎水は平安神宮の南部を東西に直線に流れる整備された水路で、計測点を慶流橋に選んだ。疎水への流入位置から計測点までの距離  $L$  は、 $L/h=173$  であり、計測点で十分に発達した乱流が得られた<sup>25)</sup>。表-1に示すように、水深  $h=2.2$ m、幅  $B=17.5$ m であり、アスペクト比は5以上となるから「広水路」に相当する。レイノルズ数  $Re$  は、 $8 \times 10^5$  であり、実験室水路より1オーダー以上大きい流れである。なお、水質は青く濁っており水中を観測することはできなかったが、河床を測量した結果、側岸近くにかんりの土砂の堆積が認められた。

一方、愛知用水の形状は琵琶湖疎水とほぼ同様であるが、水深  $h=1.6$ m に対して水路幅  $B=4.1$ m とアスペクト比が2.5であり、「狭水路」の代表として選定された。計測点は、上流直線区間が約300mと十分に長い高野府第2開水路の油田橋に選んだ。なお、愛知用水は、計測の1年前にコンクリートによって被覆・改修されたから、土砂等の堆積もなく、良好な条件で計測ができた。

### 4. 実験結果とその考察

#### (1) 琵琶湖疎水(広水路カテゴリー)

図-2は、主流の平均流速  $U$  の鉛直分布を示すもので、横断方向  $z/h$  をパラメータにとって各断面ごとに片対数表示している。図中の直線は、次の対数則分布である。

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left[ \frac{y}{k_s} \right] + A_r \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $\kappa$ はカルマン定数で、 $\kappa=0.41$ をとる<sup>26)</sup>。 $k_s$ は等価砂粒粗度、 $A_r$ はNikuradseの積分定数であり、これ

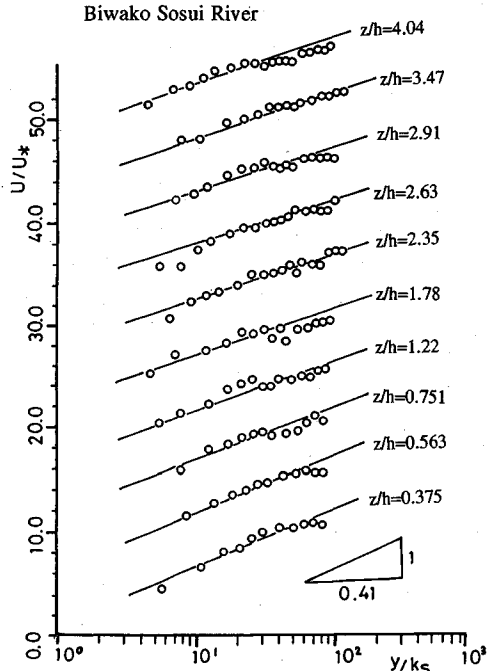


図-2 主流の平均速分布(広水路)

は粗度パラメータ  $k_s^+ = k_s U_* / \nu$  の弱い関数である<sup>27)</sup>。  
 各断面とも、計測値と式(3)の対数則との一致は良好で、これから摩擦速度  $U_*(z)$  を評価できる。図-3は、河床せん断応力  $\tau_b = \rho U_*^2$  をその横断面平均値  $\bar{\tau}_b$  で無次元化して示した  $z$  方向の変化特性である。 $\tau_b / \bar{\tau}_b$  が水路横断方向に波状分布することが大きな特徴である。後述するように、水路には2次流セルが発生しており、この上昇流部 ( $V > 0$ ) と下降流部 ( $V < 0$ ) の位置を矢印で示した。上昇流部で河床せん断応力はほぼ最低になり、逆に下降流部で最高になることがわかる。この重要な特性は、実験室でダクト流<sup>21)</sup>でも、また開水路流<sup>9)</sup>でも見いだされており、2次流と河床せん断応力との普遍的特性と考えられる。 $\tau_b$  の変動値は側壁から離れると小さくなる傾向にあるが、平均値  $\bar{\tau}_b$  の2割から3割にまで達している。このため、河川での土砂や浮遊物質など各種の乱流輸送を合理的に予測するにはこのような河床せん断応力の変化特性を考慮することが重要である。

図-4は、疏水の半断面について主流速  $U(y, z)$  の等流速線を描いたものである。最大流速点の降下は見られないが、水面近くに高速域と低速域が交互に帯状に現れているのが特徴的である。図-5は、2次流の鉛直成分  $V$  の等値線図である。これらの図から  $U$  と  $V$  の相関はかなり大きいことがわかる。すなわち、ほぼ  $z/h=1.9$  と  $3.7$  で  $U$  の等流速線は水面側に張り出し、水面近傍に低

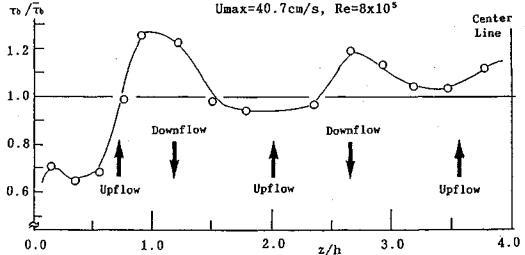


図-3 河床せん断応力  $\tau_b$  の横断方向分布

速域が形成される。ここは2次流の上昇流にほぼ対応し、河床側の低運動量が2次流によって水面側に輸送されるから低速域が形成されたと解釈できる。一方、 $z=1.3$  と  $2.6$  ではほぼ下降流が生じ、水面側の高運動量が河床側に輸送されるから高速域が形成される。しかし、最大流速点が水面下に降下するほど2次流は強くなく、広水路の特性をよく表している。このような疏水に見られた水面上の高速域・低速域の帯構造は、アスペクト比が非常に大きな木曾川 ( $B/h \cong 100$ ) などの洪水河川で航空写真測量から木下<sup>4)</sup>によって発見されている。木下による帯構造の間隔は水深の約2倍であるが、本研究の疏水で見いだされた間隔は約1.8であり、前者に比べて若干小さかった。これは、疏水のアスペクト比が8とかなり小さいから、側壁の効果が若干残っているためであろう。

図-6は、2次流 ( $V, W$ ) の分布をベクトル表示したものであり、最大流速  $U_{max}$  で規格化されている。 $(V, W)$  の値は電磁流速計からの生の実測値であり、何の補正も行わなかったから、図示された値にはかなりの計測誤差が含まれていると考えられる<sup>24), 25)</sup>。しかし、2次流セル群の存在は明らかに認められる。側岸寄りの河床にはかなりの土砂の堆積があり、これが河床せん断応力を変化させ、2次流の形成に何らかの影響を与えている、あるいは逆に2次流が土砂の堆積に何らかの影響を与えているものと推測される。おそらく、縦筋状の河床形態が期待されるが、水は濁っていて河床をまったく目視できなかった。

いずれにせよ、レイノルズ数が大きい河川で、2次流セル群(並列らせん流)の実態が野外計測から明らかにされた意義は大きい。なお、乱れ強度  $u', v', w'$  の分布特性については、文献<sup>24), 25)</sup>を参照されたい。

(2) 愛知用水(狭水路カテゴリー)

愛知用水における野外計測の主な結果を、瀬津ら<sup>11)</sup>による実験水路で得られた高精度のLDAデータおよびNaotら<sup>10)</sup>の数値計算結果と比較検討する。なお、後者のアスペクト比はともに2であるが、愛知用水では2.5であった。

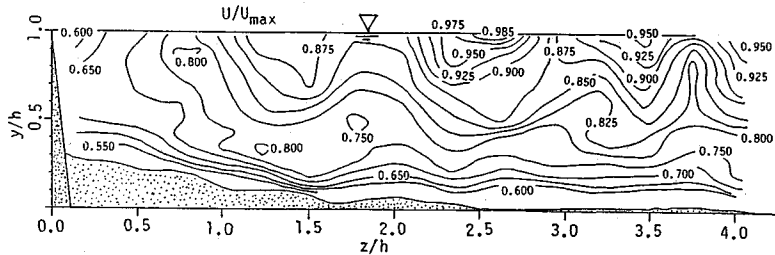


図-4 主流速  $U(y, z)$  の等流速線 (Isovel)

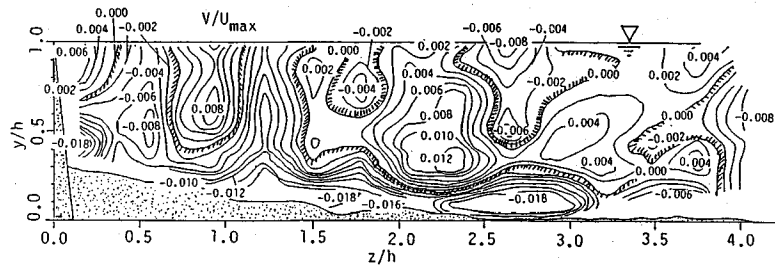


図-5 2次流速の鉛直方向成分  $V(y, z)$  の等値線

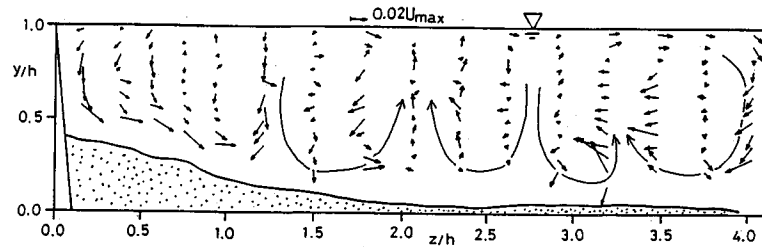


図-6 2次流の流速ベクトル図

図-7は主流速  $U(y, z)$  の等流速線図であり、(a)が野外計測、(b)が実験室、(c)が数値計算の結果である。注目すべき点は最大流速が明らかに自由水面より下方に現れていることである。これは図-4に示した琵琶湖疎水のケースとは対照的である。この事実は、アスペクト比が5以下のときに最大流速点の降下現象が起きるといふ瀬津の理論<sup>14)</sup>の妥当性を示している。野外水路での最大流速点はおおよそ  $y/h = 0.6 \sim 0.7$  であり、これは実験室の計測結果および数値計算結果とよく一致する。

図-8は、(a)野外水路、(b)実験室および(c)数値計算で得られた2次流の流線を比較している。流れ関数  $\psi$  は計測された  $W$  の値を用いて次のように計算される。

$$\psi = \psi(y, z) = - \int_0^y W(y, z) dy \dots \dots \dots (4)$$

野外水路においても水面渦と河床渦が明確に認められ、前者の渦は後者より規模が大きく、野外水路で観測されたこのような2次流構造は実験水路で計測された結果と良好に一致している。この事実は、乱れに起因する二次流のメカニズムが野外水路と実験水路で同じであることを意味している。この発生機構は渦度方程式(1)によってよく説明されるが<sup>14)</sup>、これについては後述する。

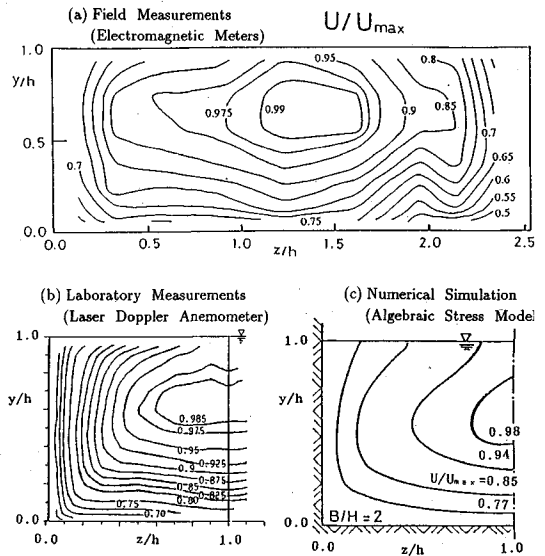


図-7 主流速の等流速線の比較

局所的摩擦速度  $U_* (z)$  は、図-2と同様に流速分布から対数則に従ったから、これから良好に評価された。野外

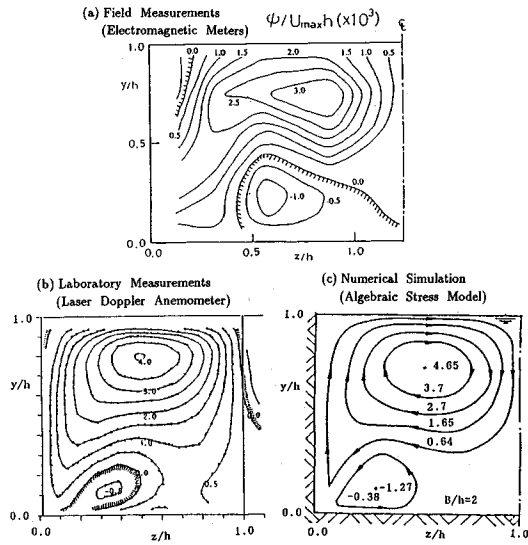


図-8 2次流の流線の比較

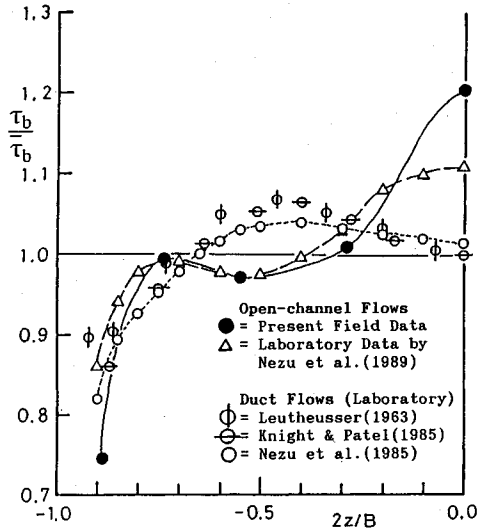


図-9 河床せん断応力分布

水路の等価砂粒粗度は  $k_s^+ \equiv U_* k_s / \nu$  が約 220 となった。これは  $k_s^+ > 70$  であり、完全粗面のカテゴリーに属する。図-9は野外および実験室の開水路の河床せん断応力分布をダクト流のものと比較したものである。開水路では野外水路の分布は実験水路のものとはほぼ一致する。側壁付近で緩やかなピークを示し、 $z/(B/2) \approx \pm 0.5$  で極小値をとり、そこから再び増大して水路中央で最大値をとる。これとは対照的に、ダクト流では中央で最小値をとり、河床せん断応力の横断方向変化はダクト流と開水路流で位相が大きくずれる。このダクト流と開水路流の河床せん断応力の重要な相違<sup>13)</sup>は対応する2次流構造の本質的な違いによるものである。

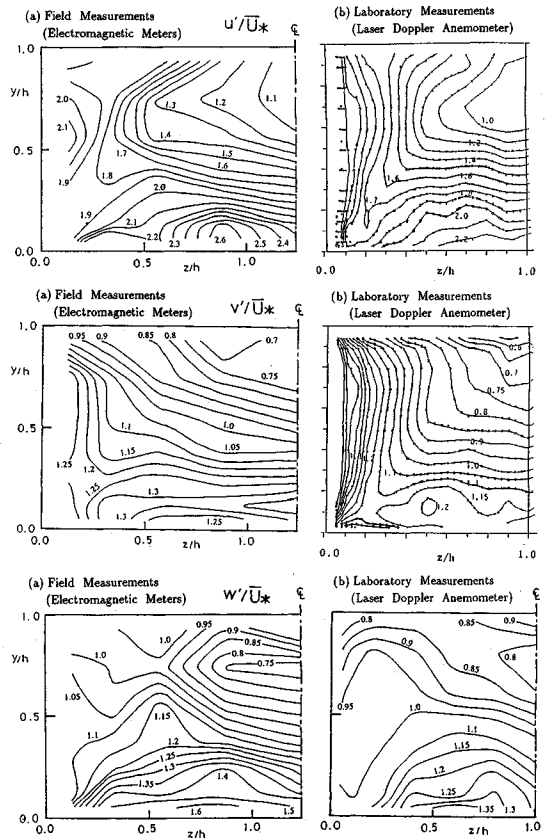


図-10 乱れ強度3成分のコンターの比較

次に、図-10に乱れ強度の3成分  $u', v'$  および  $w'$  のコンターを (a) 野外水路、および (b) 実験水路について示す。これらの値は潤辺に沿って平均された摩擦速度  $U_*$  で無次元化されている。実験水路の  $u'$  と  $v'$  の値は瀬津<sup>9)</sup>によって得られたLDAのデータである。しかし  $w'$  の値については、LDAでは  $w'$  の計測が困難であるため、富永<sup>28)</sup>によって行われたホットフィルムデータの示している。なお、今回の野外水路は完全粗面であるが、実験水路は滑面であった。乱れ強度の構造は3成分ともに野外データと実験室データでほぼ同じ特性を示している。水平方向成分  $u'$  および  $w'$  は両者とも水面で最小値を示さず、これより少し下方に現れる。これは図-7に示した最大流速点の降下現象に対応する。一方、鉛直成分  $v'$  は水面が近づくにつれて単調に減少する。この  $v'$  の特徴的な低減特性は、自由水面の存在によって引き起こされる。このような自由水面効果に関してはNezu<sup>14)</sup>によって詳細に議論されている。以上より、野外および室内ともに、開水路では、 $u', v'$  および  $w'$  の乱れ強度は水面近傍で、対応する閉管路の場合よりも非等方向性はるかに強くなると結論づけられる。

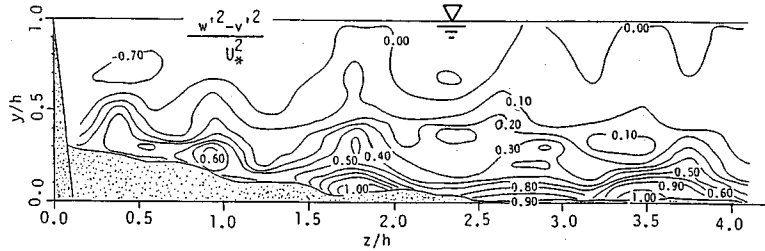


図-11 広水路における渦度発生項のコンター

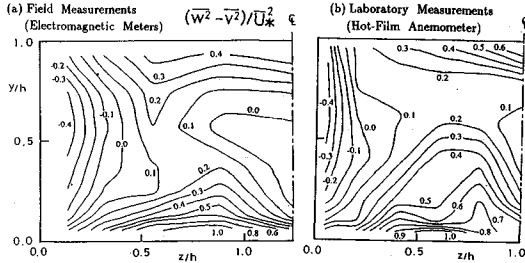


図-12 狭水路における渦度発生項のコンター

### 5. 縦渦の発生機構

Nezu ら<sup>17)</sup> は、式(1)における項  $B \equiv \partial^2(\overline{w^2 - v^2})/\partial y \partial z$  が流下方向の渦度  $\Omega$  の支配的な発生項であり、2次流セルは  $B < 0$  で時計まわりに回転し、 $B > 0$  で反時計まわりに回転することを実証した。図-11 に琵琶湖疎水で電磁流速計によって直接計測された  $(\overline{w^2 - v^2})/U_*^2$  のコンターを示す。このコンターは横断方向に周期的な揺動パターンを示し、側壁から離れたところでも  $B$  項は決してゼロの一定値とはならない。明らかに、この  $B$  項の特性から広水路における2次流セルの存在を理論的に説明することができる。

一方、愛知用水のような狭水路の場合には、乱れ強度は自由水面と側岸の両方から著しい影響を受ける。図-12 に、 $(\overline{w^2 - v^2})/U_*^2$  のコンターを富永ら<sup>26)</sup> による実験室データとともに示す。 $(\overline{w^2 - v^2})/U_*^2$  の値は野外と実験室で若干異なるが、これらの全体的な構造は両者でほぼ同じである。 $(\overline{w^2 - v^2})$  の値は側壁近傍で負となり、水面に近づくにつれ大きくなる。Nezu ら<sup>22)</sup> および富永ら<sup>28)</sup> は、開水路におけるこのような  $(\overline{w^2 - v^2})$  の歪んだ分布が閉管路と全く異なる開水路特有の2次流構造を発生させることを示した。結局、開水路流れ特有の2次流の発生機構は、実験水路よりレイノルズ数が1オーダー以上大きい野外水路にも適用できることがわかった。

### 6. 結論

本研究では、3成分電磁流速計システムによって琵琶湖疎水 ( $Re = 8 \times 10^5$ ) と愛知用水 ( $Re = 6 \times 10^5$ ) におい

て乱流の野外計測を行った。琵琶湖疎水は「広水路」の категорияに属し、愛知用水は「狭水路」の categoriaに属する。本野外計測の結果は、実験水路よりもレイノルズ数が1オーダー以上も大きい流れ場においても、広水路では2次流セル群が、また、狭水路では最大流速点の降下現象を伴う自由水面2次流が存在することをはじめて示した。

このような2次流は乱れの非等方性すなわち  $(\overline{w^2 - v^2})$  の項によって発生することが理論的・実験的に確認された。2次流は、河川横断面全体にわたって、主流速、河床せん断応力および諸々の乱れ特性値の分布パターンに著しい影響を及ぼす。野外計測データと実験室データとの比較から、2次流を含む三次元乱流構造はレイノルズ数に無関係にほぼ普遍的であると結論づけられる。それゆえ、レーザー流速計によって得られた高精度の開水路乱流のデータは、スケールアップした高レイノルズ数の河川乱流にまで適用できると考えられる。

主流速や河床せん断応力の横断方向の変動は、河川の浮遊砂や水質等の乱流輸送また熱輸送も含めた種々の環境水理問題を考察する上で非常に本質的な要因である。今後は、河川におけるこれらの複雑な3次元乱流構造およびそれに伴う輸送現象を予測するための高精度の乱流モデルの開発がさらに望まれる<sup>13)</sup>。

### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、京都市水道局および水資源開発公団愛知用水総合事業部東海支所の皆様にご協力頂きました。ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) Stearns, F. P. : Trans. of ASCE, vol.12, No.216, pp.331-338, 1883.
- 2) Gibson, A. H. : Proc., Royal Soc. of London, Series A, vol.82, pp.149-159, 1909.
- 3) Vanoni, V. A. : Trans. of ASCE, vol.111, pp.67-133, 1946.
- 4) 木下良作 : 写真測量, Vol.6, pp.1-17, 1967.
- 5) Karcz, I. : J. of Geophysical Research, vol.71, pp.3109-3116, 1966.

- 6) Culbertson, J. K. : U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 575-D, pp.214-216, 1967.
- 7) 村本嘉雄・河田恵昭・布村明彦 : 京都大学防災研究所年報, 第20号B-2, pp.451-473, 1977.
- 8) 室田明・中辻啓二・福原輝幸 : 第23回水理講演会論文集, pp.393-398, 1979.
- 9) Nezu, I. and Rodi, W. : Proc. of 21st Congress of IAHR, Melbourne, vol.2, pp.115-119, 1985.
- 10) Naot, D. and Rodi, W. : J. Hydraulic Div., ASCE, vol.108, No.8, pp.173-193, 1982.
- 11) 瀬津家久・中川博次 : 土木学会論文集, 第369号/II-5, pp.89-98, 1986.
- 12) 今本博健・石垣泰輔 : 第33回水理講演会論文集, pp.517-522, 1989.
- 13) Bradshaw, P. : Ann. Rev. Fluid Mechanics, vol.19, pp.53-74, 1987.
- 14) Nezu, I. and Nakagawa, H. : IAHR-Monograph, Balkema Publisher, 1992.
- 15) Tominaga, A. and Nezu, I. : J. Hydraulic Eng., ASCE, vol.117, No.1, pp.21-41, 1991.
- 16) Naot, D., Nezu, I. and Nakagawa, H. : Memoirs of Fac. Eng., Kyoto Univ. vol.54, 1992.(in printing)
- 17) Nezu, I. and Nakagawa, H. : J. Hydraulic Eng., ASCE, vol.110, No.2, pp.173-193, 1984.
- 18) Ikeda, S. and Kikkawa, H. : Dep. Found. Engrg. Fac. Engrg. Saitama Univ., vol.6, pp.1-13, 1976.
- 19) 黒木幹雄・岸力 : 土木学会論文報告集, 第312号, pp.83-92, 1981.
- 20) 大本照憲・平野宗夫・天野光歩 : 水工学論文集, 第34巻, pp.529-534, 1990.
- 21) Knight, D. W., Demetriou, J. D. and Hamed, M. E. : J. Hydraulic Eng., ASCE, vol.110, pp.405-422, 1985.
- 22) Nezu, I., Nakagawa, H. and Rodi, W. : Proc. of 23rd Cong. of IAHR, Ottawa, vol.A, pp.125-132, 1989.
- 23) Nezu, I. and Nakagawa, H. : Proc. of 23rd Congress of IAHR, Ottawa, vol.B, pp.65-72, 1989.
- 24) 瀬津家久・中川博次・瀬谷和彦 : 水工学論文集, 第35巻, pp.345-350, 1991. ss
- 25) Nezu, I. and Nakagawa, H. : Environmental Hydraulics, vol.1, Balkema, pp.379-384, 1991.
- 26) Nezu, I. and Rodi, W. : J. Hydraulic Eng., ASCE, vol.112, No.5, pp.335-355, 1986.
- 27) Tominaga, A. and Nezu, I. : J. Hydraulic Eng., ASCE, vol.118, No.1, pp.73-90, 1992.
- 28) 富永晃宏・江崎一博 : 土木学会論文集, 第357号/II-3, pp.81-88, 1985.

(1992.8.28 受付)

## FIELD MEASUREMENTS OF RIVER TURBULENCE AND SECONDARY CURRENTS IN STRAIGHT RIVERS

Iehisa NEZU, Akihiro TOMINAGA and Hiroji NAKAGAWA

Basic structures of open-channel turbulence have been almost clarified through experimental data of high quality, using a laser Doppler anemometer in laboratory flumes. These experiments have, however, been conducted at moderate Reynolds numbers, say  $Re \approx 10^4$ . Therefore, it is not yet clear whether such laboratory data of open-channel turbulence can be applied to river turbulence at high Reynolds numbers. In this study, turbulence measurements of the Biwako-Sosui River ( $Re \approx 8 \times 10^5$ ) in Kyoto and the Aichi Irrigation Channel ( $Re \approx 6 \times 10^5$ ) in Nagoya have been conducted, using three-component electromagnetic flow meters. It was first found that multi-cellular secondary currents and free-surface secondary currents appeared evidently in actual rivers. The features of such secondary currents in rivers were in a good agreement with those in laboratory flumes.