

# 開水路流れにおける上流ワンドが下流ワンド周辺の 質量・運動量交換特性に及ぼす影響に関する研究

## Effects of upstream side-cavity on mass and momentum exchange properties in the downstream side-cavity of open-channel flows

襦津家久\*, 矢野勝士\*\*, 光成洋二\*\*\*  
Iehisa NEZU, Masashi YANO, Youji MITSUNARI

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

\*\*学生会員 修(工) 京都大学大学院博士後期課程 社会基盤工学専攻(同上)

\*\*\*学生会員 京都大学大学院修士課程 社会基盤工学専攻(同上)

In this study, PIV measurements in and around side-cavities open-channel, i.e. wando flows, were conducted. The experimental condition is that two side-cavities were set continuously in the downstream direction with various aspect ratios. The aspect ratio of the downstream side-cavity was fixed to 2.0, whereas, that of the upstream side-cavity was changed to 2.0, 5.0 and 10.0. The distance between these two side-cavities was changed to four kinds of patterns. Measurements were carried out for the downstream side-cavity. The flow direction of the time-averaged velocity was changed to the main channel direction by the effects of upstream side-cavity. As the aspect ratio of the upstream side-cavity increased, the inflow and outflow increased in the downstream side-cavity. As the results, the mass exchange ratio was increased. The positions of shear layer were changed and the Reynolds stress and momentum distribution were increased. The above results were observed in the condition that the aspect ratio of the upstream side-cavity was increased and the interval of side-cavities was decreased.

**Key Words:** Wando, PIV, Turbulent structure, Mass and momentum exchange, Open-channel-flows

### 1. はじめに

河川改修事業は、従来の治水・利水機能に限定された整備・管理方針から環境問題も考慮する方向へと転換されており、官民間問わず活発に研究活動が行われている。しかし、こうした多機能を同時に満足するような河川改修事業と行うことは容易ではなく、ひとつの河川を創出し、維持・管理を行うことは重要かつ難易度の高い課題となっている。こうした背景より、近年注目を浴びている水理構造物として河川側岸に凹部を設けたワンドがあげられる。

ワンドを最も単純なモデルで表すと、側岸に長方形の凹部を有する開水路流となる。こうした流れ場についての研究はこれまでにいくつか行われている。例えば、藤田ら<sup>1)</sup>は鉛直キャビティに対し、PIVを用いた可視化実験とLESによる数値計算を行い、相互比較を行っている。また、木村ら<sup>2)</sup>は、ワンド周辺の浮遊砂輸送・堆積過程について水理実験と数値解析により検討を行い、堆積過程は4パターンに分類できるとした。さらにその堆積パターンは主流の摩擦速度と沈降速度の比および主流のフルード数に依存することを示している。中川ら<sup>3)</sup>は凹部のアスペクト比(凹部の流下方向長さ/凹部の横断方向長さ)、境界面における仕切板の張り出し長さ、植生が凹部周辺に与える影響および低水時と高水時の特性を解明するために、流れの可視化を行った。加えて電磁流速計による点計測も行い渦の周期を算出し、目視によるものと一致することを

述べている。Rockwell & Knisely<sup>4)</sup>は鉛直キャビティ流れに対し、乱流計測および水素気泡法による可視化を行っている。この結果より、彼らはキャビティ上流端からの剥離渦が下流端に衝突する位置は規則的に変化することを述べている。また、Onitsuka *et al.*<sup>5)</sup>および襦津ら<sup>6)</sup>は凹部のアスペクト比や開口部形状を変化させたときの乱流特性と組織渦構造を解明するために、レーザー流速計(LDA)とPIVを用いた実験的研究を行った。彼らはアスペクト比の変化によって乱流構造が大きく変化し、組織渦構造やせん断不安定に関する特性も変化することを解明し、開水路凹部における渦モデルを提案した。池田ら<sup>7)</sup>は凹部のアスペクト比を系統的に変化させた流れを電磁流速計を用いて計測し、運動量交換率および質量交換率を求めている。また、彼らは連続水制において、上流のワンド区間で発生した剥離現象の流下方向に対する遷移過程について検討を行っている。Muto *et al.*<sup>8)</sup>はアスペクト比が1および3の流れを電磁流速計およびLDAを用いて計測し、凹部と主流との間の瞬間的な運動量交換について実験的に検討を行っている。

以上のように、ワンド流れに関してはこれまで多くの研究が行われている。実河川で見るワンド群は水制を連続的に配置したものが多くを占め、上流側に設置されたワンド周辺の流れが下流側のワンド周辺の流れに及ぼす影響について検討を行う必要がある。また、施工当初のワンドはアスペクト比が2に設定されているものがほとんどであるが、土砂堆積等によるワンド

形状の経年変化により現在見られるアスペクト比は様々に変化している。また、藤田ら<sup>9)</sup>による実河川における連続水制周辺の流況特性から、主流の流向が変化すればワンド内部での流れ構造は顕著に変化することが明らかとなっている。そこで本研究では、ワンドを連続的に配置し、上流側のワンドでの流れが下流側のワンド周辺での質量交換および運動量分布特性に及ぼす影響について検討を行う。

## 2. 実験装置および実験条件

本研究で用いた実験水路は、図-1に示すような全長10m、幅 $B=40\text{cm}$ 、高さ $50\text{cm}$ の可変勾配型循環式水路である。この水路は底面および側面が光学ガラス製となっており、下方あるいは側方からのPIV計測が可能な設計となっている。流量制御は、コンピュータによって制御される電磁流量計とインバータ・モーターの回転数を同期・制御することによって行う。

ワンド模型は水路右岸側に配置した。図-1に示すように、 $L_u$ と $L_d$ は上流および下流ワンドの流下方向長さであり、 $\alpha_u \equiv L_u/B_w$ と $\alpha_d \equiv L_d/B_w$ は上流および下流ワンドのアスペクト比、 $\phi$ はワンド設置間隔を示している。ここで、 $B_w$ はワンド横断方向長さ、 $H$ は時間平均水深である。なお、凹部設置区域は水路上流端から7mの地点として、流速計測は下流側に設置したワンドを対象とした。

座標系は流下方向に $x$ 軸、水深方向に $y$ 軸、横断方向に $z$ 軸を設定し、ワンド内部上流端を $x=0$ 、河床を $y=0$ 、ワンド内部側壁を $z=0$ とした。それぞれの座標軸方向の時間平均流速は $U$ 、 $V$ 、 $W$ 、またその時間変動成分は $u(t)$ 、 $v(t)$ 、 $w(t)$ と定義した。

流速変動成分のRMS値すなわち乱れ強度をそれぞれ $u'$ 、 $v'$ 、 $w'$ とした。たとえば、 $u' \equiv \sqrt{u'^2}$ である。

流速計測には、PIVシステム(Kanomax社製)を用いた。PIV計測に関して、粒径 $100\mu\text{m}$ のナイロン12粒子をエタノールに浸した中立浮遊粒子をトレーサーとして用い、図に示すように2Wアルゴンイオンレーザーを光ファイバーケーブル経由でシリンドリカルレンズにより厚さ $2\text{mm}$ のレーザーライトシート(LLS)に変換し、開水路水平断面に照射し、水路下方からCCDカメラで撮影する $U-W$ 計測を行った。こうして得られた可視化画像から相互相関法により瞬間流速を計測した。これらの手法は瀬津ら<sup>5)</sup>と同様である。なお、計測時間は70秒間として水平断面計測位置は $y/H=0.5$ の半水深とした。

本研究での実験条件を表-1に示す。ここで、 $Q$ は流量、 $U_m$ は水路中央での平均主流速、 $Fr = U_m/\sqrt{gH}$ はフルード数、無次元ワンド設置間隔は $\beta = \phi/B_w$ である。ケース名については、上流ワンドのアスペクト

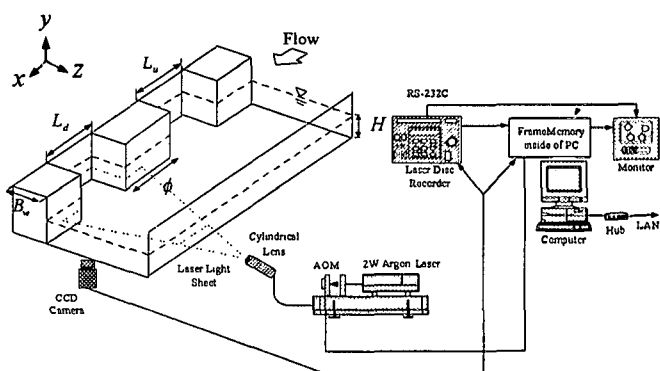


図-1 実験装置

表-1 実験条件

| CASE                    | $Q$<br>(l/sec) | $Fr$ | $U_m$<br>(cm/sec) | $H$<br>(cm) | $B_w$<br>(cm) | $L_u$<br>(cm) | $L_d$<br>(cm) | $\alpha_u$ | $\alpha_d$ | $\phi$<br>(cm) | $\beta$ |
|-------------------------|----------------|------|-------------------|-------------|---------------|---------------|---------------|------------|------------|----------------|---------|
| $\alpha 22, \beta 0$    | 2.2            | 0.27 | 18.5              | 4.0         | 4.0           | 8.0           | 8.0           | 2.0        | 2.0        | 0              | 0       |
| $\alpha 22, \beta 0.4$  |                |      |                   |             |               |               |               |            |            | 1.5            | 0.4     |
| $\alpha 22, \beta 1.1$  |                |      |                   |             |               |               |               |            |            | 4.5            | 1.1     |
| $\alpha 22, \beta 2.0$  |                |      |                   |             |               |               |               |            |            | 8.0            | 2.0     |
| $\alpha 52, \beta 0$    |                |      |                   |             |               | 20.0          |               | 5.0        |            | 0              | 0       |
| $\alpha 52, \beta 0.4$  |                |      |                   |             |               |               |               |            |            | 1.5            | 0.4     |
| $\alpha 52, \beta 1.1$  |                |      |                   |             |               |               |               |            |            | 4.5            | 1.1     |
| $\alpha 52, \beta 2.0$  |                |      |                   |             |               |               |               |            |            | 8.0            | 2.0     |
| $\alpha 102, \beta 0$   |                |      |                   |             |               | 40.0          |               | 10.0       |            | 0              | 0       |
| $\alpha 102, \beta 0.4$ |                |      |                   |             |               |               |               |            |            | 1.5            | 0.4     |
| $\alpha 102, \beta 1.1$ |                |      |                   |             |               |               |               |            |            | 4.5            | 1.1     |
| $\alpha 102, \beta 2.0$ |                |      |                   |             |               |               |               |            |            | 8.0            | 2.0     |
| $\alpha 02$             |                |      |                   |             |               | -             |               | -          |            | -              | -       |

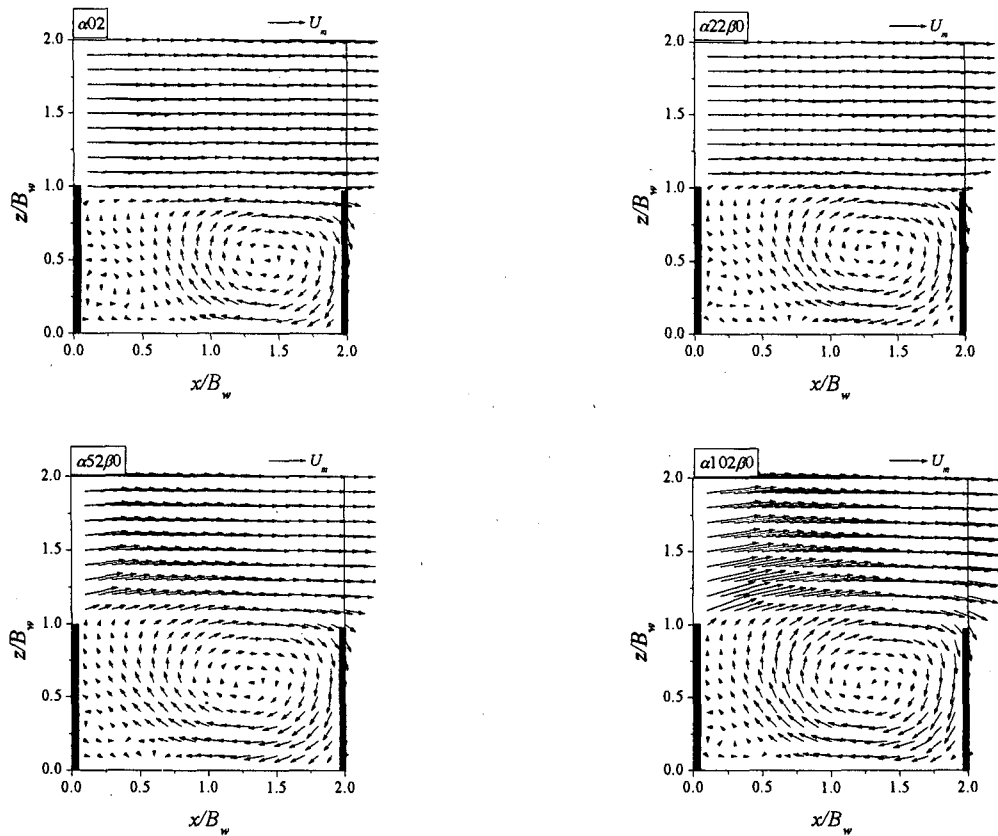


図-2 時間平均流速ベクトル

比, 下流ワンドのアスペクト比, ワンド設置間隔の順に表記して区別した. 例えば $\alpha102\beta20$ ならば, 上流ワンドのアスペクト比は10, 下流ワンドのアスペクト比は2であり,  $\beta$ は2.0となっている. なお, 表中の $\phi$ が0と表記されているのは, ワンド間隔が極めて小さくほぼゼロと見なせるケースである. また, case $\alpha2$ はアスペクト比2.0の単体ワンドである. 流量や水深, また下流ワンドのアスペクト比は全ケース一貫して同一条件に設定しており, 上流側ワンドのアスペクト比とワンド設置間隔のみを系統的に変化させた条件で実験を行った. 本研究では, 下流側ワンドのアスペクト比を固定した. これは, 実河川で最もよく見られるワンドのアスペクト比が2であるため, これを基準とした系統の実験を行うためである.

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 時間平均流速分布特性

本研究では $\alpha_u$ と $\beta$ を系統的に変化させた連続ワンド12ケースおよび単体ワンドの全13ケースを計測対象とした. 図-2に, 代表的なケースとしてcase $\alpha02$ ,  $\alpha22\beta0$ ,  $\alpha52\beta0$ および $\alpha102\beta0$ を選択して, PIVから得られた各点での時間平均流速ベクトル図( $U/U_m, W/U_m$ )を示す. ここで,  $U_m$ は水路中央部で得られた最大主流速であり, これを用いて無次元化を行っている. 全ケース共通して見られる傾向としては, ワンド内部で流下方向とほぼ平行方向に長軸を持つ楕

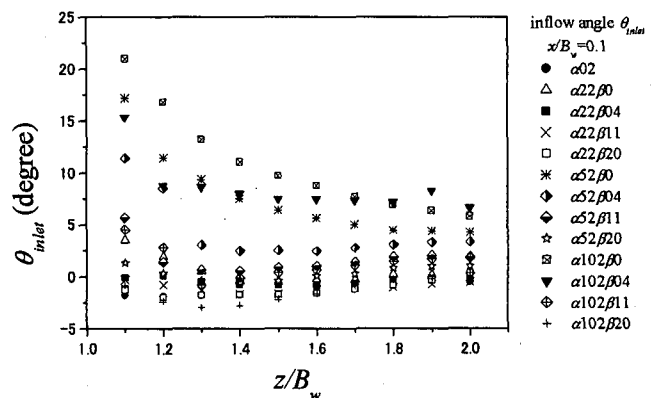
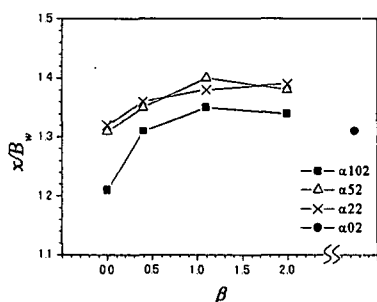


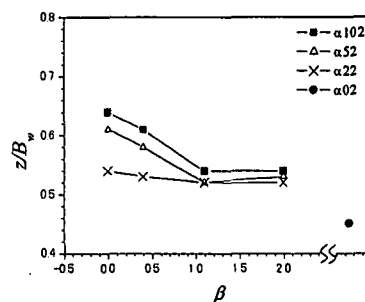
図-3 主流部における流入流向

円的な大規模循環渦を有していること, また, それに伴う2次循環渦がワンド内部上流域において存在していることが挙げられる.

各ケースに着目すると,  $\alpha_u$ が大きくなるほど上流側ワンドの水はね効果が大きくなるため, それに伴い下流側ワンドにおいて全体的に流れが主流部へと向かうといった流向の変化が見られる. ワンド内部で見られる大規模循環渦の中心位置が主流部側へと移動している. また, 循環渦から発生するリターンフローの強度が単体ワンドのcase $\alpha02$ に比べて増加しており, これに伴い2次循環渦の規模は縮小する傾向が見られる. これらより, ワンド内部と主流部との物質交換特性が



(a) 流下方向位置



(b) 横断方向位置

図-4 循環渦の中心位置

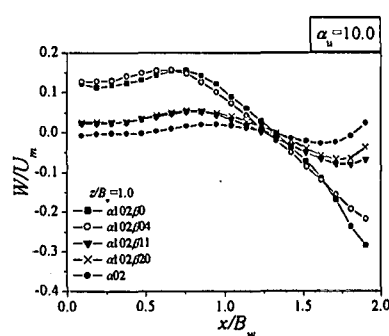
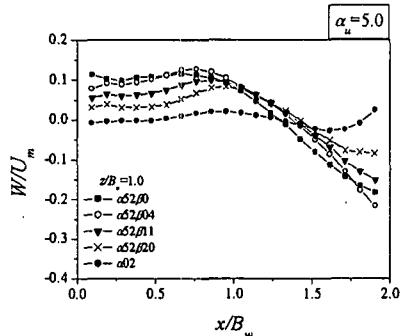
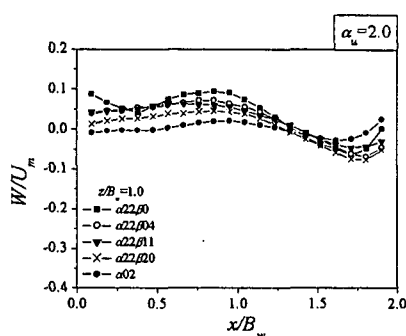


図-5 境界部 ( $z/B_w = 1.0$ ) での横断方向流速成分  $W$

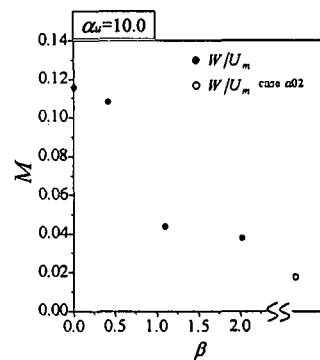
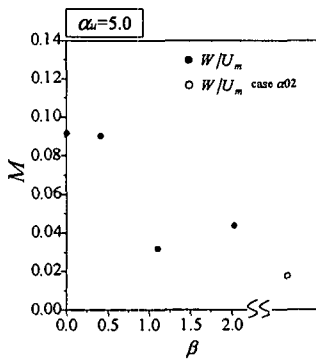
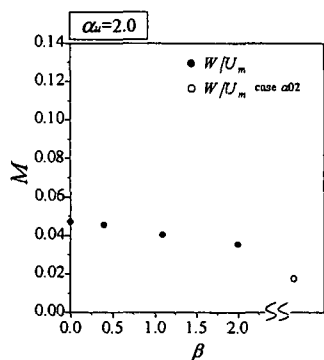


図-6 質量交換率  $M$

大きく変化していることが推測される。こうした傾向はワンド設置間隔  $\beta$  が大きくなるほど見られなくなり、単体ワンドの case  $\alpha 02$  と同様の流れ場へと遷移していくと考えられる。

図-3 に上流端主流部 ( $x/B_w = 0.1$ ,  $z/B_w > 1.0$ ) での合成流速 ( $\sqrt{U^2 + W^2}$ ) に関する主流流向  $\theta_{inlet}$  の分布図を示す。  $\theta_{inlet}$  は次式で算出した。

$$\theta_{inlet} = \tan^{-1}(W/U) \quad (1)$$

$\alpha_u$  が大きく  $\beta$  が小さいケースでは主流部とワンド内部との境界部付近での流入流向  $\theta_{inlet}$  は大きく、逆のケースでは流入流向  $\theta_{inlet}$  は小さく、単体ワンド case  $\alpha 02$  に近づく。いずれのケースにおいても境界部から離れるに従い、流入流向  $\theta_{inlet}$  の変化は見られなくなる。これにより、上流ワンドでの水はね効果であり、

下流ワンドの流入条件である主流流向変化を示すことができた。

図-2 のベクトル図からワンド内部での大規模循環渦の中心位置が変化していることがわかった。そこで、循環渦の中心位置のケース間比較した結果を図-4 に示す。検討基準として、ワンド内部における閉じた状態にある時間平均流線の中心位置を採用した。閉じた状態にある流線とは、ベクトル図で見られる大規模循環渦に対応した位置にある流線を示す。これより、 $\alpha_u$  が大きいほど循環渦の中心位置は上流方向さらに、主流部方向へと変化することがわかった。こういった循環渦中心位置の変化も  $\beta$  が大きくなるに従い減少し、単体ワンドの case  $\alpha 02$  と同様の結果になる。上流ワンドでの水はね効果によって変化した主流流向に伴って

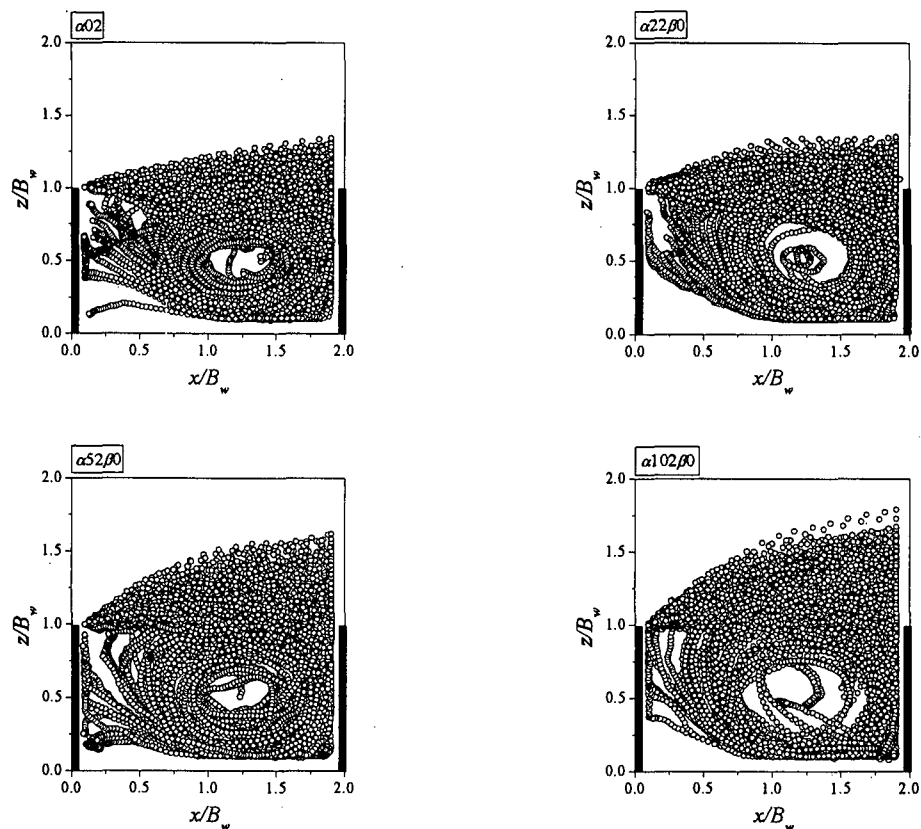


図-7 仮想粒子の軌跡

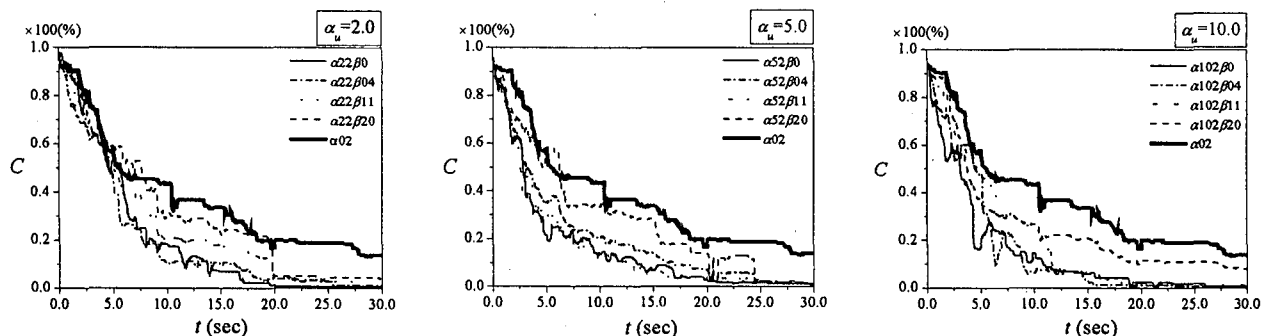


図-8 ワンド内部における仮想粒子濃度の時間変化特性

ワンド内部の流れ全体が主流部側へと移動したものと考えられる。

図-5 に、主流部とワンド内部との境界部 ( $z/B_w = 1.0$ )での横断方向流速  $W$  の分布を示す。流速ベクトル図から、 $\alpha_u$  が大きく  $\beta$  が小さいケースではワンド内部循環渦からのリターンフローの強度が増加していることがわかったが、図-5 でも同様の結果が得られている。境界部上流域ではワンド内部から流出し ( $W > 0$ )、下流域で流入している ( $W < 0$ )。ケース間比較すると流出および流入の強弱が顕著に現れていることがわかり、これに応じた物質交換特性が変化すると考えられる。

### 3.2 質量交換率

池田ら<sup>7)</sup>はワンド内部と主流部との質量交換率  $M$

を以下のように定義した。

$$M = \frac{1}{\rho U_m L_d} \int_0^{L_d} \rho |W| dx \quad (2)$$

これより算出した結果を図-6に示す。これより、いずれのケースにおいても  $\beta$  に対して減少傾向にあり、 $\alpha_u$  が大きくなるほどその勾配が大きくなっていることが見られる。これは、境界部における  $W/U_m$  の分布からわかるように、 $\alpha_u$  が大きいケースほど主流部とワンド内部の間での物質交換が盛んに行われ、 $\beta$  の増加に伴い次第に減少していくことを示している。また、いずれのケースにおいても最終的には単体ワンドの case  $\alpha 02$  の値に近づいていくことが観察される。

### 3.3 仮想粒子分布

本研究ではPIVを用いて瞬間流速場を計測している

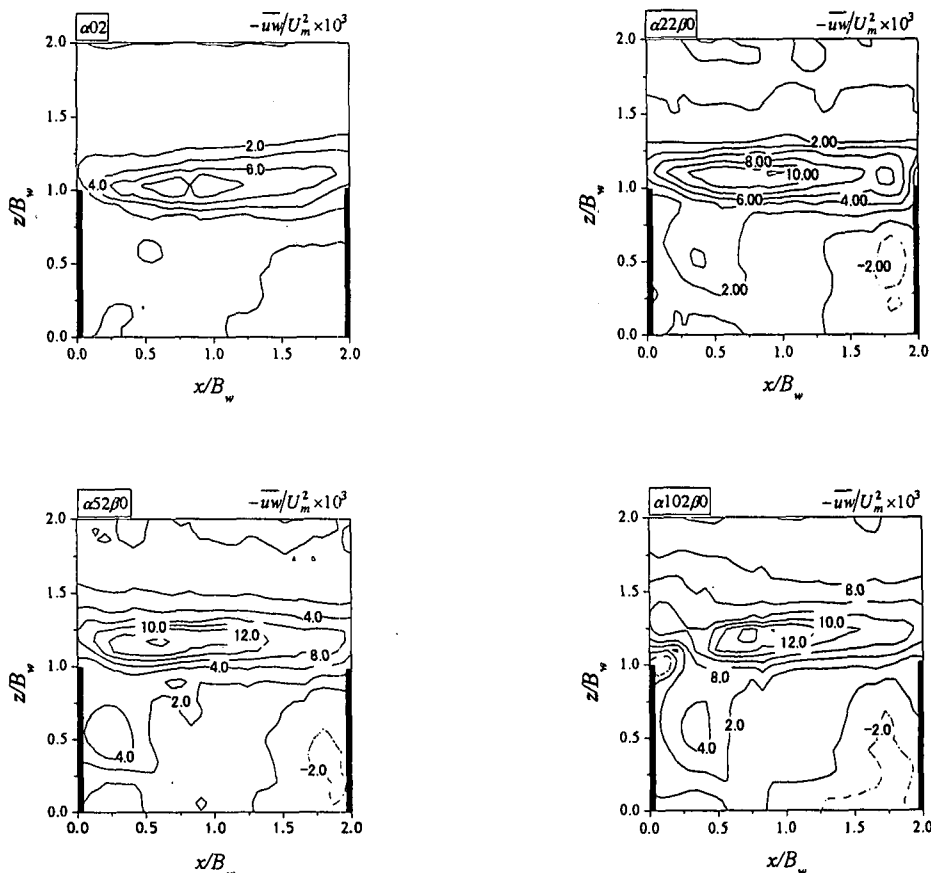


図-9 レイノルズ応力 $-\overline{uw}/U_m^2$ の分布

ため、次式で算出される近似的な仮想粒子の軌跡を検討することができる。

$$\left. \begin{aligned} x_n^{t+1} &= x_n^t + \Delta t \cdot u(x_n^t, z_n^t, t) \\ z_n^{t+1} &= z_n^t + \Delta t \cdot w(x_n^t, z_n^t, t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $x_n^t$  および  $z_n^t$  は任意粒子  $n$  における任意時刻  $t$  での  $x, z$  方向位置である。任意粒子  $n$  の瞬間流速である  $u(x_n^t, z_n^t, t)$  と  $w(x_n^t, z_n^t, t)$  は PIV から得られたデータから求めている。

ワンド上流先端 ( $x/B_w = 0.1$ ,  $z/B_w = 1.0$ ) から仮想粒子を放出した場合に関する、粒子軌跡を図-7 に示す。この図より、 $\alpha_u$  が大きいケースほど粒子は主流部側へと流出していることがわかる。こうした傾向も  $\beta$  が大きくなるに従い見られなくなり、単体ワンド case  $\alpha 02$  と同様の傾向を示すようになる。これは質量交換率から得られた結果と一致する。

また、初期条件としてワンド内部に均等に仮想粒子を配置し、その後のワンド内部から放出される仮想粒子濃度の時系列を示したものが図-8 である。いずれのケースも、ワンド間隔  $\beta$  が小さいケースほど粒子の主流部へ流出が激しく、 $\beta$  の増加に伴って単体ワンドの case  $\alpha 02$  における分布に近づく様子が見られる。この粒子減少率の勾配は上流側ワンドのアスペクト比  $\alpha_u$  が大きいケースほど大きいことが見られる。これは、主流部とワンド内部の間での物質交換が盛んに行われ

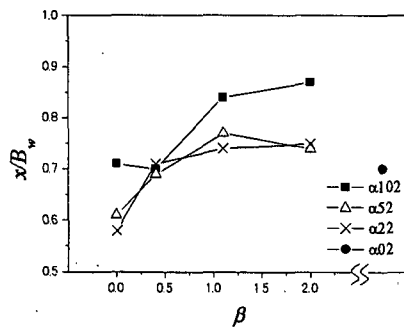
ていることを示しており、上流側ワンドのアスペクト比が大きいほど下流ワンドと主流部との物質交換は激しくなり、水質改善に有効であることが示唆される。

### 3.4 レイノルズ応力分布

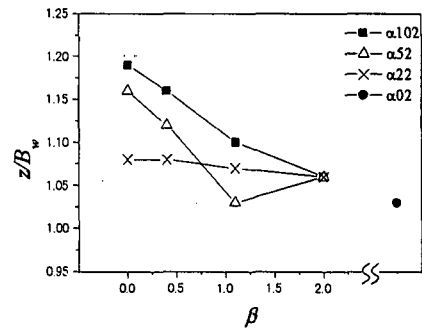
図-9 にレイノルズ応力 $-\overline{uw}/U_m^2$ の等値線図を示す。ここでも、流速ベクトル図と同様に、代表的なケースとして case  $\alpha 02$ ,  $\alpha 22\beta 0$ ,  $\alpha 52\beta 0$  および  $\alpha 102\beta 0$  の結果を示す。図中に示した値は  $U_m$  を用いて無次元化した後、1000 倍して表示している。

いずれのケースにおいてもワンド上流部から境界部に沿ってせん断層が形成され、レイノルズ応力が増大していることが観察される。

レイノルズ応力の最大値は、上流ワンドのアスペクト比  $\alpha_u$  が大きく、ワンド間隔  $\beta$  が小さいケースほど増大している。また、最大値をとる位置が主流部側および上流側へ変化する。これは上述したように、主流流向の変化により主流の高速流体とワンド内部との低速流体との乱流混合で生じるせん断乱流層の位置が変化したことが原因と考えられる。また、各ケースの絶対値に着目すると、 $\alpha_u$  が大きく、 $\beta$  が小さいケースほど全体的に大きな値をとっており、運動量交換が活発に行われていることがわかる。これは、上流ワンドで生成された乱れ成分が完全には逸散されずに下流ワンドへ移流したことが原因であると考えられる。



(a) 流下方向位置



(b) 横断方向位置

図-10 せん断層の位置

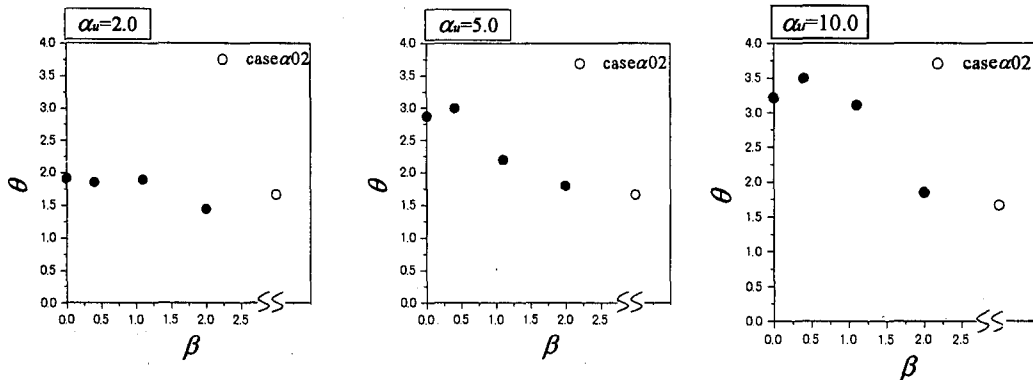


図-11 全運動量  $\theta$

$-\overline{uw}/U_m^2$  の等値線図より、境界部周辺でのせん断層の発生位置が変化していることがわかった。ここで、せん断層の中心位置のケース間比較した結果を図-10に示す。検討基準として、境界部周辺における閉じた状態にある  $-\overline{uw}/U_m^2$  の等値線図の中心位置を採用した。これより、 $\alpha_u$  が大きいほどせん断層の中心位置は上流方向かつ主流部方向へと変化することが分かった。こういったせん断層中心位置の変化も  $\beta$  が大きくなるに従い見られなくなり、単体ワンドの case  $\alpha02$  と同様の結果になる。

### 3.5 運動量交換率

ワンド内部と主流部でのマクロな運動量交換率の変化を検討するため、次の式を定義した。ここで、横断方向に対する積分範囲は  $0 \sim 2B_w$  とした。これは、レイノルズ応力の等値線図からわかるように、ケース間での変化がおおよそ  $z = 0 \sim 2B_w$  の範囲で生じているためである。

$$\theta = \frac{1}{L_d} \int_0^{L_d} \left( \frac{1}{2B_w} \int_0^{2B_w} \frac{-\overline{uw}}{U_m^2} dz \right) dx \quad (4)$$

この結果を図-11に示す。全運動量の平均値  $\theta$  は  $\alpha_u$  が大きいケースほど  $\beta$  に対する勾配が大きく、ワンド設置間隔の影響を表している。また、絶対値としては  $\alpha_u = 10.0$  のケースが最も大きく、5.0, 2.0 の順で小さくなっている。こうした傾向は  $-\overline{uw}/U_m^2$  の等値線図から得られた結果と同様であり、上流ワンドの影響と考

えられる。上流ワンドで発生した乱れが完全には逸散されずに下流ワンドへ移流したためと考えられる。

### 3.6 流れの概念図

上述した結果から作成した流れ場の概念図を図-12に示す。この図では上流ワンドのアスペクト比  $\alpha_u$  を大きくし、ワンド設置間隔  $\beta$  を小さくするにしたがって変化した現象について記している。

図-12 より、上流ワンドの影響により、主流流向、循環渦の中心位置、せん断層の位置、リターンフローの強弱などが変化する様子がわかる。

### 4. おわりに

本研究では、2つのワンド模型周辺について、上流側に設置したワンドのアスペクト比とワンド設置間隔を系統的に変化させた条件での流速分布特性および質量・運動量交換特性について着目し、実験的検討を行った。これより得られた結論を以下に示す。

- 1) 単体ワンドでの主流流向は流下方向に対して平行であった。しかし、上流ワンドのアスペクト比の増加に従い、下流ワンドでの主流流向は全体的に水路中央側へ変化する。これに伴い、ワンド内部での大規模循環渦の中心位置は主流部側かつ上流側へと移動する。こうした傾向はワンド設置間隔が増加するに従い見られなくなる。

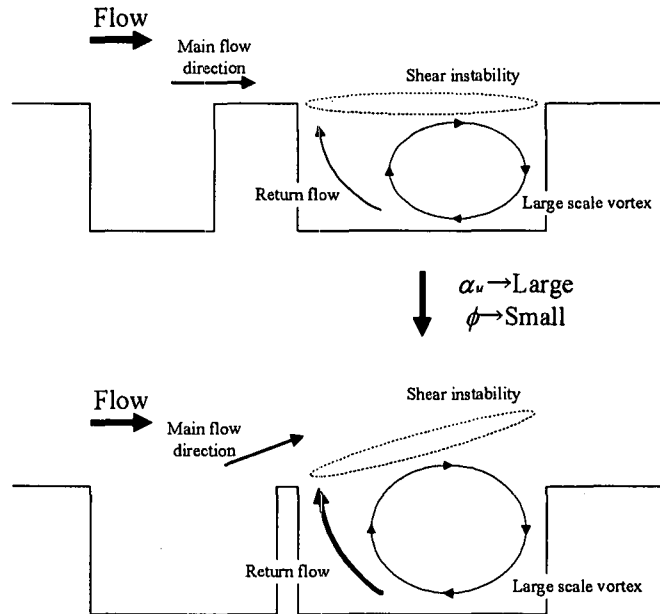


図-12 流れの概念図

- 2) 上流ワンドのアスペクト比が増加すると、下流ワンド内部で見られる大規模循環渦からのリターンフローの強度は単体ワンドと比較して増加する。これに伴い主流部とワンド内部との境界部における流出・流入は顕著になり、質量交換率が増加している。これより、上流ワンドの影響が大きいワンドでは質量交換が激しく行われていることがわかった。
- 3) ワンド先端から放出した仮想粒子の軌跡は、主流流向の変化に伴って水路中央側へ移動する。境界部における質量交換率は上流ワンドのアスペクト比が増加するに従い増加するが、これに応じてワンド内部に均等に配置した仮想粒子が主流部へ流出する傾向が顕著になることが確認された。ワンド設置間隔が増加するに従い単体ワンドでの現象へと漸近する。
- 4) 主流流向の変化に伴い、境界部付近で見られるせん断層の位置が主流部側かつ上流側へ変化することがわかった。これは、高速流である主流が低流速であるリターンフローと衝突する位置が変化したため、せん断不安定が発生する位置が変化することが原因と考えられる。また、ワンド周辺での全運動量は増加する。これは上流側で発生した乱れが完全には逸散されずに下流側へ移流するためと考えられる。
- 2) 木村一郎，細田尚，村本嘉雄：死水域の浮遊砂堆積過程に関する水理パラメータ依存特性，水工学論文集，第42巻，pp.1057-1062，1998。
- 3) 中川研造，河原能久，玉井信行：ワンド内の流れの水理特性に関する実験的研究，水工学論文集，第39巻，pp.595-600，1995。
- 4) Rockwell, D. and Knisely, C.: The organized nature of flow impingement upon a corner, *J. Fluid Mech.*, vol. 93, part3, pp.413-432, 1979.
- 5) Onitsuka, K., Nezu, I. and Takahashi, S.: PIV measurements of side-cavity open-channel flows with several shapes of open-mouth, *Proc. of 13<sup>th</sup> APD-IAHR Congress*, Singapore, 2002.
- 6) 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，No.684/II-56, pp.11-20, 2001.
- 7) 池田駿介，吉池智明，杉本高：不透過水制群を有する流れの構造に関する実験的研究，水工学論文集，第43巻，pp.281-286，1999。
- 8) Muto, Y., Imamoto, H. and Ishigaki, T.: Velocity measurements in a straight open channel with a rectangular embayment, *Proc. of 12th Congress of APD-IAHR*, pp.353-362, 2000.
- 9) 藤田一郎：トレーサーを利用した実河川水制周辺流れのビデオ画像解析，水工学論文集，第42巻，pp.505-510，1998。

(2003年4月18日受付)

#### 参考文献

- 1) 藤田一郎，神田徹，門脇正夫，森田卓光：開水路凹部流れのPIVおよびLESによる乱流解析，土木学会論文集，No.539/II-35, pp.79-88，1996。