

複断面河道に設けられたわんど周辺の 3 次元流れ構造

Three-dimensional flow structure around embayment in compound open channel

鄭 載勲*・富永 晃宏**

Jaehun JONG and Akihiro TOMINAGA

*学生会員 名古屋工業大学大学院博士後期課程 社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

**正会員 工博 名古屋工業大学教授 社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

The flow structures around embayment of submerged condition are very complicated depending on the compound open channel flows and cavity flow. Because it has several interfaces around embayment, the complex vertical structures are formed in the embayment installed in a flood-plain. In order to investigate the flow structures around embayment in compound open channel, we performed experimental study by using Particle Image velocimetry (PIV) and numerical computations were performed by $k-\epsilon$ turbulence model. Velocities were measured in a compound open channel with setting embayment of different hydraulic condition on the flood plain. In addition, the secondary flow structures were clarified by synthesizing the velocity components in horizontal and vertical planes. The embayment on the floodplain deflected the main flow and produced 3-D flow structures around the embayment.

Key Words : *embayment, $k-\epsilon$ turbulence model, secondary flow, 3-D flow structure, PIV*

1. 序論

多様性豊かな河川生態系を保全するための水域の一つであるわんどは、その生態学的な役割の維持のために解決すべきさまざまな水理的問題を抱えている。まず、平水時の流れにおいてはわんど内の水質悪化を抑制しながら魚類の繁殖や稚魚の生殖空間を確保することが重要である。また、出水時にわんど周辺の局所洗掘や堆積する土砂量を最小限にすることによりわんどの安定性を保つことが課題として挙げられる。高水時には掃流砂とともに浮遊砂の輸送が活発であり、低水路と高水敷上を流れる浮遊砂のわんど内への堆積が予想される。このようなわんど内での土砂堆積は植生の侵入を促進させ、最終的にはわんどそのものが埋没される危険性もある。これらの問題を解決するためにはわんど周辺の流れ構造を把握するとともに土砂堆積機構を明らかにする必要がある。

一般にわんどは高水敷を有する複断面河道の高水敷を掘り込むように設置されたものが多いため、大規模出水時に低水路流れと高水敷上の流れによりわんど周辺は複雑な流れが形成される。高水時にわんど周辺に生じる流れの特徴はわんどの上下流部にそれぞれ段落ち、段上がりによる特有な循環流が形成される。また、低水路からわんど内部へ入り込む流れによりわんど域内では大規模渦が形成される。このような流れは水理学的にも特徴の

ある流れ場であり、わんど流れとして様々な研究が行われている。木村¹⁾らは開水路死水域内の流れに対し二次元の数値解析を行い、低水時のせん断不安定に起因する渦とセイシュとの共鳴現象などを再現している。楠津²⁾らはわんどのアスペクト比を変化させ、わんど内の乱流特性と組織渦との関係を求めている。Jalil³⁾らは、開水路キャビティー内の流れを水深が高水敷より小さい場合と大きい場合とに分けてそれぞれ流れの可視化、流速測定を行い、低水時にはキャビティー内の流れはほぼ二次元的で循環流が生じること、また高水時には鉛直方向の循環流が生じる複雑な流れであることを示している。

一方、出水時にわんど周辺の現地観測データを得ることは困難であるため、実験により流れの特性を把握する試みが行われているが、2 次元的な解析が多く見られる^{4),5),6)}。複断面わんどにおける流れ場の解析や諸現象を理解するためには流れの 3 次元数値解析が有用であると考えられる。

そこで本研究では、高水敷わんど周辺の流れ構造が複雑かつ土砂輸送が顕著である高水時を対象とし、流量と水深を変化させ、わんど周辺の流れ構造を実験的に明らかにした。流れ構造については PIV 法を用いてわんど周辺の流速を詳細に計測し、その 3 次元的流れ構造について検討した。また、流れの 3 次元数値計算を行い、その流れ場における 3 次元的流れ構造の再現を試みた。

2. 実験方法および実験条件

実験水路は、長さ8m、幅30cm、勾配1/1000の長方形勾配可変型水路を用いた。水路左岸に幅20cmの塩ビ板を設置し高さ4cmの高水敷を作り、水路の中間部、上流端から5.0mのところに高水敷を掘り込むようにわんど区間を設けた。わんどモデルは開口部長さ15cm、奥行き10cmの長方形わんどである。実験水路におけるわんどの配置は図-1に示す通りであり、実験条件を表-1に示す。水深 $H=6.5\text{cm}$ 、 $H=7.5\text{cm}$ 、 $H=8.5\text{cm}$ に対しそれぞれの流量を $Q=1.7\text{l/s}$ 、 $Q=2.5\text{l/s}$ 、 $Q=3.7\text{l/s}$ とした。これは実河川で見られる大規模出水時の増水過程を想定した水理条件である。座標系としては、流下方向に x 軸を、横断方向に y 軸を、 x 軸と垂直上向きを z 軸とした。流れの可視化には、比重1.02、粒径80micronのナイロン樹脂粒子をトレーサとして用い、厚さ約3mmのシート状にした500mWアルゴンレーザー光(Ion Laser Technology)を開水路鉛直縦断面(x - z 平面)と水平断面(x - y 平面)に照射した。レーザーシートの鉛直縦断面の照射位置は全てのケースで29断面(左岸側壁から $y=1\sim 29\text{cm}$ までの1cm間隔)、水平断面の照射位置は低水路水深6.5cmの場合に12断面(河床から $z=0.5\sim 6\text{cm}$ までの0.5m間隔)を、低水路水深7.5cmの場合には14断面(河床から $z=0.5\sim 7\text{cm}$ までの0.5m間隔)を、低水路水深8.5cmの場合には16断面(河床から $z=0.5\sim 8\text{cm}$ までの5cm)を設定した。これは鉛直断面と水平断面を合成することによってその流れ場における3次元流れ構造を捉えるためである。

この可視化画像は高速 CCD カメラを用いて1秒間200フレームで撮影され、パソコン側のキャプチャーボードにより、ハードディスクに 640×480 画素の BMP ファイルとして記録された。画像計測には VISIFLOW (AEA Technology) PIV システムを用い、相互相関法により画像解析した。相関法では検査エリアを 32×32 画素、オーバーラップは75%とし、一画素の実長が 0.54687mm/pixel の画像をパソコンのメモリ容量範囲内の連続撮影可能な計3200枚、約16秒間平均値の流速ベクトルデータを得た後、統計処理した。

3. わんど流れの3次元数値計算

本研究では高水時のわんど周辺に生じる3次元性の強い流れ構造を予測するため、3次元数値計算を試みた。3次元乱流の数値計算には様々な計算手法があるが、ここでは低コストで比較的簡単な標準型 k - ε モデルを採用し、その流れ場における数値計算手法の妥当性について実験結果と比較したものである。計算条件は実験条件と同じ水理条件で行った。基礎式として以下のレイノルズ方程式を用いる。

表-1 実験条件

CASE	HW6	HW7	HW8
$Q(\text{cm}^3/\text{s})$	1685	2504	3711
$H(\text{cm})$	6.5	7.5	8.5
$h(\text{cm})$	2.5	3.5	4.5
$U_m(\text{cm/s})$	25.92	33.39	43.66
$U_f(\text{cm/s})$	14.65	17.27	21.21
I	1/1000		

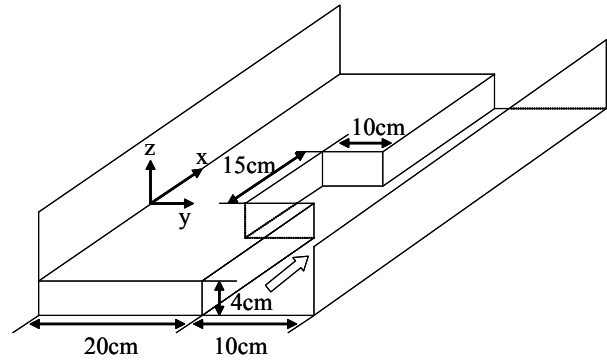


図-1 実験水路

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right\} \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

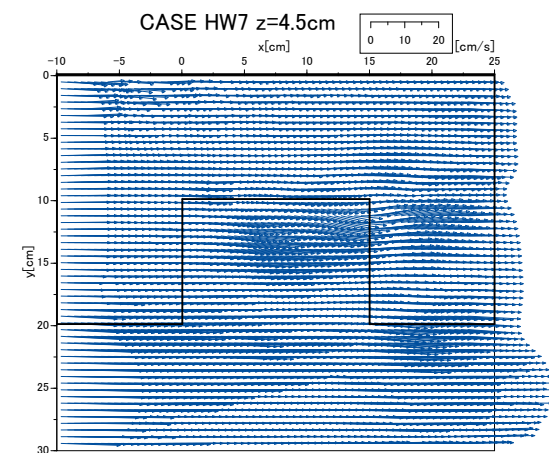
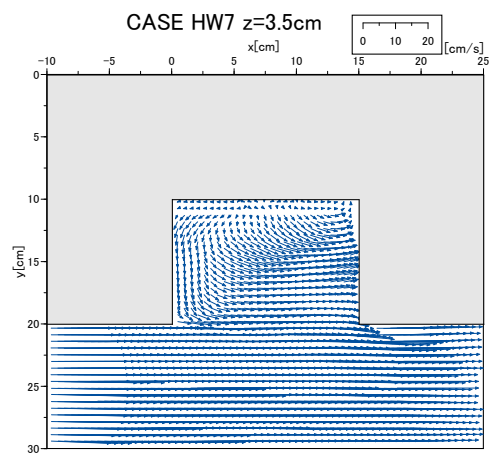
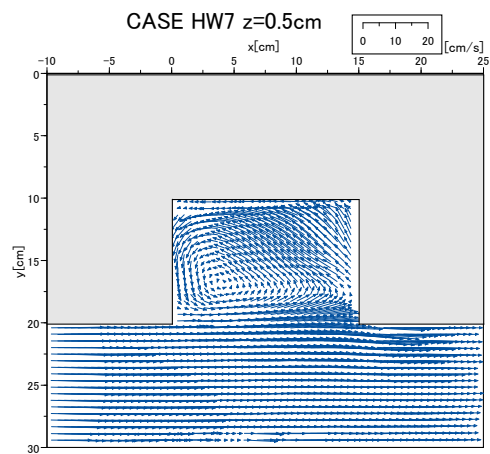
$$\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

ここに、 U_i は平均流速、 p は圧力、 ρ は水の密度である。乱流モデルには標準 k - ε モデルを用い、渦動粘性係数 ν_t 、乱れエネルギー k 、散逸率 ε に関しては以下のモデル化された式を用いた。

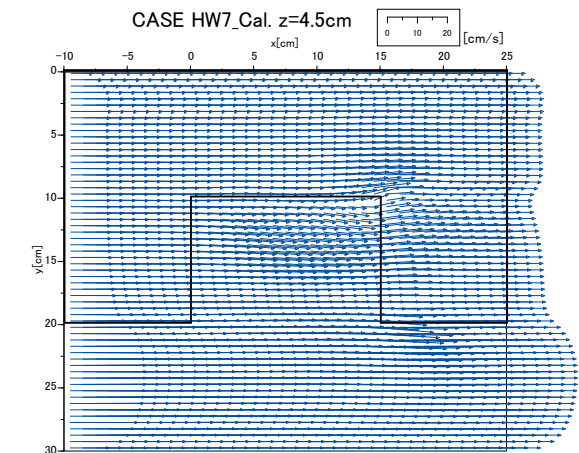
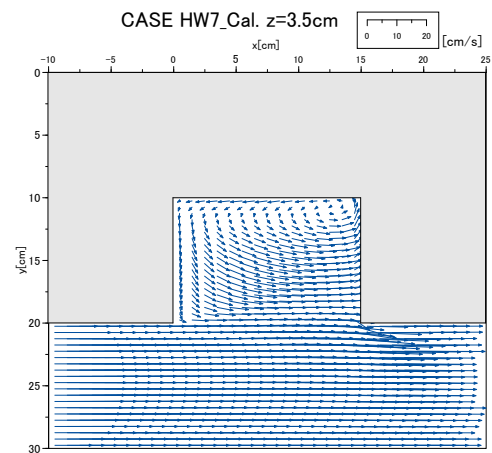
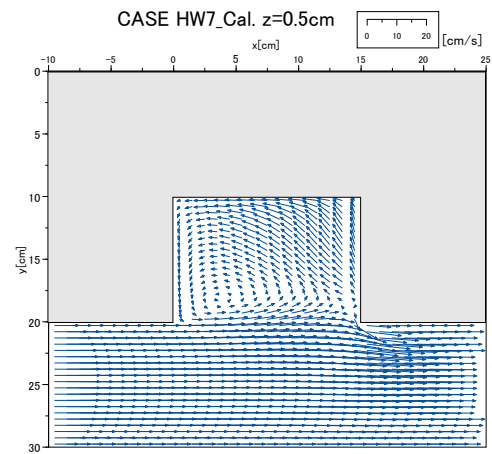
$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k U_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P_k - \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon U_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \quad (6)$$



(a) PIV結果



(b) 数値計算結果

図-2 水平断面時間平均流速ベクトルの例

$$P_k = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

モデル定数には $C_\mu=0.09$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\epsilon=1.3$, $C_{\epsilon 1}=1.44$, $C_{\epsilon 2}=1.92$ を用いた。壁面の境界条件としては、対数則が成立するものとして乱流エネルギー k を用いて与える。水面における境界条件は、水深固定で対称条件を与えた。入口での境界条件は、流量 Q を与え、 U を流量が一致するように対数則分布で与え $V=0$, $W=0$ とした。これを有界体積法で離散化し、圧力解法には SIMPLE 法用い、移

流拡散の解析にハイブリット法を用いた。計算格子は x 方向 161, y 方向 61, z 方向はケース HW6, HW7, HW8 それぞれ 32, 38, 43 とした。複断面河道の高水敷およびわんどの形状は流れのない遮蔽ブロックを設置することで形成されている。

4. 実験および数値計算結果

4. 1 水平断面平均流速ベクトル

PIV 実験および数値計算から得られた水平断面の平均流速ベクトルを図-2に示す。すべてのケース HW6,

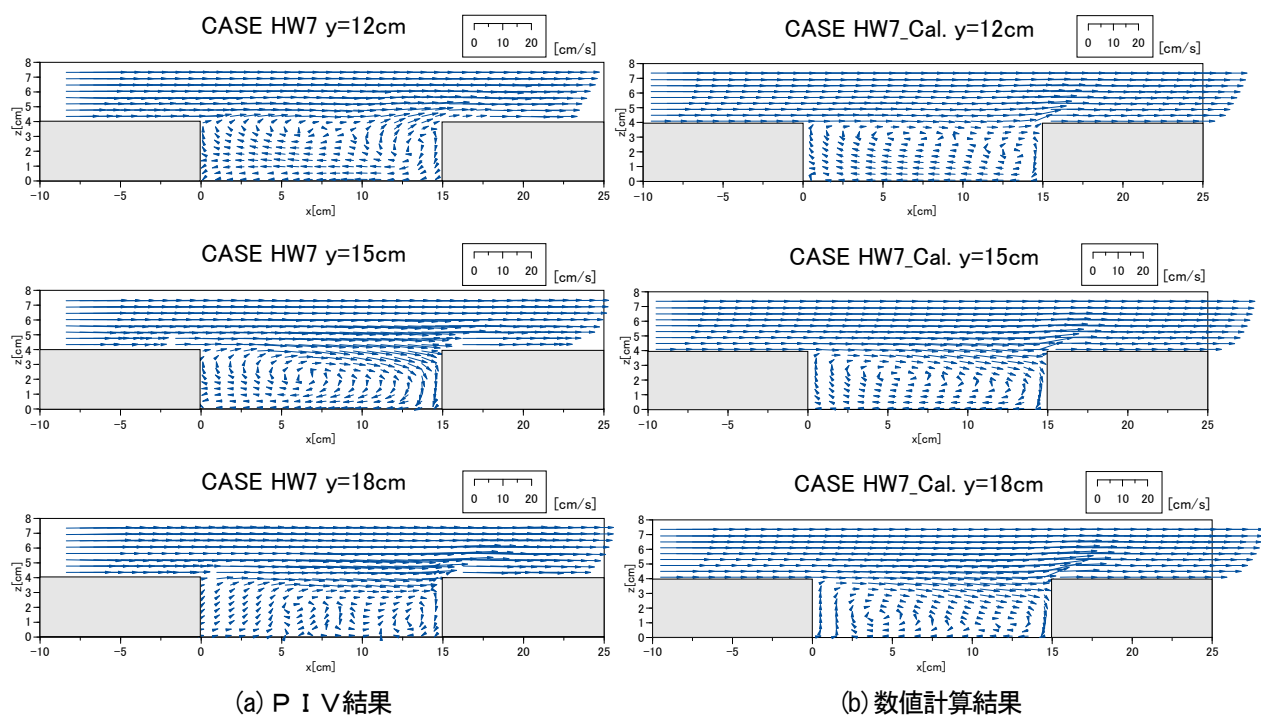


図-3 縦断面時間平均流速ベクトルの例

HW7, HW8 で同じパターンのベクトル分布が見られたため、その代表的なケースとしてケース HW7 の例を挙げて説明する。まず、(a)実験結果に着目すると、水路底面付近である $z=0.5\text{cm}$ の断面では、わんど開口部下流端の主流部との境界面でわんど内に入り込む流れが見られ、わんど内部上流側で中心を持つ大規模な循環渦が発生している。一方、 $z=3.5\text{cm}$ の断面ではわんど域内の広い範囲で流下方向に向かう流れが形成されていることが観察できる。高水敷高さより 0.5cm 上である $z=4.5\text{cm}$ のベクトル図では、わんど奥部の側壁とわんど下流側の壁との境界部($x=15\text{cm}$, $y=10\text{cm}$)で流向が二つに分かれて、左岸側に向かう流れと主流部へ向かう流れが形成されている。この流れにより高水敷とわんど奥部の側壁との境界部($y=10\text{cm}$)の下流側に低速域が存在することが流速分布から確認できる。また、(b)数値計算結果から得られたベクトル図でも循環渦の形成位置、流向のパターン、境界部での流速分布が実験結果とほぼ一致していることが分かる。このような平均流速ベクトルの水深方向の変化は高水時における複断面わんど流れの特徴であり、平水時に見られる一様な平面的渦構造とは異なる点である。これは高水敷上の流れと低水路の流れの相互作用で現れる3次元的な流れに起因すると考えられる。

4. 2 縦断面平均流速ベクトル

高水時にはわんど上流部の段落ち流れと下流部の段上がり流れにより、わんど内には特有な渦構造が形成される。図-3にケース HW7 の縦断面平均流速ベクトルを示す。ここでは、わんど奥部の側壁付近の断面を $y=12\text{cm}$ 、わんど中央部の断面を $y=15\text{cm}$ 、わんど開口部付近の断

面を $y=18\text{cm}$ とし、考察を行う。

まず、実験結果の $y=12\text{cm}$ の断面の場合は、わんど下流端の壁付近で横断方向に軸を持つ渦が確認できるが、それ以外の領域では逆流が形成されている。これは、水平断面で見られた大規模な循環渦の影響でわんど奥部の壁に沿った形で流れが逆流していると考えられる。

一方、断面 $y=15\text{cm}$ では、段落ち部から発生した剥離渦の再付着により、わんど全域にかけて循環渦が確認できる。しかし、主流部とわんどとの境界部付近である $y=18\text{cm}$ では段上がり部の前方で小規模な鉛直渦が見られるものの、 $x=5\text{cm}\sim x=10\text{cm}$ の範囲では複雑なベクトルを示しており、境界部では3次元的な流れの存在が示唆される。数値計算の結果から得られたベクトル図では、わんど域内で段落ち流れの特有な鉛直分布が認められるが、実験結果との比較では $y=18\text{cm}$ の断面において相違点が見られる。しかし、全体として断面ごとの渦の形成位置や渦のスケールが実験結果と数値計算結果の比較で一致している部分が多く、その再現性は良好であると考えられる。

4. 3 平均主流速横断分布

図-4にわんど内の流下方向中間部($x=8\text{cm}$)における各ケースの平均主流速横断分布を示す。ここで、 $y=10\text{cm}\sim y=20\text{cm}$ の範囲がわんど域であり、いずれのケースにおいてもわんど奥部の河床底面付近で逆流が確認できる。また、わんど域内の $y=15\text{cm}$ の付近では正の値の等高線が下向きに凹んでいることが見てわかる。これは、図-3に示した $y=15\text{cm}$ の断面で見られる段落ち流れの再付着によりその位置で順流域が形成されたものであ

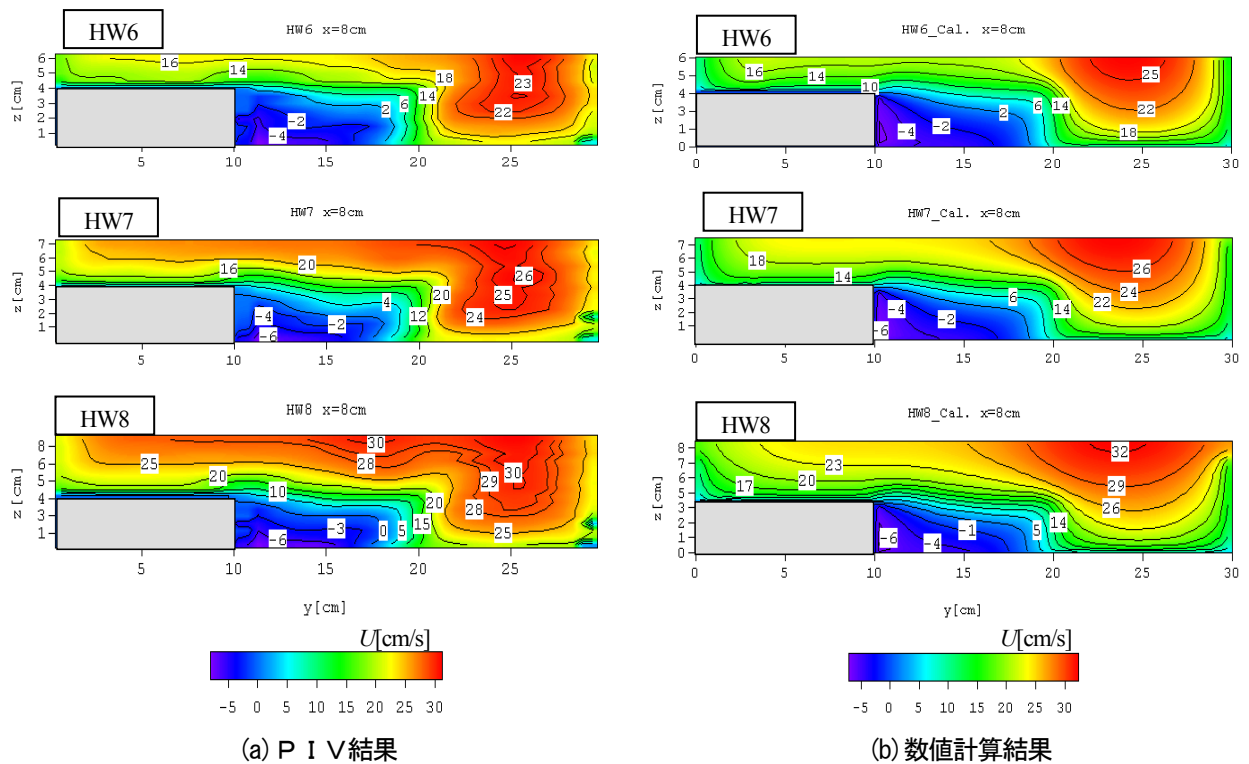


図-4 平均主流速横断分布コンター

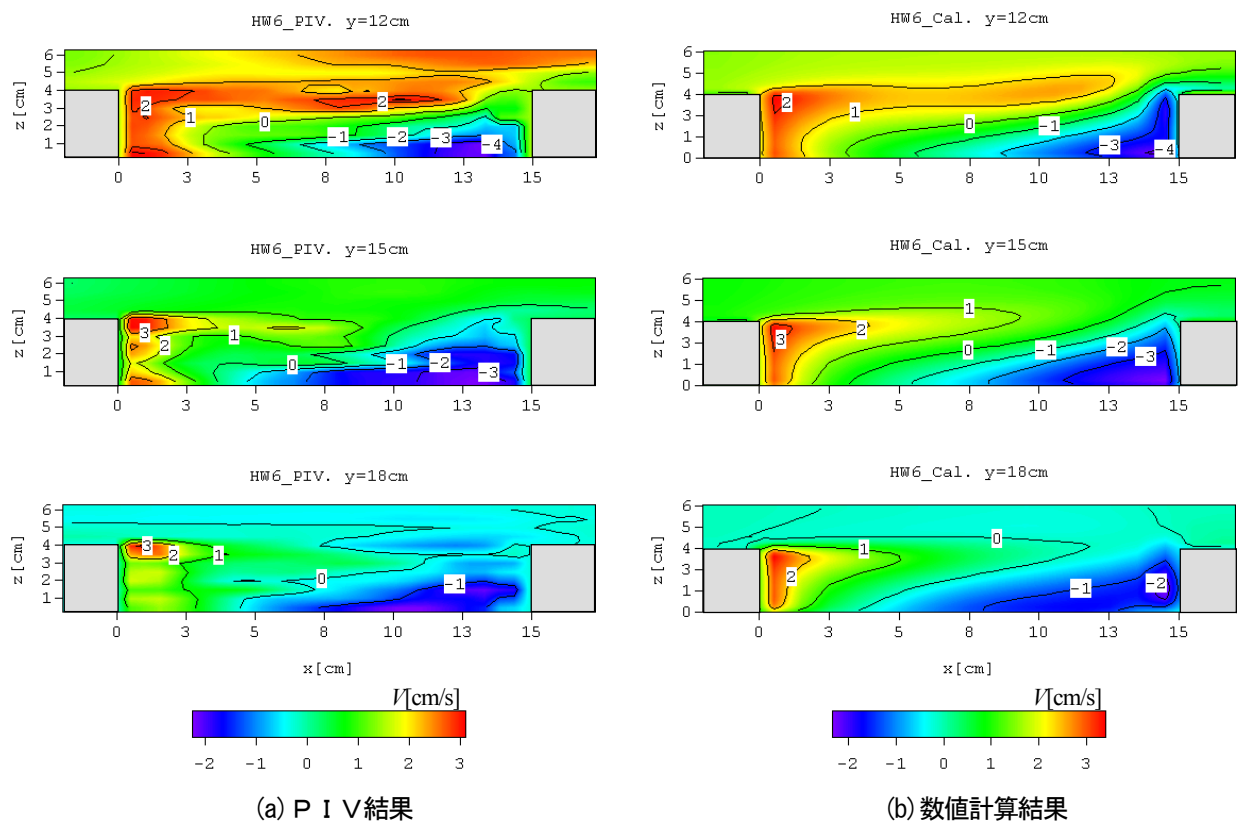


図-5 平均横断方向流速縦断分布コンター

と考えられる。また、わんど開口部・低水路の境界部ではわんど内に 2cm 程度入った所まで正の値が見られる。実験結果に着目すると、低水路の中央部に主流速の最大値が見られ、ケース HW8 ではわんど域の水面付近

でも最大値が存在している。また、わんど奥部の境界部で等高線が少し盛り上がり、図-2の $z=4.5\text{cm}$ の断面で示された流速分布のようにこの位置で主流速が低減化していることがわかる。

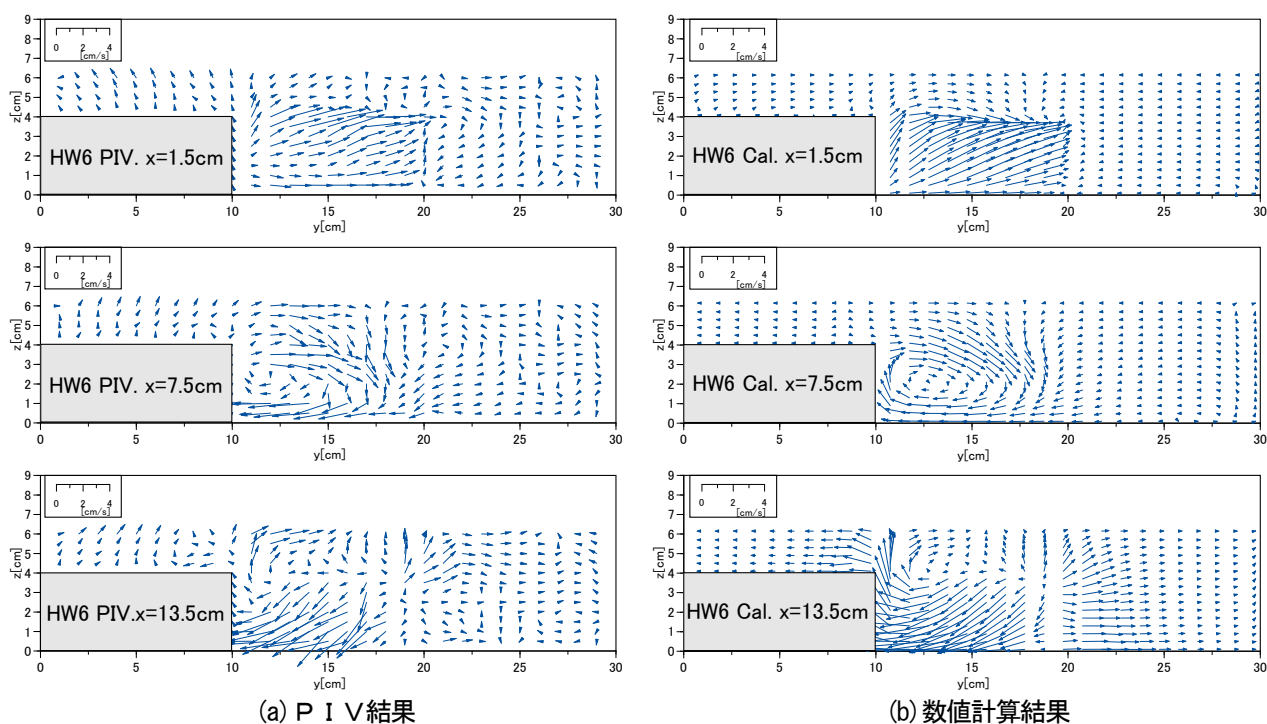


図-6 2次流ベクトル

さらに、わんど開口部と低水路との境界部で低水路に向かって主流速分布が張り出していることが確認できる。特に各ケースの流速分布を比較すると水深が一番大きいケース HW8 で張り出し大きくなっている。これは典型的な複断面流れにおいて境界部で生じる斜昇流によるものであり、その影響がわんど中間部まで維持されているものと思われる。計算結果の流速分布ではそれが見当たらないが、わんど域内の流速分布の傾向は実験結果とある程度一致している。

4. 4 平均横断方向流速縦断分布

平水時のわんど流れに関する研究では、わんど内で形成される大規模循環渦の平面的な2次元構造について検討したものが多く、数値計算においても水深平均された2次元計算が大半である。しかし、高水時のようなわんどを乗り越える流れが存在する場合は、わんど域上部と低水路との境界面が二つ存在することになり、その境界面での流れ構造は複雑であると推測される。ここでは、わんど開口部と低水路との境界部における3次元な流れ構造について検討する。

図-5は主流部からわんど内へ流出する流れの特性を捉えるため横断方向流速 V の縦断分布を示したものである。ここで、 $x=0\text{cm}$ の位置がわんど上流側壁付近であり、 $x=15\text{cm}$ がわんど下流側壁付近である。また、コンター図で示す負の値は低水路からわんど奥へ向かう流れを示しており、正の値は低水路へ向かう流れを意味する。いずれの断面においてもわんど下流側壁付近の底面で負の値のピークが、わんど上流側壁付近の高水敷高さ辺りで正の値のピークが確認できる。さらに、わんど域内

を斜めに切ったような形の境界に正と負の流速が分布しており、負の値は水路底面に沿った形で上流側に、正の値は高水敷高さと同じ高さで下流側に伸びている。

このことから、わんど域全体にかけて3次元な流れ構造が形成されていることが認められる。特に各断面の負の値の大きさに注目すると、わんど開口部からわんど奥部へ行くにつれ大きい値を示しており、わんど内へ入り込んだ流れがわんど奥部で加速化されているものと思われる。この流れの傾向によりわんど域内奥部で横断方向流速成分の強い乱れが現れると予測される。

4. 5 2次流ベクトル

PIV 実験ではわんど周辺の流れ場の水平断面と鉛直断面を細かく撮り、それらの各断面においての横断方向流速成分 V と鉛直方向流速成分 W を合成することによって2次流を再現することができた。図-6にケース HW6 の2次流ベクトルを示す。ここに示す流下方向座標 $x=1.5\text{cm}$ 、 $x=7.5\text{cm}$ 、 $x=13.5\text{cm}$ はそれぞれわんど上流側の段落ち部、わんど中間部、わんど下流側の段上がり部付近であり、わんど域は $y=10\sim y=20\text{cm}$ の範囲である。段落ち部である $x=1.5\text{cm}$ の断面ではわんど域に低水路へ向かう流れが存在しているが、低水路との境界部である $y=20\text{cm}$ の位置で主流部の流れの干渉によりベクトルの向きと大きさが変化していることが分かる。また、斜め上向きの低水路への流れが高水敷高さ付近で集中している。これはわんど上流側壁面に沿った形で上昇した流れが低水路流れや高水敷上の流れに合流したものであると考えられる。わんど中間部である $x=7.5\text{cm}$ の断面では流下方向に軸をもつ時計回りの渦が形成されており、数値計算の結果か

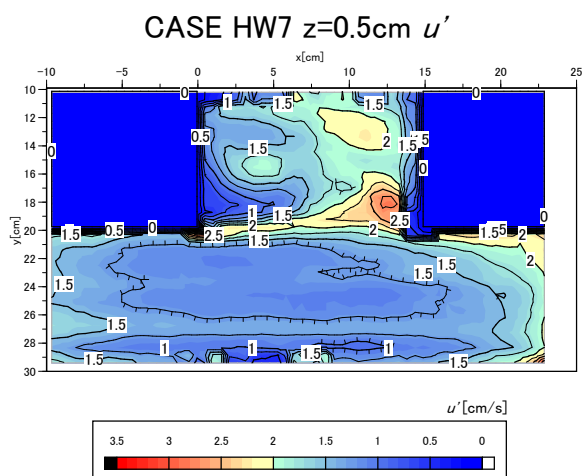


図-7 乱れ強度 u' (実験結果)

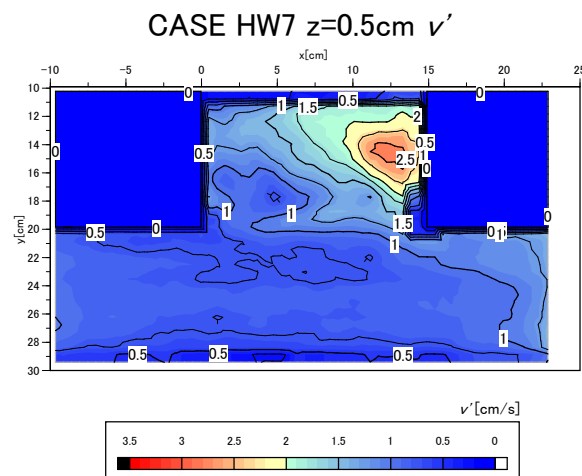
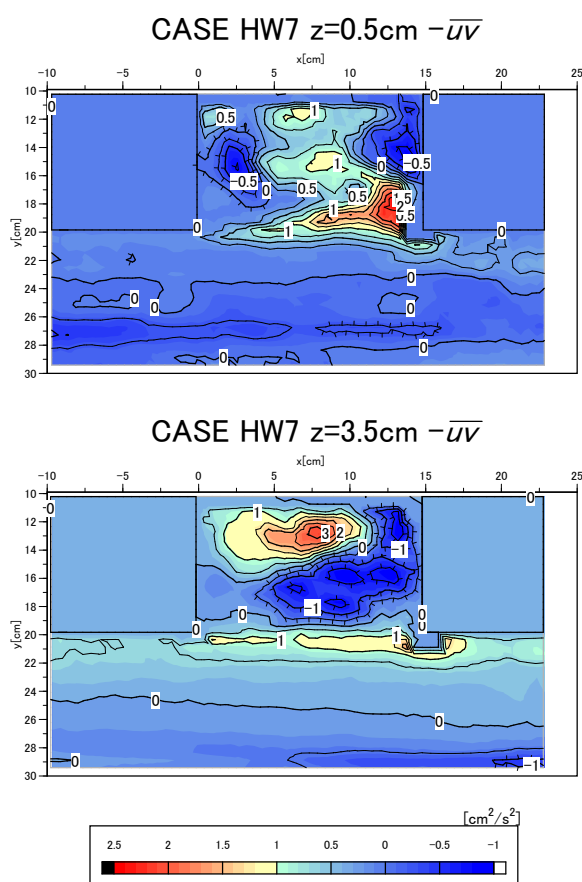
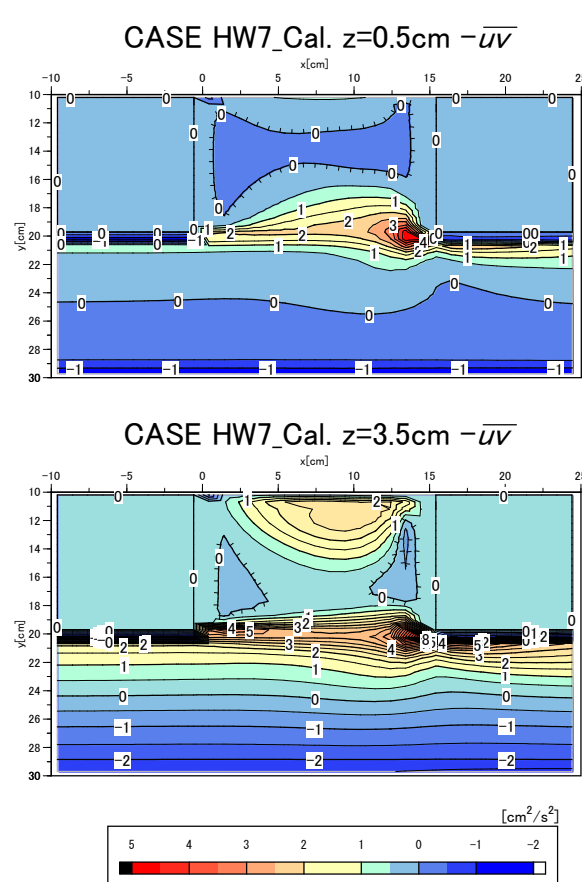


図-8 乱れ強度 v' (実験結果)



(a) P I V結果



(b) 数値計算結果

図-9 レイノルズ応力 $-\overline{uv}$

らもその傾向が確認できる。これは、高水時に高水敷を乗り越える流れが存在する場合、わんど域内では3次元性の強い流れが生じることを示しており、わんど域内における土砂輸送や土砂堆積機構を解明することに当たって重要な現象であると考えられる。

わんど下流端の段上がり部である $x=13.5\text{cm}$ ではわんど下流側の壁の影響により、低水路へ向かう流れとわんど奥へ向かう流れが分かれて形成され、わんど奥部では

局所洗掘発生の原因と考えられる底面向きの流れが見られる。また、計算結果では $y=10\text{cm}$ の領域で側壁に沿った形で大きく上昇する流れが見られ、実験結果でそのベクトルの大きさが小さくなっている。このようなベクトル分布はわんど下流側の上部で水面上昇を示唆しており、水面変動を考慮した数値計算ではVOF法⁷⁾などの使用が有効であると考えられるが、いずれの断面においてもわんど域の上層部に低水路へ向かう流れが存在しており、

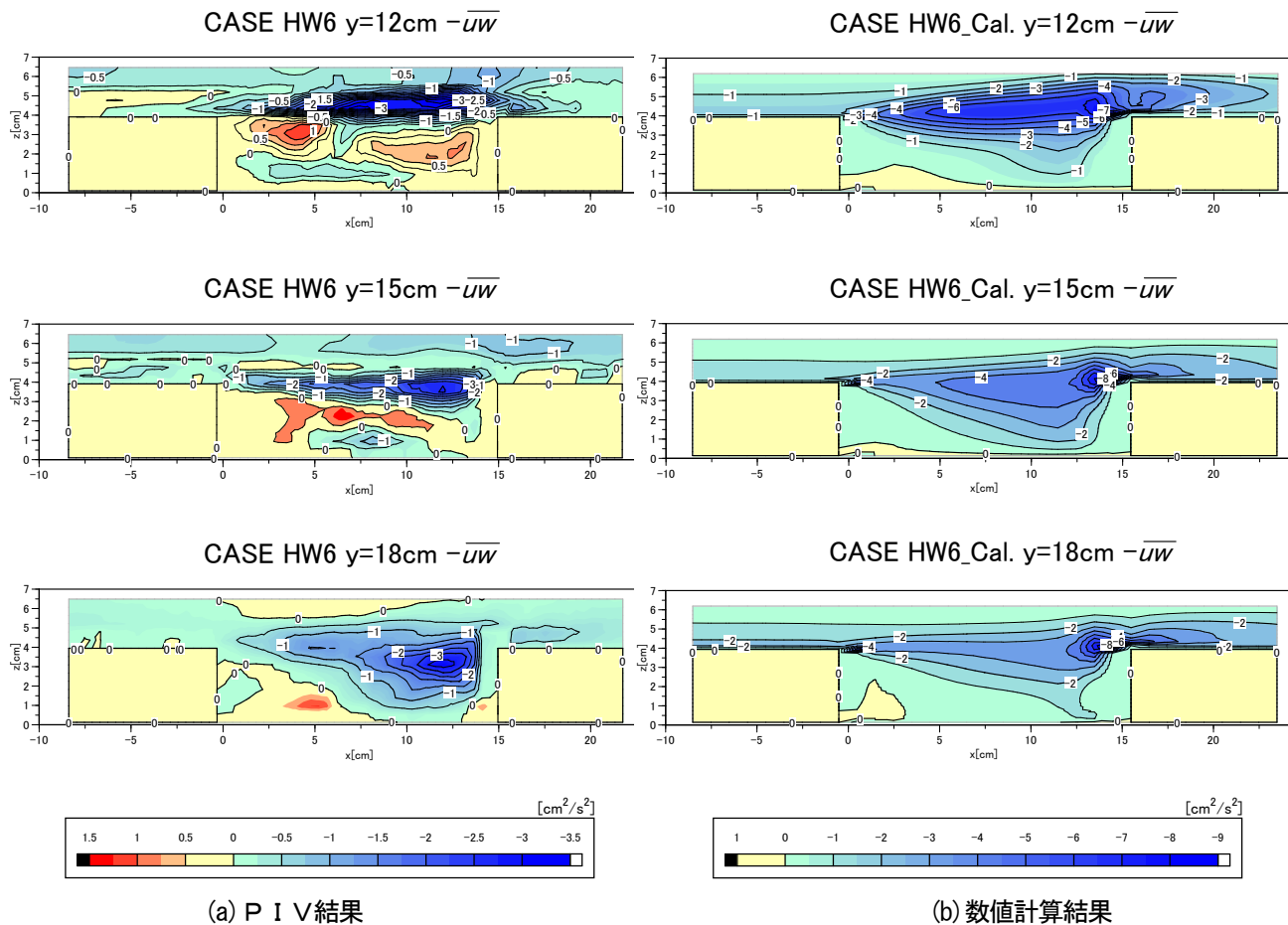


図-10 レイノルズ応力 $-\overline{uw}$

数値計算の結果でもその傾向は見られる。

ここで、実験結果と数値計算の結果との比較で見られる2次流の再現性の問題点となるのは、本計算で用いた標準型 $k-\varepsilon$ モデルでは第2種2次流が再現できないことである。乱れの非等方性に起因する第2種2次流は標準型 $k-\varepsilon$ モデルのような等方性の乱流モデルでは再現できない。したがって、複断面開水路流れの3次元流れ構造の計算では、非線形 $k-\varepsilon$ モデル⁸⁾やLESのような高次モデルの使用が必要である。しかし、図-6に示すようにわんど域内で形成される流れの傾向は実験結果と数値計算結果がよく一致しており、今回のような局所的に変化が激しい流れ場を持つわんど域内での流れ構造においてはよく再現できていると考えられる。

4. 6 乱れ強度分布

PIV 実験で得られた流下方向の流速変動成分に関する乱れ強度 u' を図-7に、横断方向流速変動成分の乱れ強度 v' を図-8に示す。これは、いずれのケースでも類似した傾向が見られたため、ケース HW7 の例を代表的に挙げたものである。図-7の乱れ強度 u' に着目すると、わんど開口部の境界部の下流域で最大値が発生していることがわかる。この領域で乱れが活発に発達していると考えられるが、わんど内奥部でも比較的弱い乱れが確認

される。これは高水時の流れによってわんど境界部だけでなく、わんど域内でも流下方向流速の乱れが存在していると考えられる。図-8の横断方向の流速変動成分の乱れ強度 v' では u' とは異なる傾向を示している。乱れ強度の最大値がわんど下流域の広い範囲で現れ、他の流域ではそれが見当たらない。従来の研究では、平水時にわんど開口部の境界面で乱れ強度 v' の最大値がよく見られているが、今回の実験結果では違う傾向を示している。これはわんど周辺、特に境界面での流れ構造が3次的に変動していることが原因であると考えられる。

4. 7 レイノルズ応力分布

図-9にレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の水平断面の分布の実験結果と数値計算結果を示す。まず、実験結果の底面付近である $z=0.5\text{cm}$ では最大値がわんど下流側の境界部に存在し、さらにわんど域内中央部でも比較的小さい値が存在する。また、段上がり部と段落ち部で負の値を示している。この底面でのレイノルズ分布は $z=3.5\text{cm}$ の断面で大きく変化し、最大値がわんど奥部に移動していることがわかる。底面近傍の断面では境界部付近で運動量輸送が活発に行われ、高水敷高さより 0.5cm 低い断面ではわんど奥部に運動量輸送が活発である領域が形成される。これは平水時のわんど境界部で見られる乱流構造とは異

なり、わんどを越流するような条件の実際の河川において、わんど底面付近で生じる掃流砂の移動や高水敷を乗り越えて移動する浮遊砂の挙動を解明するための重要な現象の一つであると考えられる。計算結果は実験結果と相違が見られるものの底面近傍($z=0.5\text{cm}$)で境界付近の値が大きく、高水敷高さ近傍($z=3.5\text{cm}$)ではわんど奥部に正の値を示す領域が見られており、この特性は実験の傾向を再現している。また、図-2の水平断面平均流速ベクトルで見られた水深方向に変化する流れの特性がここでも同じ傾向で現れており、このようなわんど周辺の流れは3次元性が強い流れ構造を形成していると言える。

図-10にレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の鉛直断面の分布を示す。実験結果では、わんど奥部付近である断面 $y=12\text{cm}$ に負の値のピークが高水敷高さでわんど上部に広く範囲している。わんど中間部である $y=15\text{cm}$ の断面では、負の値のピークがわんど下流側に存在し、負の値の領域が高水敷高さより低い位置に形成されている。一方、わんど開口部と低水路境界面の付近である $y=18\text{cm}$ の断面では負の値の分布がわんど上部から底面まで見られる。わんど奥部では負の値の分布がわんど上部の細い範囲に位置していたが、それがわんど開口部に行くにしたがってわんど内に移動してその範囲も広がっている。数値計算結果でも実験結果と同様に、高水敷高さ付近を境界とした広い範囲で負の値が存在しており、段上がり部である $x=15\text{cm}$ の高水敷の頂部端で値のピークが見られる。

5. 結論

本研究では、PIV実験および3次元数値計算を行い、高水時における複断面わんど周辺の3次元流れ構造について検討した。また、PIV実験で得られた結果と数値計算で得られた結果を比較することでその再現性について検討した。

高水時には高水敷を乗り越える流れによりわんど周辺には二つの境界面が存在し、その境界面からの流水の出入りによってわんど域内には複雑な3次元流れ構造が見られた。特に、横断方向流速の縦断面分布ではわんど開口部の下流側底面に主流からの流れが入り込み、上流側にわんど内部から主流部向きの流れ分布が示された。

さらに、わんどの形状により、高水時にはわんどの上下流部にそれぞれ段落ち、段上がりによる特有な循環流が形成されることがわかった。数値計算の結果と実験結果との比較ではある程度良好な再現性が見られたが、今回の研究で用いた乱流モデルでは第2種2次流の再現ができなかった。標準型 $k-\varepsilon$ モデルのような等方性の乱流モデルは乱流の非線形に起因する2次流特性を再現することはできない。しかし、高水時のわんど内の流れのように変化が激しい流れ場においてはその3次元的な流れ構造の傾向を定性的に再現できることがわかった。

今後、より精度の高い乱流モデルについて知見を広め、いろいろな水理条件やケースについても検討していきたい。

参考文献

- 1) 木村一郎, 細田尚, 友近文志: 死水域を伴う開水路流れの非定常振動特性, 水工学論文集, 38巻, pp. 425-430, 1994
- 2) 瀬津家久, 鬼束幸樹, 高橋俊介: 開水路わんどモデル内の乱流特性と組織渦, 土木学会論文集II, 684巻, pp.11-20, 2001
- 3) M.A.Jalil, Y. Kawahara, N. Tamai and K. Kan: Experimental Investigation of Flow in Embayment, 水工学論文集, 37巻, 1993
- 4) 中川研造, M.A.Jalil, 河原能久, 菅和利: 人工ワンド周辺部の流れ場に関する実験的研究, 河道の水理と河川環境シンポジウム論文集, 1巻, pp.89-94, 1993
- 5) 木村一郎, 細田尚, 村本嘉雄, 安永良: 開水路流れにおける死水域内の流体振動に及ぼす水理パラメータの効果, 水工学論文集, 39巻, pp. 779-784, 1995
- 6) 瀬津家久, 鬼束幸樹, 池谷和哉: PIVを用いた開水路凹部流れにおける水平渦構造の解析, 土木学会論文集II, 677巻, pp. 53-61, 2001
- 7) Hirt, C.W. and Nichols, B.D.: Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries, *J.Comp.Phys.*, Vol.39, pp.201-225, 1981
- 8) Hosoda, T., Sakurai, T., Kimura, I. and Muramoto, Y.: 3-D computation of compound open channel flows with horizontal vortices and secondary currents by means of non-linear k-e model, *J. of Hydroscience and Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol.17, No.2, pp.87-96, 1999

(2010年3月9日受付)