

浸透性を有するワンド流れ周辺の 物質交換特性に関する可視化実験

MASS EXCHANGE AND FLOW PROPERTIES IN AND AROUND PERMEABLE SIDE-CAVITY OPEN-CHANNEL FLOW

棚津家久*, 矢野勝士**, 光成洋二***
Iehisa NEZU, Masashi YANO, Yoji 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)

Measurements of instantaneous flow fields and the dye concentration in and around side cavity that was set around the permeable wall, were conducted. Measurements of flow properties were conducted by PIV. On the other hand, DV-camera was used for measurements of dye concentration. Permeable flow from the side wall of the side cavity was divided into 4 kinds of patterns. From the upstream wall, side wall, downstream or upstream and side wall. The permeable flow rate was set to 3 patterns. The 3%, 5% and 8% of the main-channel flow rate were changed. The aspect ratio (the streamwise length of the side cavity / the lateral length of the side cavity) was set to 2.

Flow patterns were changed. In the case of the permeable flow from upstream wall, side wall and upstream and side wall, the center point of circulation flow moved to the downstream. On the other hand, in the case of permeable flow from the downstream wall, the center point changed to the upstream. Dye concentration distribution in all cases was that high concentration area was observed at the upstream in the side cavity. In and around the circulation flow, there was low concentration. In the case of permeable flow from the upstream and side wall, the influences on flow fields or concentration fields were the greatest.

Key Words: groyne, mass exchange, permeable flow, PIV, Flow Visualization

1. はじめに

凹部流れは, その幾何学形状の簡易性により様々な流れ場を想定して研究されている. 例えば, トレンチを想定した鉛直凹部流れや, ワンドを簡易モデル化した水平凹部流れなどが挙げられる.

こうした流れ場に関する水理特性や物質交換特性に着目した研究はこれまでにいくつか行われている.

鉛直凹部流れでは, 八木¹⁾が凹部界面における組織渦発生現象と水質交換特性に関する実験的研究を行い, 渦の発生数や水質交換速度は凹部長さに依存した現象であることを明らかにした. また, Debler & Armfield²⁾はこのような現象に着目し, 台形凹部内に沈殿した物質の主流への流出過程についてフルード数, アスペクト比(凹部長さ/凹部高さ), 沈殿物質の比重, 台形凹部の形状を系統的に変化させた条件で実験を行った. その結果, 物質交換は, 各パラメータを変化させるに従い, 顕著に変化することが明らかになった. 東野・神田³⁾は凹部流れにおける水・底泥間の溶質移動について, カオリナイトとメチレンブルーを用いた溶出実験を行い, 溶出フラックスの推定式を提案し, 実験値と良好に一致することを示した.

一方, 河川におけるワンド流れや海岸における港湾部を想定した水平凹部流れに関しては,

Langendoen *et al.*⁴⁾が港湾部を想定した様々な形状をもつ流れ場周辺での流速分布特性と水温変化特性について, 潮汐を想定した条件下で実験を行っている. これによって, 流速分布と水温変化との関係が明らかにされた. Kantardgi⁵⁾は水平凹部内部での流速分布, 水深および塩分濃度分布の変化特性に着目した実験を行い, 水質交換特性について解析を行っている. 河川を対象としたワンド流れでは, Uijtewaal *et al.*⁶⁾はワンドアスペクト比(ワンド流下方向長さ/ワンド横断方向長さ), 水深, 主流速を系統的に変化させた条件で可視化実験を行い, 流れ場の様子と染料濃度分布の時系列変化を解析している. これにより, 各パラメータが及ぼす物質交換特性への寄与率を明らかにした. また, 富永⁷⁾はワンド形状を変化させることによる流速分布, 乱流特性量および染料の物質交換過程の変化に着目した実験を行い, ワンド周辺の物質交換特性の改善について言及している.

このように, 凹部流れに関しては様々な流れ場の想定と, それに関する研究が存在する. しかし, これらの研究のほとんどが流れ場周辺の境界条件を固定壁としている. また, 木曽川や淀川といった実河川におけるワンドの現地観測⁸⁾によれば, 浸透流の影響により流れ場の様子は変化し, これに伴い水質分布も変化していることが報告されている. 浸透流の発生因の一例として, 木曽川では隣接した長良川

の河口堰の存在により、干潮時において二川の水位差が顕著になり、浸透流が発生することなどが挙げられる。また、透過性水制を連続設置することによって形成されているワンド群では、隣接したワンドからの浸透作用が存在することも考えられる。

そこで本研究では開水路ワンド流れを対象に、壁面からの浸透流を導入した実験模型を作成し、可視化実験を行った。本研究で計測対象としたのは流速分布と、物質濃度分布である。実験手法として、流況計測に対しては PIV システムを使用した。また、物質交換特性の検討については、浸透流にローダミン B の染料を用い、浸透流の挙動に伴う濃度変化を DV-カメラを用いて計測した。

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 に示す全長 10m、幅 20cm 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レーザーライトシート(LLS)を照射することが可能な設計となっている。

図-1 に示すように、ワンド模型は水路右岸側に配置した。 L はワンドの流下方向長さであり、 B_w はワンド奥行き長さを示している。本研究では $L=20\text{ cm}$ および $B_w=10\text{ cm}$ に設定し、ワンドアスペクト比($=L/B_w$)を実河川での最頻値^{8,9)}である 2.0 に固定した。 H は時間平均水深である。

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。各座標軸方向の時間平均流速は U 、 V 、 W と定義した。

浸透流量の設定方法も図-1 に示している。水路下方の水槽から水をポンプアップし、水路上方の水槽(ヘッドタンク)へ流入させる。この際、ヘッドタンクを常に越流させるようにポンプアップさせ、水頭

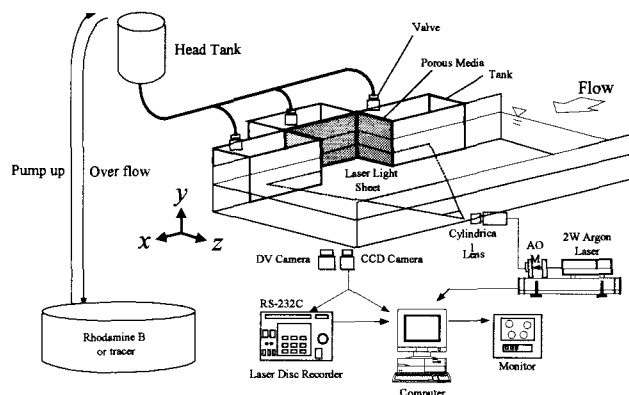
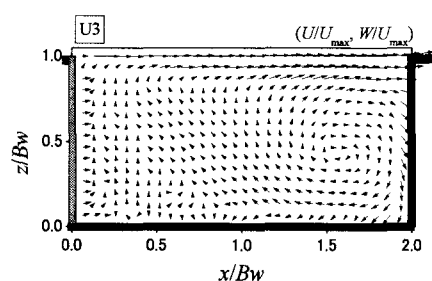


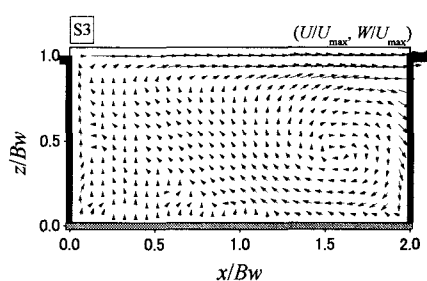
図-1 実験装置

表-1 実験条件

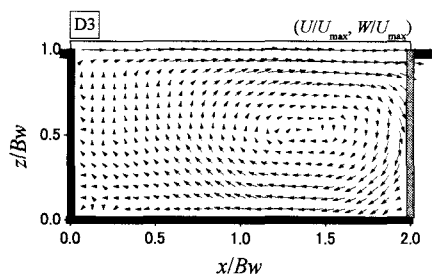
case	$U_{\max}$ (cm/sec)	L/B_w	H (cm)	q_u $=Q_u/B_w$ (cm ² /sec)	q_s $=Q_s/L$ (cm ² /sec)	q_d $=Q_d/B_w$ (cm ² /sec)
USD000	14.6	2.0	0.3	0.0		
D3				0.0		5.0
U2				3.0	0.0	
U3				5.0		
S1				0.0	2.0	0.0
S2					3.0	
S3					5.0	
US32				5.0	3.0	0.0
US23				3.0	5.0	
US33				5.0		



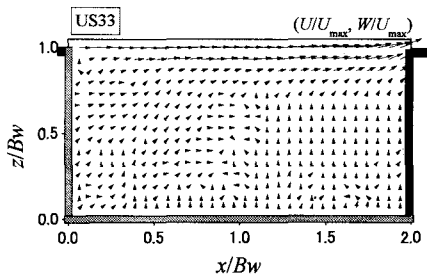
(a) 上流壁からのみ浸透させたケース



(b) 側壁からのみ浸透させたケース



(c) 下流壁からのみ浸透させたケース



(d) 上流壁および側壁から浸透させたケース

図-2 代表的なケースの時間平均流速ベクトル

を一定になるように調整した。ヘッドタンクから流量調節用のバルブを介して水路内の浸透水槽に浸透流を流入させる。ヘッドタンクと水路内の浸透水槽との水頭差が時間的に一定であるため、浸透流量を一定値に設定することができる。また、浸透板として、ABS樹脂で作成された焼結プラスチックを使用した。これは均一粒径の粒子を焼結結合させることによって板状に加工したものであり、空間的に均等な流量を流出入させることができる。

流速計測には、PIV システム(Kanomax 社製)を用いた。図に示すように厚さ 2mm のレーザーライトシート(LLS)を、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を用いて瞬間流速を計測した。計測時間は、流れ場が安定してから 60 秒間とした。水平断面計測位置は $y/H=0.5$ の半水深である。その他の詳細は Onitsuka *et al*¹⁰⁾と同様である。

濃度計測には、DV カメラ(SONY 社製、動画時における有効画素数約 70 万画素)を水路下方に設置し、水平面内濃度分布に対して計測を行った。サンプリング周波数は 30Hz である。撮影された動画を静止画に連続変換することによって任意時刻での濃度分布の解析が可能となる。水平断面計測位置は PIV と同様の $y/H=0.5$ である。

本研究での実験条件を表-1 に示す。ここで Q_u , Q_s , Q_d はそれぞれワンド内部の上流壁、側壁、下流壁からの浸透流量である。系統的に変化させた浸透流量のオーダーはそれぞれ主流流量の約 3%, 5%, 8% に設定した。これらは、流れ場の変化を系統的にまた顕著に見るための予備実験から得られた値である。また、 q_u , q_s , q_d は単位幅流量である。

$Fr = U_m / \sqrt{gH}$ はフルード数、 U_m は主流部における

断面平均流速であり、全ケースとも $Fr = 0.27$ の一定値とした。 U_{max} は水路中央軸での最大主流速である。ケース名については、U, S, D が upstream, side, downstream の略であり、その後の数字は浸透流量を示している。例えば、S3 ならば、側壁からのみ浸透させており、浸透流量は最も大きいケースである。

3. 実験結果および考察

3-1. 時間平均流速分布特性

(a) 時間平均流速ベクトル分布

図-2(a) ~ (d) に代表的なケースとして選択した U3, S3, D3 および US33 の平均流速ベクトル図を示す。ここでは主流の最大流速 U_{max} を用いて無次元化した値で示している。ワンド内部で見られる時間平均流速分布特性のひとつとして、水路右岸側に模型を設置した場合、上方から見て時計回りに循環する水平渦が発生することが挙げられる^{6,7,11,12)}。本研究で対象とした流れ場でも同様に、ワンド内部で大規模循環渦が発生していることが確認された。

各ケース比較すると、ケース U3, S3, D3 では循環渦の発生が確認される。しかし、その発生位置や規模は変化し、流況が変化している様子がわかる。一方、US33 では循環渦は発生していない。このケースは上流壁および側壁から浸透流を流入させた浸透パターンのうち、最も浸透流量が大きいケースである。おおよそこのケース程度の流量を流入させると循環渦発生しないことがわかった。

(b) 循環渦形状と中心位置

図-3(a) ~ (d) に各ケースで観察された大規模循環渦の渦形状および中心位置を示す。ここで、渦の中心位置は閉じた状態にある時間平均流線の中心位置とし、中心位置での流線値の 98% の値をとる流線を

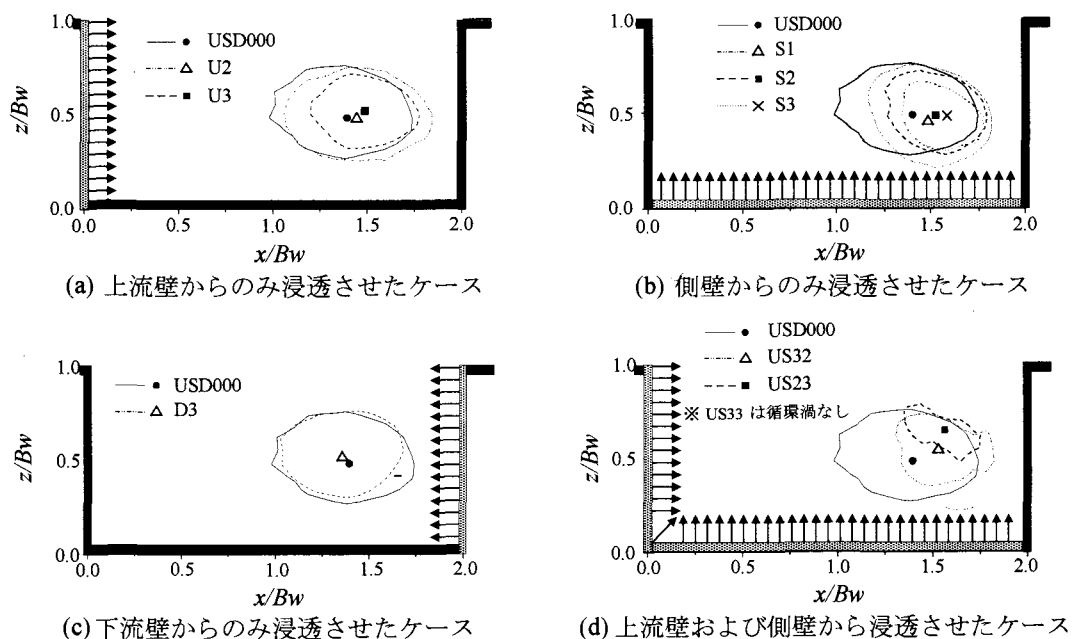
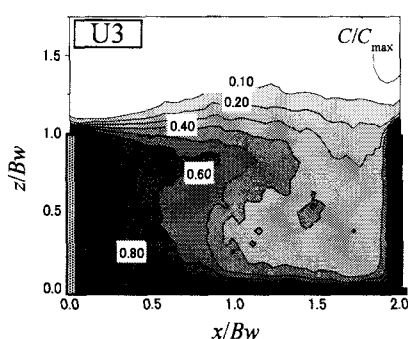
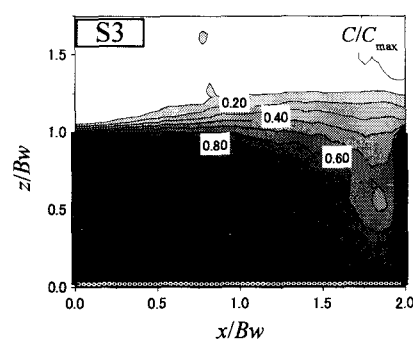


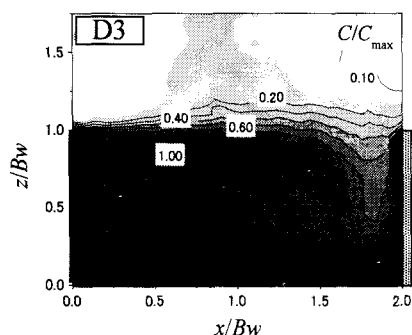
図-3 ワンド内部で発生する循環渦の中心位置と形状



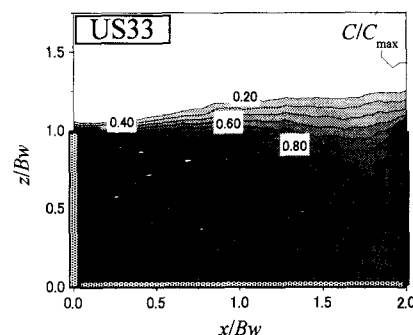
(a) 上流壁からのみ浸透させたケース



(b) 側壁壁からのみ浸透させたケース



(c) 下流壁からのみ浸透させたケース



(d) 上流壁および側壁から浸透させたケース

図-4 時間平均濃度分布 $C/C_{\max}$

渦形状と定義した。

上流壁からのみ浸透させたケース U2 および U3 では、浸透流の増加に伴い循環渦の発生位置が下流側へ移動していることがわかる。また、渦形状の変化より、循環渦の規模が若干縮小していることがわかる。側壁からのみ浸透させたケース S1～S3 においても、循環渦の発生位置が浸透流の増加に伴い下流側へ移動し、循環渦の規模も縮小している。側壁から浸透流を流入させているにもかかわらず渦中心位置が下流側へ移動する理由として、(1)ワンド内部下流域からの浸透流は流入直後に循環渦によって上流域へと輸送される。(2)ワンド内部上流域での浸透流の流向と循環渦の流向が一致している。この2つが挙げられる。主流へ流出する方向の流れが加速され、その結果として循環渦は下流側へ押し流されたものと考えられる。一方、下流壁からのみ浸透させたケース D3 では、渦中心位置、渦形状ともに若干の変化が見られるものの、顕著な変化は見られない。浸透流が流れ場に及ぼす影響は、側壁からの影響が最も大きく、下流壁からの影響が最も小さいことがわかった。さらに、上流壁および側壁から同時に浸透流が発生しているケース US32 および US23 に着目すると、渦の中心位置および渦形状ともに顕著に変化している様子が観察される。なお、ケース US33 では、ワンド内部での循環渦の発生は確認されなかった。

3-2. 濃度分布・混合特性

(a) 時間平均濃度分布

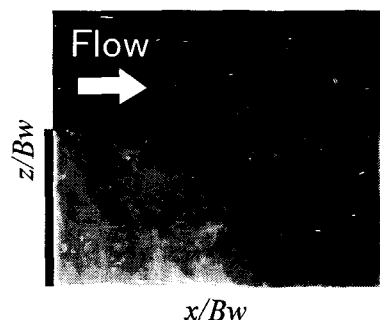


写真-1 可視化画像の一例

図-4(a)～(d)にワンド内部に浸透流を流入させ、濃度変動が安定してから時間平均濃度分布 C に関する等値線図を示す。濃度 C は写真-1に示すような、LLS 上での濃度をキャリブレーションデータをもとに、輝度から実濃度に変換した後、時間平均した。ここで、図に示した値は各ケースでの最大濃度 $C_{\max}$ で無次元化表示したものである。

全ケース共通して見られる傾向としては、浸透パターンおよび浸透流量の相違にかかわらず、ワンド内部上流域において比較的高濃度分布が見られることが挙げられる。また、大規模循環渦が発生している領域では低濃度分布となっていることがわかる。

各ケース間の相違に着目すると、US33, S3, U3, D3 の順でワンド内部上流域における高濃度領域が拡大しており、下流域での低濃度領域が縮小していることがわかる。これは、上述した浸透パターンと循環渦の位置・形状変化と対応している。大規模循

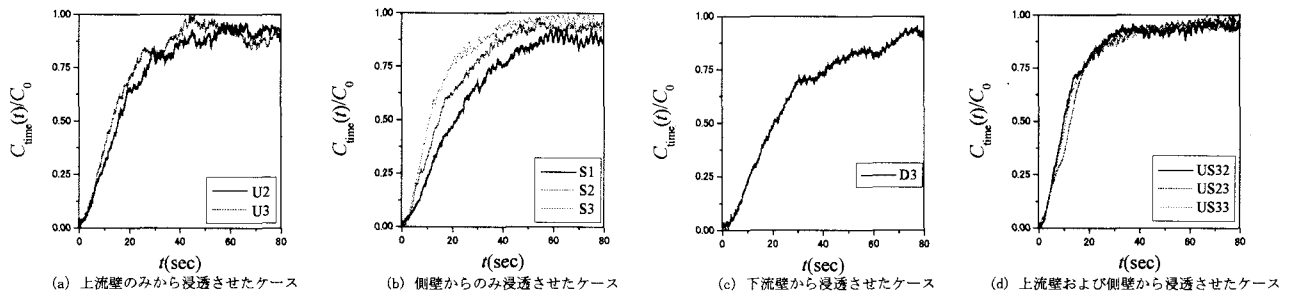


図-5 濃度変化の時系列

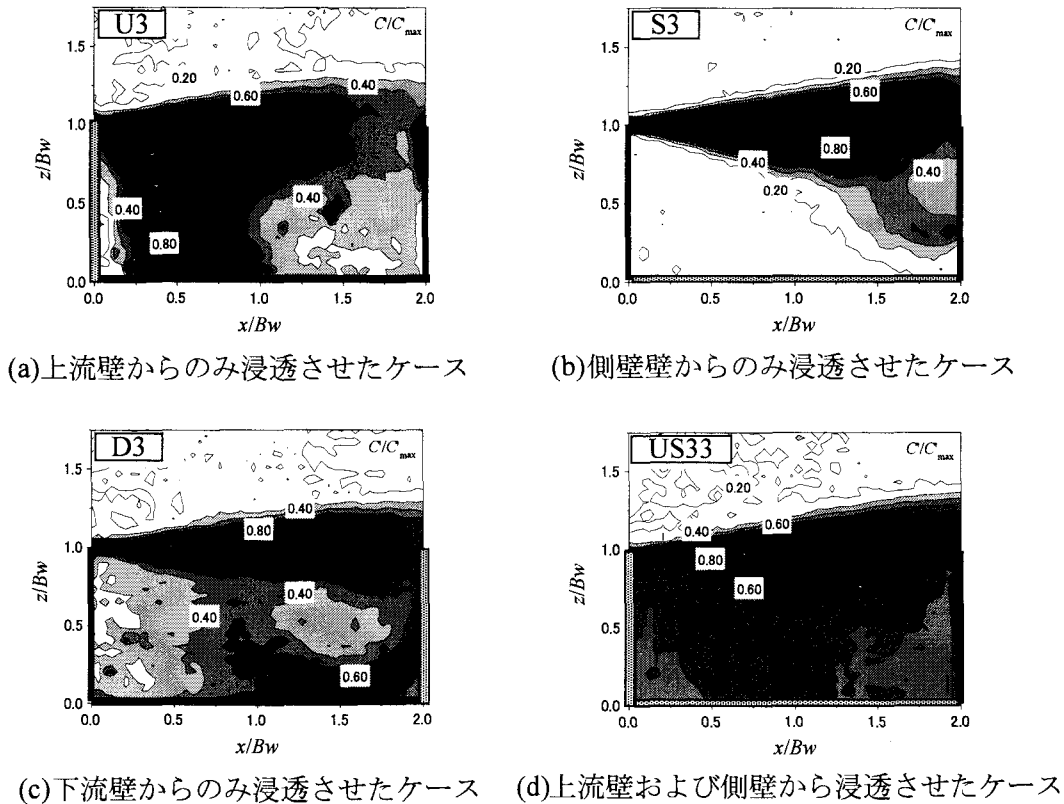


図-6 濃度変動の RMS 値分布 C_{rms}/C_{rms_max}

環渦が発生している領域はワンド内部では比較的高流速領域であるため、この領域で物質が停滞することはない、低流速領域に物質が停滞しやすいことが原因と考えられる。下流壁からのみ浸透させたケース D3 においても高濃度領域はワンド内部上流域で見られることは、このことが原因であり、下流壁からの浸透流が上流域まで循環渦により輸送された後停滞したものと考えられる。上流壁からのみ浸透させたケース U3 では他のケースに比べて下流域での濃度が低い。これは、上流壁からの浸透流が循環渦のリターンフローと衝突することにより下流域にまで分布が拡大することがないことが原因と考えられる。一方、側壁からのみ浸透させたケース S3 でも他のケースと同様、上流域において高濃度分布が確認される。これは、側壁からの浸透流が循環渦によって上流域へと供給されることが原因と考えられる。上流壁および側壁から浸透させたケース US33 では、上流域で見られる高濃度領域が他のケースに比べて

拡大し、ワンド内部における浸透水の支配率が増加していることがわかる。

(b) 物質交換速度

図-5 (a) ~ (d) に浸透流を流し始めてからのワンド内部の濃度分布変化の時系列 $C_{time}(t)$ を示す。ここで示す濃度は、濃度分布を次式を用いてワンド内部で空間平均したものである。

$$C_{time}(t) = \frac{1}{LB_w} \int_0^{LB_w} \int_0^{LB_w} c(t, x, z) dz dx \quad (1)$$

ここでは、浸透流を流し始めてワンド内部で時間的に一定となった濃度 C_0 を用いて無次元化した。ワンド内部に占める染料の割合が増加するに従って $C_{time}(t)/C_0$ は増加していく。

濃度変化の勾配に着目すれば、各浸透パターンにおいて浸透流量が増加すれば急勾配になることがわかる。また、浸透パターン毎に比較すれば、下流壁のみ、上流壁のみ、側壁のみ、上流壁および側壁か

ら浸透させたケースの順に勾配が増加している。浸透パターンによって物質交換特性に及ぼす影響が異なることが明らかとなった。

(c) 濃度変動の RMS 値分布

図-6(a)～(d)にワンド内部の濃度分布が一定になってからの濃度変動成分に関する RMS 値の等値線図を示す。ここで、任意点での濃度変動成分 $c(t, x, z)$ に関する RMS 値を C_{rms} と定義する。こうして得られた C_{rms} を各ケースの最大 RMS 値である C_{rms_max} を用いて無次元化した。

いずれのケースに関しても、ワンド内部と主流部との境界部において大きな値をとっている。これは、境界部での組織乱流渦の発生に起因した結果と考えられる。

各ケースに着目すると、上流壁からのみ浸透させたケース U3 では、境界部での値も大きい。ワンド内部上流域において最大値をとっている。上流壁からの浸透流と循環渦からのリターンフローが衝突することが原因となった濃度混合が活発に行われていると推測される。また、下流域での濃度変動が小さいことと時間平均濃度分布より、この領域には浸透流が輸送される量は少ないことが明らかとなった。側壁からのみ浸透させたケース S3 では、循環渦の位置と形状の変化に伴う C_{rms} 分布の変化が見られる。循環渦周辺でも C_{rms} の値は増加しており、濃度混合が生じていることがわかる。一方で、ワンド内部上流域での C_{rms} 値は小さく、濃度混合はさほど生じていないことがわかる。これは浸透流量が定常的に供給され、層流的流れ場になっていることが原因と考えられる。浸透流が発生していないケースとフローパターンが最も類似していたケース D3 の分布では、これまでに行われた浸透流を考慮しない流れ場での乱流統計量の分布と類似した分布をしている。循環渦周辺での C_{rms} 値も増加しており、循環渦に沿って物質混合が生じていることがわかる。上流壁および側壁から浸透させたケースでは、主流よりもむしろワンド内部での混合が大きくなっている。これは、2 方向からの浸透流が複雑に混合しあったことが原因と考えられる。

4. 結論

浸透流を導入したワンド流れ周辺での流れ特性および物質交換特性に関する可視化実験を行った。実験条件としては、浸透パターンと浸透流量を変化させた。これによって得られた結果を以下に示す。

- (1) 下流壁からのみ浸透させたケースでは、ワンド内部で発生する大規模循環渦の中心位置が上流側へ移動する。一方、上流壁あるいは側壁からのみ浸透させたケースでは、浸透流量の増加に伴って循環渦の中心位置は下流側へ移動する。さらに、上流壁および側壁からの浸透させたケースでは下流側かつ主流部側へ移動する。
- (2) 浸透流が流れ場に及ぼす影響は、(a)上流壁およ

び側壁、(b)側壁、(c)上流壁、(d)下流壁からの浸透流の順で大きい。

- (3) ワンド内部上流域では高濃度分布であり、循環渦が発生している領域では低濃度分布であることが確認された。流速の大小によって物質が停滞するか否かのためである。
- (4) 物質交換速度は浸透流量が増加するに従って増加する。また、(2)の順で物質交換速度が減少する。
- (5) 主流部とワンド内部との境界部において物質混合が活発であった。一方、上流壁からのみ浸透させたケースでは、浸透流と循環渦との衝突地点での物質混合が顕著であった。

参考文献

- 1) 八木俊策：凹部界面における渦の発生・成長と水交換、第 27 回水理講演会論文集、pp.813-819, 1983.
- 2) Deblor, W. and Armfield, S. W.: The purging of saline water from rectangular and trapezoidal cavities by an overflow of turbulent sweet water, *J. Hydraulic Res., IAHR*, vol. 35, pp.43-62, 1997.
- 3) 東野誠, 神田徹：開水路凹部流れにおける水・底泥間の物質移動, 水工学論文集, 第 44 巻, pp.1077-1082, 2000.
- 4) Langendoen, E. J., Kranenburg, C. and Booij, R.: Flow patterns and exchange of matter in tidal harbours, *J. Hydraulic Eng., ASCE*, vol. 32, pp.259-270, 1994.
- 5) Kantardgi, I.: Groin area water exchange, *J. Hydraulic Res., IAHR*, vol. 34, pp.161-172, 1996.
- 6) Uijtewaal, W. S., Lehmann, D. and Mazijk A. V.: Exchange processes between a river and its groyne fields: model experiments, *J. Hydraulic Eng., ASCE*, vol. 127, pp.928-936, 2001.
- 7) 富永晃宏, 谷川幸男, 久田陽史：人工わんどの水交換機構とその制御法に関する研究, 水工学論文集, 第 46 巻, pp.571-576, 2002.
- 8) (財)河川環境管理財団 大阪研究所：わんどの機能と保全・創造, 1999.
- 9) 河川懇談会共同研究研究成果報告書：ワンドの水理特性と河川環境, 2002.
- 10) Onitsuka, K., Nezu, I. and Takahashi, S.: PIV measurements of side-cavity open-channel flows with several shapes of open-mouth, *Proc. of 13th APD-IAHR Congress, Singapore*, pp.50-55, 2002.
- 11) Muto, Y., Imamoto, H. and Ishigaki, T.: Velocity measurements in a straight open channel with a rectangular embayment, *Proc. of 12th APD-IAHR Congress, Bangkok*, pp.353-362, 2000.
- 12) 木村一郎, 細田尚, 村本嘉雄：開水路流れ死水域周辺の水面変動・流体混合特性, 水工学論文集, 第 41 巻, pp.711-716, 1997.
- 13) Czernuszenko, W. and Rowinski, P. M.: Properties of the dead-zone model of longitudinal dispersion in rivers, *J. Hydraulic Res., IAHR*, vol. 35, pp.491-504, 1997.
- 14) Chen, D. and Jirka, G. H.: LIF study of plane jet bounded in shallow water layer, *J. Hydraulic Eng., ASCE*, vol. 125, pp.817-826, 1999.
- 15) 棚津家久, 鬼束幸樹, 高橋俊介, 矢野勝士：側壁に凹部を有する開水路乱流における物質交換特性, 土木学会関西支部年次学術講演概要集, 2002.

(2003. 10. 1 受付)