応用力学論文集 Vol.12, pp.769-778 （2009 年 8 月） 土木学会

ADV を用いた大型複断面開水路の３次元乱流構造に関する研究

Experimental study on three-dimensional structure in large-scale compound open-channel flow by using ADV

山上路生*・禰津家久**・鈴木壮平***
Michio Sanjou, Iehisa Nezu and Sohei Suzuki

*博（工） 京都大学助教, 工学研究科社会基盤工学専攻（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）
** 工博 京都大学教授 工学研究科社会基盤工学専攻（ 同上 ）
*** 京都大学修士課程 工学研究科社会基盤工学専攻（ 同上 ）

Compound open-channel flows are often observed in rivers in flood. These complex flows are highlighted in fundamental hydraulics as well as river engineering because they have various functions such as preventing water disaster, valuable open-spaces for aquatic lives and ecosystems. Recently, several highly-accurate turbulence measurements have been conducted with a two-component laser Doppler anemometer (LDA) and PIV, and they offer very valuable database of observed turbulent structures. Particularly, flow interactions between the main channel and floodplain, 3-D turbulent structure at the junction point, and mass and sediment transport from main channel to floodplains have been studied and many important features have been revealed experimentally and numerically.

However, accurate measured database is not available as yet, because most of turbulence measurements were limited for miniature size flumes, in which the flume width is about 30cm to 60cm. So, in this study, 3D turbulence measurements with recently available acoustic Doppler velocimetry (ADV) were conducted in a 150cm wide large-scale compound channel flume which has just been built in our new hydraulics laboratory.

Key Words: *compound open-channel flow, three-dimensional turbulent structure, ADV*

1. はじめに

河川域の複断面河道流れは洪水流に代表されるように社会的に身近な流れの一つであり, これまでにも多くの研究者・技術者に注目されてきた. 特に低水路と高水敷の境界付近に発生する水平渦は付加抵抗や運動量交換を促進する.また横断面の２次流は主流速の分布だけでなく, 土砂などのスカラー輸送を大きく支配するため河川環境においても重要な流れ形態の一つである. このため, これらを詳細に知るために室内実験と数値シミュレーションを中心に鋭意研究されてきた.

Tominaga&Nezu(1991) [1)]はレーザードップラー流速計(LDA)を用いて複断面開水路流れの詳細な3次元計測を行った. 彼らは低水路の水深が高水敷高さの 2 倍の場合に 2 次流が最も発達すること, そのとき斜昇流速度(斜め方向)の最大値が主流速の 5%に相当することを示し, これが複断面開水路での velocity-dip 現象の原因になっていることを明らかにした.

Nezu&Nakayama(1997)[2)]は, LDA と PTV を用いて横断面計測と水平渦の計測を行い, 2 次流セルと水平渦の関係や高水敷･低水路間の物質輸送の考察を行った. 池田・空閑(1997)[3)]は, 高水敷浅水流の水平渦の発生原因が, 高水敷と低水路の流速シェアーによるせん断不安定性であることを理論と実験の両面から示した. Bousmar&Zech(2002,2005)[4),5)]は片側複断面水路で PTV を用いた実験計測を行い, Nadaoka&Yagi(1998)[6)]による２次元 LES モデルと比較した. さらに渦の合体や消滅段階の長さスケールについて考察した. また水平渦の発達には, 河床抵抗の観点から, ある程度の水深が必要であることも示唆している.

上述のように複断面開水路流れの主流速構造や乱れ特性については貴重な成果が得られている. しかしながら既往のレーザー流速計や PIV などによ

表-1　実験条件

Um (cm/s)	H (cm)	D (cm)	H/D	Bm (cm)	B (cm)	Re
17	40	20	2	60	150	68000

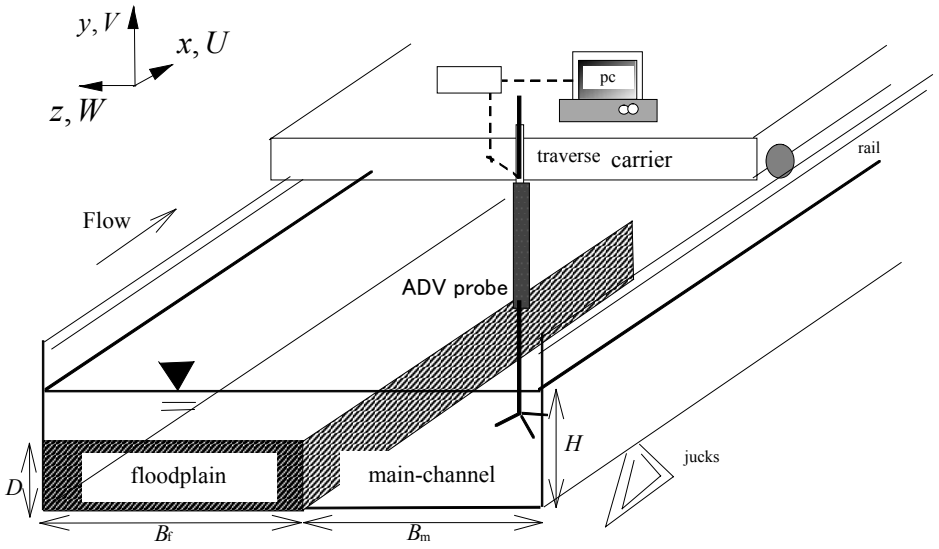


図-1　実験装置と座標系

る高精度計測のほとんどが水路幅40～50cm程度の小型水路を中心に行われてきた. これは光源出力や実験室スペースの制約によるものであるが, 得られた結果の実河川への適用を考える場合, なるべく幅の大きな水路を用いる必要がある. また横断方向の流れの変動が側壁によって抑制されないようにアスペクト比が大きい水路を用いた方が望ましい.

そこで本研究では，幅 150cm の大型水路に複断面流れを再現し，超音波流速計（ADV）によって乱流計測を行い，主流速分布，２次流分布および乱流統計量の分布を既往の研究結果と比較する. さらに流速 3 成分が同時に計測可能という ADV の長所を生かして渦度方程式の生成項の分布を考察し，2 次流の生成機構や 2 次流と水平渦の相互作用を定量的に評価する.

2. 実験条件と計測システム

2.1 実験方法

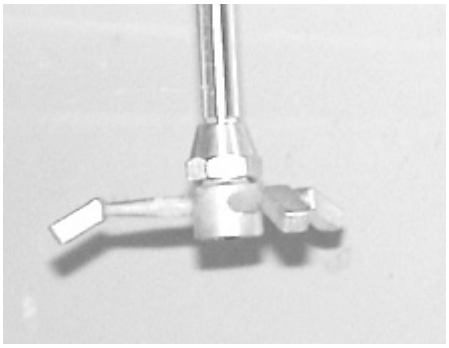
図-1 に本研究における ADV 計測に用いた実験装置図を示す．本計測で用いた水路は，全長 9m，全幅 B = 150cm の循環式大型直線水路である. 水路の両脇にレールを設け, 水路を横断するように移動台車を設置してある. 底面はステンレス製であり，壁面はガラス製である．十分に整流させるため，最上流部にハニカムを設置した．水路の左岸側にアクリル製のボックスを並べて高水敷とし, 複断面水路を再現した．図-1 中の B_m, B_f, D および H は，それぞれ低水路幅, 高水敷幅, 高水敷高さおよび低水路水深である．それぞれ B_m=60cm, B_f=90cm, D=20cm, H=40cm である．座標系は，直交座標の x 軸を流下方向，y 軸を鉛直方向，z 軸を横断方向とした．底面を $y = 0$，高水敷と低水路の境界を $z = 0$ とした．また x，y および z 方向の瞬間流速計測を $\tilde{u}$，$\tilde{v}$ および $\tilde{w}$ とし，それぞれの時間平均値を U, V および W と定義する．それらに対する乱れ成分を u，v および w とする．流速計測には，Sontek 製の下向きタイプの３成分プローブ $(\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w})$ および横向きタイプの２成分プローブ $(\tilde{u}, \tilde{w})$ の microADV を使用した. これらのプローブを写真-1 に示す．ADV を移動台車の上に固定されたトラバースに固定し，上流から 6m 地点に台車も固定して計測を行った．サンプリングレートは 50Hz，瞬間流速のサンプル数は各計測点につき 4096 サンプルである.

表-1 に水理条件を示す．断面平均流速 U_m は 17cm/s とした．Tominaga&Nezu[1]と同様に水深は $H / D = 2$ とした．レイノルズ数 $\mathrm{Re} \equiv U_m H / \nu$ は 68000 である.

2.2 ADV のノイズ特性と処理法

ADV の計測には各種のノイズが介在するからノイズ処理が必要である．ADV の使用例は比較的新しく，この 10 年間で多くの研究者がノイズ対策について報告している．まず考えられる代表的なノイズについて説明するとともに本研究における後処理法を述べる.

(a) Sontek 下向 3Dプローブ



(b) Sontek 横向 2Dプローブ

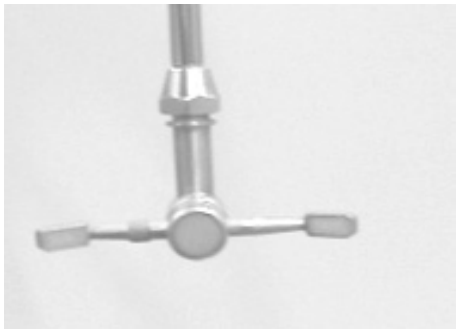


写真-1 Sontek 製 ADV プローブ

(a) エイリアジングの影響[7]

ADV は Doppler shift を利用した流速計で，発信器と受信器，信号調節のための電子モジュールからなる．発信機から出た音波は流体と等速で動いているとされるトレーサーに当たって反射する．受信器で反射波を捕らえ，そこから Doppler phase shift を計測し流速を計算する．ADV における計測では，発音時間(τ)の違う二つの音波対が使われる(それぞれτ_1およびτ_2とする)．それぞれの音波対は交互に発せられ，これら対間には滞留時間τ_Dが存在する．τの大きい側の対は正確な計測に用いられる．小さい方は概算的な解析に用いられる．位相変化は個々のパルス対の自己相関および相互相関から求める．最初に式(1)により流速v_i (i=1,2,3)が求まる．

$$v_i = \frac{C}{4\pi f_{ADV}} \left.\frac{d\phi}{dt}\right|_i \qquad (1)$$

ここで，C：水中での音速，f_{ADV}：音の周波数(10MHz)および$\left.d\phi/dt\right|_i$：位相変化率である．

v_i $(i=1,2,3)$ は各受信器からの信号を順番に処理して求められる．3 方向の流速を求めるのに要する時間 T は，

$$T = 3(\tau_1 + \tau_D + \tau_2 + \tau_D) \qquad (2)$$

となる．このことからデータ計測の最大周波数はf_s(=1/T)となる．こうして求めたv_iはデカルト座標系の値v_{di}に変換される．上記の計測手法の特性から一組のv_iを測定する間に発起する極めて短い周期の変化は捕らえることができない．すなわちv_iは，T/3 の間の平均値である．したがってそこから求まるv_{di}はTの間の平均値ということになる．このことから，計測方法そのものが閾値を $1/T$ とするアナログフィルターとなっていると考えることができる．計測周期はTであるため信号のエイリアジングが起こり，解析されうる変動の周波数の最大値は $f_s/2$ となる(Nyquest 理論)．これは$f_s/2$～f_sに存在する変動のエネルギーが 0～$f_s/2$ の範囲のものに含まれてしまうことを意味し，計測誤差の一因となる．

Garcia et al(2005)[7]は移流速度U_cの大きな流れにおいては，$f_s/2U_c$～f_s/U_cで表される短い波長域に多くのエネルギーが含まれることを指摘した．そこで，彼らは ADV パフォーマンス曲線を新たに導入し，これを用いて先に述べた誤差による乱れエネルギーや流速のパワースペクトルへの影響に関する考察を行った．その結果，誤差の影響を評価するための指標として，移流速度 U_c を含んだ無次元パラメータ F を提案した．

$$F = f_r L / U_c \qquad (3)$$

ここでL：大規模渦スケール　U_c：移流速度　f_r：サンプリングレートである．彼らはFが 20 以上であれば，Nyquest 理論による誤差の影響は無視できるとしている．そこで本計測においては，移流速度を断面平均流速で与えると U_c =17cm/s，サンプリングレートはf_r =50Hz，大規模渦スケールに水深を適用すれば L = 40 cm となる．この結果 F=170>20 となり本研究におけるエイリアジングによるノイズ誤差は小さいと考えられる．

(b) ドップラーノイズの影響

ドップラーノイズはその原因がいまだにわかっておらず，その評価に統一的な方法はない．Nikora&Goring(1998)[8]や Hurther&Lemmin(2001)[9]によっていくつかのノイズ除去の方法が提案されているが，いずれもノイズの原因に関する詳しい考察に基づいた除去方法ではなく，その除去効果は十分ではない．３プローブタイプの ADV には適用できないものもあり，既往のノイズ除去方法だけでは不十分であることがわかった．そこで今回は既往研究では試みられていない wavelet 解析を用いたノイズ除去法を ADV 計測に適用する．これについては後で説明する．

さて平均流速・レイノルズ応力にはドップラーノイズの影響がないと予測される．これは，ドップラーノイズがホワイトノイズであることによる．平均流速については，時間平均されるときにホワイトノイズが，その性質のためにゼロとなることからその影響が除去される． Voulgaris & Trowbridge(1998)[10]によると，レイノルズ応力については

を信号の真値, u, v, w をそれぞれの方向の時間平均値からの偏差とすると，式(4)のような関係が与えられる．

$$\overline{uv} = \overline{\hat{u}\hat{v}} + K\sigma_i{}^2 \tag{4}$$

K は反射してくる超音波の進行方向を軸とする瞬間流速値 v_i をデカルト座標系に変換する際に用いるマトリックス成分からなる定数である．σ_i^2 は v_i の分散値でありこれがノイズとなる．これは $i = 1,2,3$ について等しくなる．上記の K の値が小さくなるため, レイノルズ応力へのノイズの影響は小さくなる. 一方で乱れ強度についても(4)式と同様の式が成り立つが, このとき K の値が大きくなりノイズの影響が無視できないといわれている [10].

(c) 底面反射の影響

ADV は滞留時間 τ_D で短いパルス波を連続的に発している. 一つの瞬間流速に二つの隣り合ったパルス波を用い, 二つの波のドップラーシフトから流速を求める. 一つ目のパルスはサンプリングボリュームで反射され再びプローブに戻ってくるが, その一部がサンプリングボリュームで反射されずに底面まで到達する. このパルスが底面で反射され再びサンプリングボリュームを通る際, 二つ目のパルスのサンプリングボリュームでの反射波と重なってしまうことがある. この時信号に大きなエラーが生じ, 計測値に大きな誤差が生じてしまう. このエラーはその性質上底面からのサンプリングボリュームの位置とパルス間の滞留時間 τ_D から決まる. 滞留時間 τ_D は計測者が設定する Velocity range(五段階)によって変化する. したがってエラーの生じるサンプリングボリュームの高さは流速レンジによって決まる. サンプリングボリュームを底面から離していくと, まず一つ前のパルスとの干渉によってエラーが生じる位置があり, その後さらに離して行くと, 二つ前・三つ前・・・のパルスとの干渉によるエラーが等間隔で各高さごとに発生していくことになる.

このエラーは底面でのパルスの反射が原因であるから, その反射を抑えるための方法を検証した. その結果, 底面に薄いプラスチックの板やテープをはることで改善されることがわかった. そこで, 今回は計測位置 x=6m の底面と壁面にテープをはることでこの影響を除去することができた.

(d) ウェーブレット解析によるノイズ除去

本研究ではウェーブレット解析を用いたノイズ除去を適用する. ウェーブレット解析は時系列データを周波数ごとの時間信号に分解する. Donoho(1995)[11]が提案したウェーブレット縮退は, データ信号のウェーブレット係数が閾値より小さければゼロに置き換えて, 逆変換することによりノイズ除去した信号を再構成する方法である. フーリエ変換法と比べると信号の鋭い変化を残しながらノイズ除去できる点やデータ信号の統計的な性質が不明瞭な場合にも有用である点などのメリットをもつ. 本研究では離散ウェーブレット解析のアルゴリズムを用いた. 詳細は文献を参考にされたい [12]. 最も高い周波数帯のウェーブレット係数 s の標準偏差を σ とすると，閾値 λ は次のように与えられる.

$$\lambda = \alpha\sigma\sqrt{2\ln N} \tag{5}$$

α は補正係数である. 図-2 は単断面開開水路 (水深 15cm, 断面平均流速 20cm/s) のセンターライン半水深地点における瞬間主流速データ $\tilde{u}$ である．オリジナル信号と α =0.5 としたウェーブレットによるノイズ除去信号を示す. ウェーブレットの基底関数には Daubechies12 を適用した. この方法によってノイズ除去を行うと信号の時間変化が滑らかになることがわかる．また図-3 は同じ地点のパワースペクトルである. オリジナルでは高周波領域で-5/3 乗則よりも大きくなるが, 修正信号では-5/3 乗則に一致することがわかる. この結果からウェーブレット解析によってノイズの除去が良好に行えることが確認できたので, 以下では全てこのノイズ除去を施した結果について考察を行う.

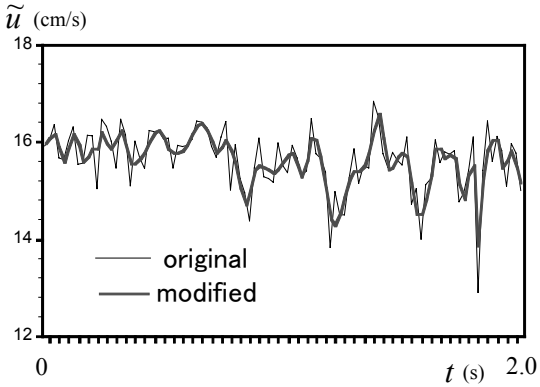


図-2　オリジナル信号とノイズ除去信号

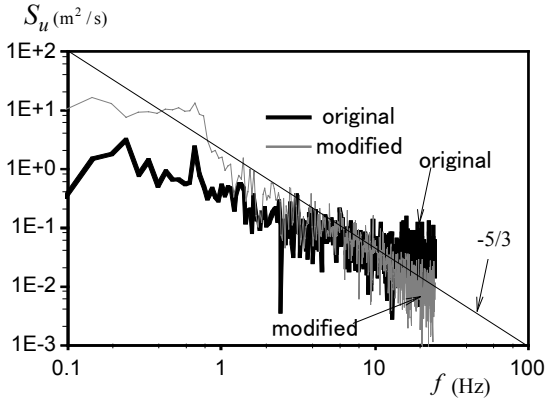


図-3　ノイズの有無によるスペクトルの比較

3. 実験結果と考察

3.1 主流速の横断面分布

乱流計測には 3-probe と 2-probe の二種類の ADV を用

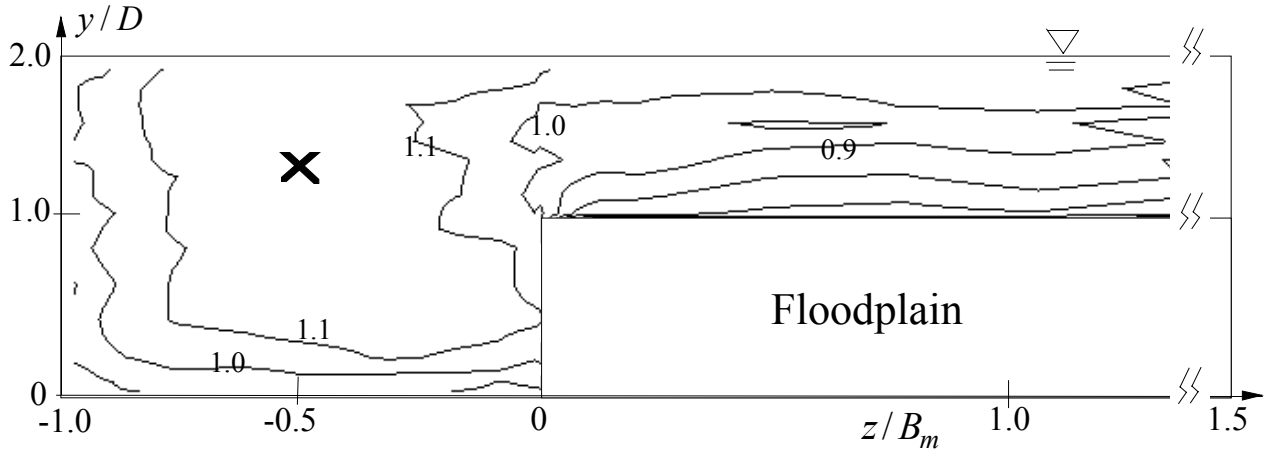


図-4　主流速U/U_mのコンター（X は最大流速点を示す）

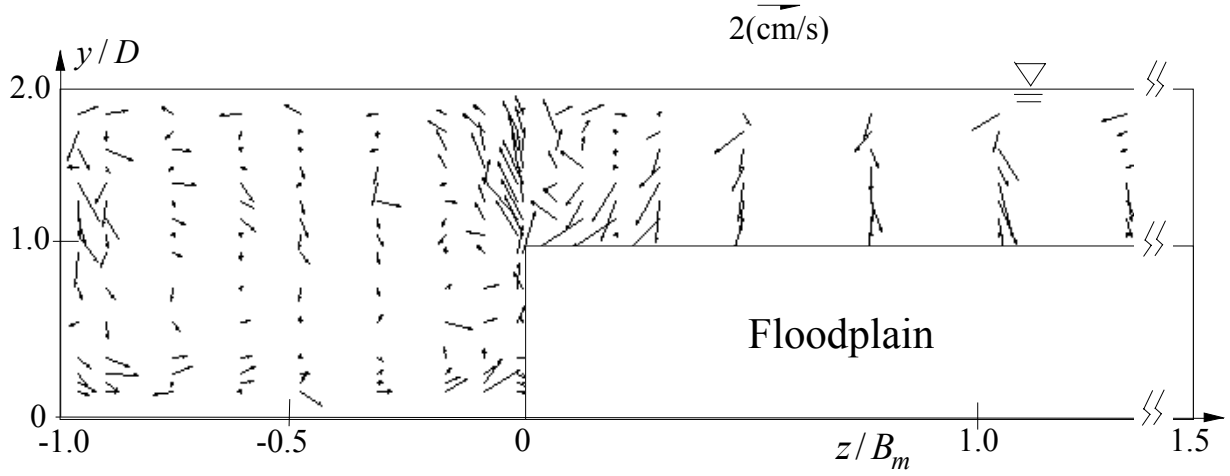


図-5　２次流ベクトル

いた. **写真-1** に示したように 3D プローブは下向きでありサンプリングボリュームはプローブの先端から 5cm 下方の位置にあるため, 水面下 5cm までの範囲は 3D プローブで計測することができない. そこでこの水面領域では横向きの 2D プローブを用いた. 2D プローブでは$\tilde{u}$ と$\tilde{w}$ の 2 成分のみが計測が可能である. **図-4** はU/U_mのコンターを示す. 低水路の分布に注目するとまず低水路のセンターライン付近に観察される最大主流速点が水面からおよそ$y/D=1.3$ まで降下する. また$U/U_m=1.1$ のラインに注目すると低水路と高水敷の境界から低水路に向かって分布が張り出しているようにみえる. 一方で$U/U_m=1.0$ のラインでは境界部から高水敷に向かう張り出しがみえる. 最大流速の降下や境界部における分布の張り出しは後述する 2 次流と関係がある. またこの結果は複断面開水路における一般的な結果であり，同じかぶり水深比をもつ Tominaga&Nezu[1]による LDA 計測結果と定性的に一致する.

3.2　横断面の２次流分布

図-5に2次流のベクトル図を示す. 低水路と高水敷の境界領域に注目すると，境界から低水路に向かう上昇流，いわゆる斜昇流がみられる．また低水路のセンターラインでは水面から底面に向かう下降流が発生し，反時計回りの循環流を形成する．また境界から高水敷にかけてはこれよりも小規模の時計回りの2次流渦が確認できる．これらの特性は幅40cmのTominaga&Nezu[1]の結果に一致する. すなわち少なくとも水路幅が40cmと150cmの流れの間にはスケール相似則が適用できそうであり，実河川スケールへの応用を考える上で大いに期待できる．また前述した主流速の最大降下現象も2次流によることが確認できる.

3.3　レイノルズ応力

図-6 にそれぞれ$-\overline{uv}/U_m^2$，$-\overline{uw}/U_m^2$，$-\overline{vw}/U_m^2$ のコンターを示す．$-\overline{uv}$ の分布では境界部に負値が現れてい

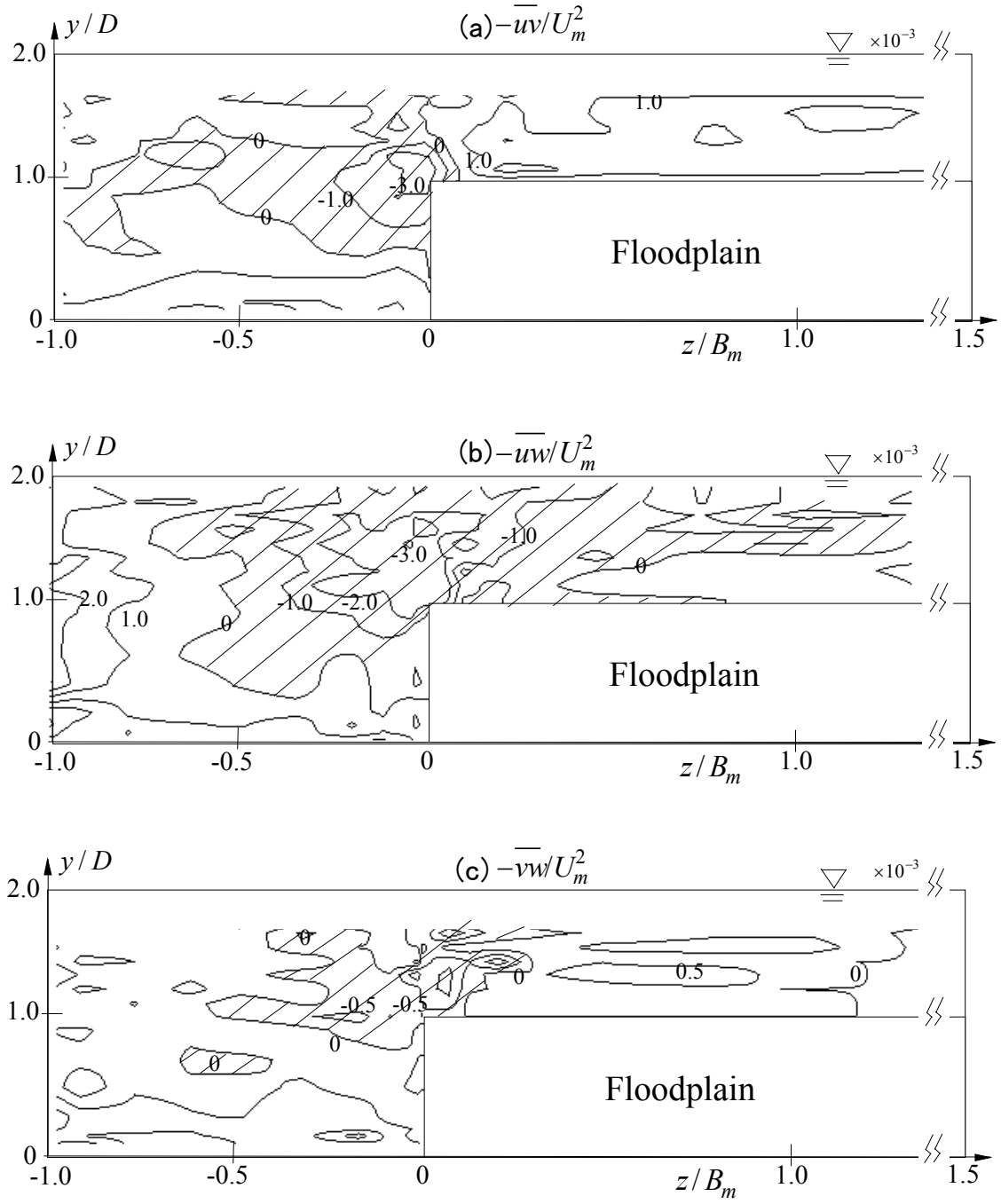


図-6 レイノルズ応力の横断面分布
（斜線部は負値の領域を示す）

る．これは斜昇流によって境界部で主流速勾配$\partial U/\partial y$が負値になるためであると思われる．大規模な低水路と高水敷の底面では大きな正値が現れるが，正の流速勾配によるものであり，通常の2次元的な境界層乱流が発達することが考えられる．

$-\overline{uw}$は境界領域で大きな負の分布をもつ．これはかぶり水深領域で低水路と高水敷の流速差によるせん断不安定性に起因する水平渦の発生に対応する．この負値の極大領域では低水路と高水敷の運動量交換が促進される．低水路の側壁では正の分布が現れるが，これは主流速の横断方向勾配が正になることに対応する．

$-\overline{vw}$はLDAやPIVでは測定が困難なレイノルズ応力成分である．$-\overline{uw}$と同様に境界領域で大きな負値がみられる．これは$v>0$の時に$w>0$あるいは$v<0$の時に$w<0$となることを意味している．**図-5**の斜昇流は時間平均値(V,W)である．v,w時間平均からの偏差を示すから，

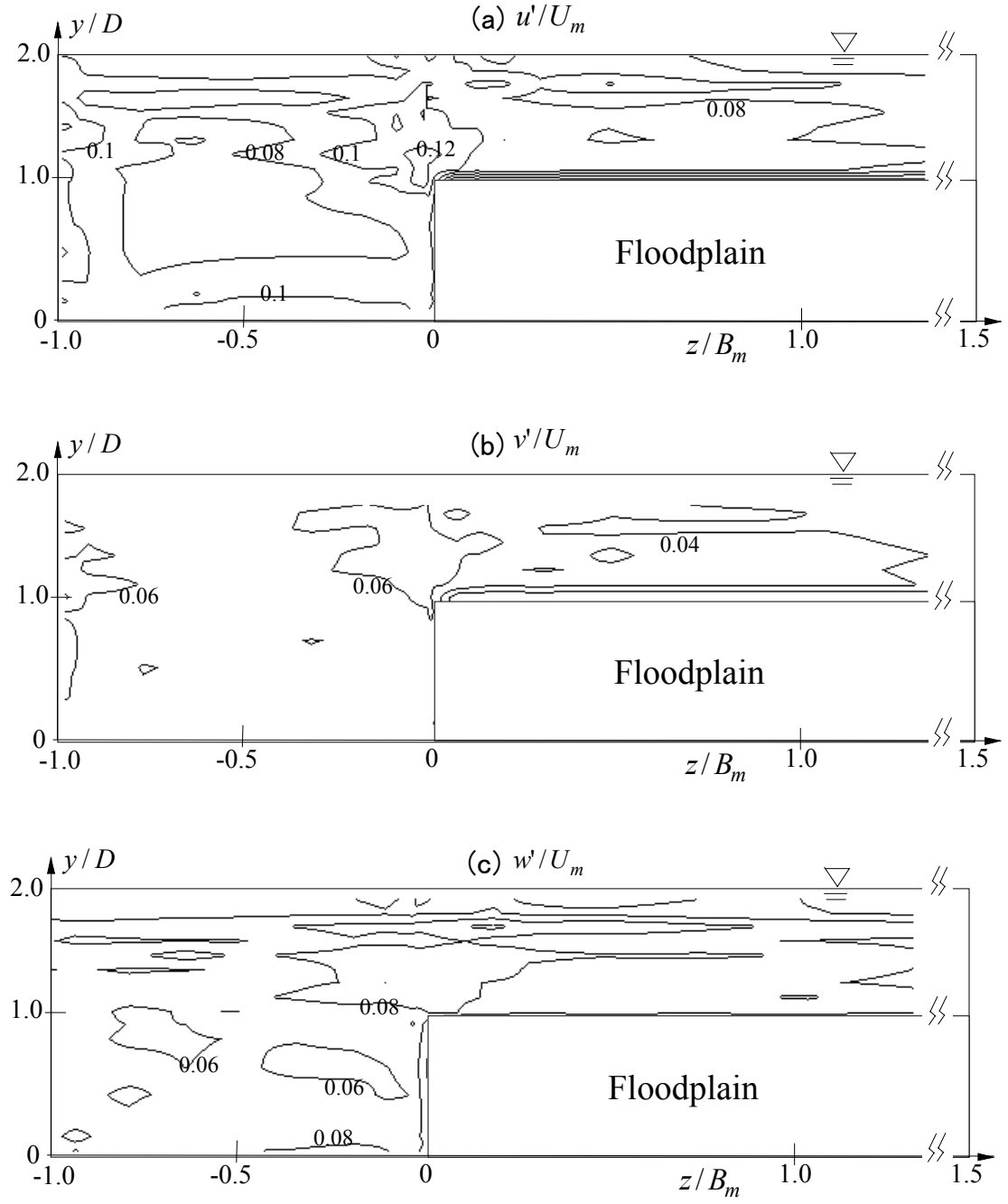


図-7 乱れ強度の横断面分布

本結果は斜昇流の傾きが瞬間的に増加($v>0, w>0$)およびおよび減少($v<0, w<0$)することを意味している．一般的に斜昇流は時間平均されたものを対象に特性評価されるが，乱流輸送や拡散を考える上では瞬間構造を知る必要がある．本研究の結果をさらに追究すれば，発生の周期特性や乱流輸送への寄与特性の解明につながるかもしれない．

3.4 乱れ強度

図-7 に乱れ強度 u'，v'，w'の横断面コンター図を示す．3 成分の分布には共通した分布特性がみられる．まず境界部で大きな分布がみられる．特に境界から低水路・高水敷の双方へ大きな乱れ強度の分布が広がる．境界部では横断方向の主流速勾配$\partial U/\partial z$ が卓越するとともにせん断不安定性によって$-\overline{uw}$ が増加する．これらの効果により乱れが生成される．さらに鉛直方向にも主流速勾配が現れてこれと関連する乱れも生成される．**図-5** の 2 次流分布でみたように斜昇流や2 次流セルによって，境界部で生成された乱れは横断方向に輸送される．境界部における 3 成分の大きさを比較すると$u'>w'>v'$ であり，壁面乱流のそれに

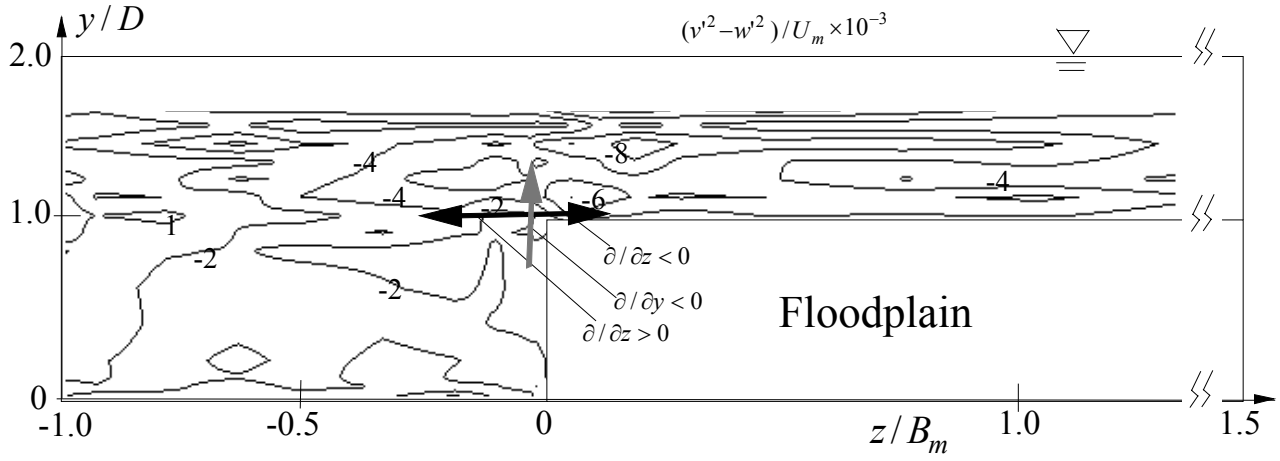


図-8　$v'^2 - w'^2$ の横断面分布

表-2　３重相関の符号パターン

分類No.	u	w	v
1	＜0	＜0	≧0
2	＜0	＜0	＜0
3	≧0	≧0	≧0
4	≧0	≧0	＜0
5	＜0	≧0	≧0
6	＜0	≧0	＜0
7	≧0	＜0	≧0
8	≧0	＜0	＜0

一致する．自由水面や底面による鉛直乱れの抑制効果が複断面流れにおいても存在することがわかる．

また側壁($z / B_m = -1$)や低水路や高水敷の底面でも大きな乱れ強度が発生するが，これは壁面摩擦による流速シアーに起因するものである．

3.5　渦度方程式による２次流生成の考察

前節までに大型水路の複断面開水路流れにおいても，2次流が主流速分布や乱れ構造に大きな影響を与えることが確認できた．この生成機構は渦度方程式によって理解できる．定常等流場の渦度方程式は次のよう表せる．

$$V\frac{\partial \Omega}{\partial y}+W\frac{\partial \Omega}{\partial z}=\frac{\partial^2}{\partial y\partial z}\left(v'^2-w'^2\right)+\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2}-\frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)\overline{vw}+\upsilon\nabla^2\Omega \tag{8}$$

Ω は縦渦に対応する x 方向の渦度，左辺は移流項，右辺第1項は発生項，第2項は抑制項および第3項は粘性項である．第1項より乱れの鉛直および横断方向成分の差，すなわち乱れの非等方性が 2 次流生成と大きく関係することがわかる．**図-8** に $v'^2 - w'^2$ の無次元コンターを示す．値の変化は底面ほど大きく．鉛直方向に比べて横断方向の変化は小さい．発生項はこの分布の y および z 方向の微分値であるから，分布の変化が大きい境界部や低水路底面のコーナー部で渦度の発生が大きいことが予想される．この位置関係は複断面開水路流れの２次流セル構造に一致している．また，境界部をはさんで低水路側と高水敷側の $\partial^2 / \partial y \partial z$ 値は生成される２次流セルの回転方向にも対応する．

3.6　水平渦と斜昇流の関係に関する考察

低水路と高水敷境界領域では，横断面の斜昇流に代表される2次流と鉛直軸をもつ水平渦が混在し，流れは複雑な3次元構造を有する．既往研究のほとんどがこれらを独立に扱い，その相互作用や関係特性についての解明は進んでいない．これは標準的な LDA や PIV では流速3成分の同時計測が困難なためである．ADV ではこれが可能であり本節では流速偏差の 3 成分の符号パターンを調べることで水平渦と 2 次流の関係を考察する．流速偏差 u, v, w の正負の組み合わせは**表-2** に示すように計 8 つ存在する．ここでは鉛直流速と水平渦の関係に注目する．**図-9** は低水路の境界近傍の横断位置 $z / B_m = -0.075$ における高さの異なる 3 点($y / D = 0.5, 1.1, 1.5$)の符号パターンの確率ヒストグラムを示す．ここである程度大きな鉛直流速を対象とするために，鉛直流速の絶対値が 2.5cm/s 以上の信号のみを抽出し，その母集団に対する確率 Pr を示している．鉛直流速の閾値は横断面内における鉛直流速の最大絶対値の半値である．$y / D = 0.5$ および 1.5 においてはパターン間の確率差異は小さいが，高水敷高さ付近の $y / D = 1.1$ ではパターン2と3が卓越する．2 と 3 はいずれも横断レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ が負となり，水平渦の通過タイミング

に対応する．u およびw の符号からパターン 2 は水平渦の下流側，パターン 3 は上流側の領域を意味する．すなわち図-10 に示すように水平渦の上流側が通過するタイミングに斜昇流の上昇度合いが瞬間的に小さくなり，下流側が通過する際に大きくなることを意味している．

4．おわりに

本研究では，大型水路を用いた複断面開水路流れを対象に ADV 計測を行い 3 次元の乱流構造を調べた．その結果，次の結論を得た．

(1) ウェーブレット解析を用いた ADV のノイズ除去法を適用した．これにより高周波数における-5/3 乗則からのずれをうまく修正できた．

(2) 主流速分布，2 次流構造および乱れ統計量は既往の LDA 計測の結果と定性的に一致した．このことから水路幅 40cm と本水路幅 150cm の間にはスケール相似則が成立するものと思われる．しかしながら定量的な比較は不十分であり今後の課題とする．

(3) 渦度方程式の発生項の分布から，境界部付近で観察される 2 種類の 2 次流セルの発生を説明した．すなわち境界部から低水路に向かう斜昇流と関連するセルと高水敷側に形成されるセルの生成と渦度発生項は対応する．

(4) ADV の 3 成分同時計測の長所を最大限にいかして，偏差の 3 成分の符号パターン分布を求めた．これより境界部の高水敷高さ近傍では水平渦の通過によって 2

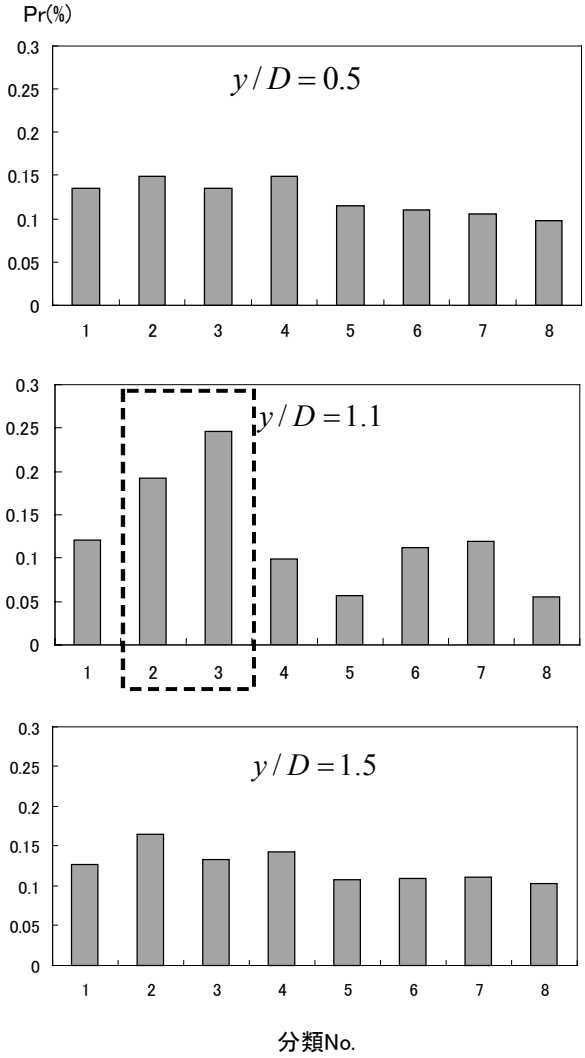


図-9　３重相関のパターン別ヒストグラム

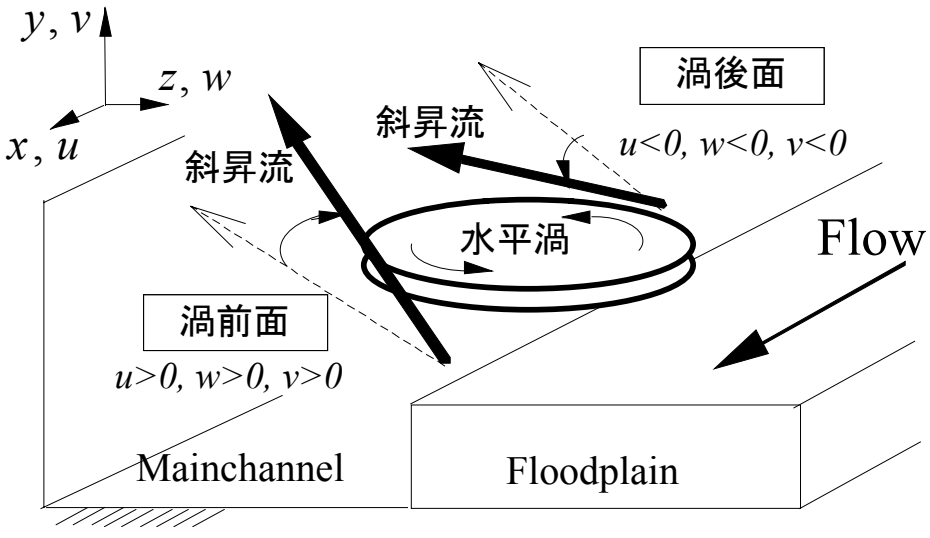


図-10　水平渦と斜昇流の瞬間構造の模式図

次流に大きな影響を与えることがわかった.

謝辞　本研究を遂行するにあたり関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団の研究助成を受けた. ここに謝意を表する.

参考文献

1) Tominaga, A. and Nezu, I.: Turbulent structure in compound open channel flows. *J. Hydraulic Eng*. Vol.117, pp. 21-41, 1991.
2) Nezu, I. and Nakayama, T.: Space-time correlation structures of horizontal coherent vortices in compound open channel flows by using particle-tracking velocimetry. *J. Hydraulic Res*., Vol.35, pp. 191-208, 1997.
3) 池田駿介, 空閑健 : 直線複断面開水路流れに発達する大規模水平渦列の安定性と運動量輸送に関する実験的研究. 土木学会論文集, No.558/-38, pp.92-102,1997.
4) Bousmar, D. and Zech,Y.: Periodical turbulent structures in compound channels. *Proc. of River flow 2002*, Belgium, Vol.1, pp.177-185, 2002.
5) Bousmar, D. and Zech, Y.: Large-scale coherent structures in compound channels, *Proc. of international symposium of shallow flow*, *Delft*, pp.173-180, 2003.
6) Nadaoka, K., Yagi, H.: Sallow-water turbulence modeling and horizontal large-eddy computation of river flow. *J. Hydraulic Eng*. Vol.124, pp. 493-500, 1998.
7) Garcia, C.M., Cantero, M.I., Nino, Y., Garcia, M.H.: Turbulence measurements using acoustic Doppler velocimeters. *J. Hydraulic Eng*. Vol.131, pp. 1062-1073, 2005.
8) Nikora, V. I. and Goring, D. G.: ADV measurements of turbulence: Can we improve their interpretation? *J. Hydraulic Eng.,* Vol. 124, pp. 630-634, 1998.
9) Hurther, D. and Lemmin, U.: A Correction method for turbulence measurements with a 3-D acoustic Doppler velocity profiler. *J. Atoms. Ocean. Technol.,* Vol.18, pp.446-458, 2001.
10) Voulgaris, G. and Trowbridge, J.H.: Evaluation of the acoustic Doppler velocimeter (ADV) for turbulence measurements. *J. Atom. Ocean. Technol.,* Vol.15, pp.272-289, 1998.
11) Donoho, D. L.: De-noising by sot-thresholding, *IEEE Trans. Information theory*, Vol.41, pp.613-627. 1995.
12) 中野宏毅, 山本鎭男, 吉田靖夫 : ウェーブレットによる信号処理, 共立出版, 1999.

(2009 年 4 月 9 日　受付)