

PIVによる開水路凹部流れの計測および数値解析

*Velocity Measurement by Using PIV and Numerical Simulation
in Open channel Trench*

宮本仁志*・神田 徹**・藤田一郎***・池上 迅****

By Hitoshi MIYAMOTO, Tohru KANDA,

Ichiro FUJITA and Jin IKEGAMI

The flows in two types of open channel trench are experimentally examined by using PIV method and are numerically analyzed by $k-\varepsilon$ turbulence model; Considered here are the flow in the full width trench and that in the half width trench. The spatial distribution of instantaneous velocity vectors and turbulent flow behavior are clarified in the trench section using PIV. Mean flow velocity and Reynolds stress measured by PIV are compared with those simulated by $k-\varepsilon$ turbulence model. The flow characteristics obtained by the two methods agree with each other fairly well.

Keywords: velocity measurement, PIV, numerical simulation, $k-\varepsilon$ model, trench, turbulence

1. はしがき

近年の河川整備計画においては、自然生態系の保全が考慮され、流域住民に憩いの場を提供し得る河川環境を創造することが重要となっている。そのような河川空間を創出するためには、河道形状を変化させ多様な生態環境が存在し得る種々の流況をつくり出すことも工学的立場から必要であろう。瀬や淵をもつ流れはその典型であるが、その水理学的特性のみについてさえ未解明な部分が大きい。本研究はそのように複雑な河道形状における流況特性を明らかにすることを目標とするが、本文では以下に述べる単純な開水路形状を対象に現象解明のための実験および数値解析手法の検討を行い、さらに種々の水路形状における流れの解析に発展させることを意図するものである。

水路床にトレンチなどの凹地を設置した開水路流れは、流入水量・凹地形状・空間配置などによって様々な流況を呈する。ここでは、(1)水路床の全幅にわたり凹部が存在する場合、(2)水路床の半幅に凹部が存在する場合、の二種類の開水路流れを対象とし、凹地位置・凹部深さなど形状の違いによる平均流・乱流諸量の変化を室内水理実験により検討する。水路内の流動特性を把握するため、PIV(Particle Image Velocimetry)を用いた画像計測法により流れ場の流況・乱流諸量などの情報を得る。また模型実験と同一の水理条件下において、 $k-\varepsilon$ 乱流モデルを適用した三次元数値シミュレーションによる開水路流れの再現を試みる。

*	正会員	修士(工学)	神戸大学助手	工学部建設学科	(〒657 神戸市灘区六甲台町 1-1)
**	正会員	工博	神戸大学教授	工学部建設学科	(〒657 神戸市灘区六甲台町 1-1)
***	正会員	学博	岐阜大学助教授	工学部土木工学科	(〒501-11 岐阜市柳戸 1-1)
****	学生会員		神戸大学大学院 自然科学研究科博士前期課程	(〒657 神戸市灘区六甲台町 1-1)	

2. 対象とする開水路流れ

図-1 に本研究で用いた開水路模型実験水路の模式図を示す。実験水路は全長が 500cm、幅が 20cm のアクリル製の水路を使用し、上流水槽より 330cm の位置に凹部を設けている。図-1(a)は水路の全幅に凹部を設けたものであり、筆者ら¹⁾(1996)が PIV および LES により流動・乱流構造の検討を行っている。図-1(b)は水路半幅に凹部を設けた場合であり、凹部が水路内に局所的に設置されている。表-1 に実験水路の凹部形状を示す。流量は $Q=757.6(\text{cm}^3/\text{sec})$ 、流入水深は $H_0=3.0(\text{cm})$ 、断面平均流速は $U_0=12.63(\text{cm}/\text{sec})$ 、レイノルズ数は $Re = H_0 U_0 / \nu = 3800$ で一定とした。筆者らの報告²⁾(1996)を参考にし、凹部深さ D を系統的に変化させることにより、凹部底面で再付着点が存在する流れからキャビティ流的な循環流が形成される流れまでを実験で発生させた。

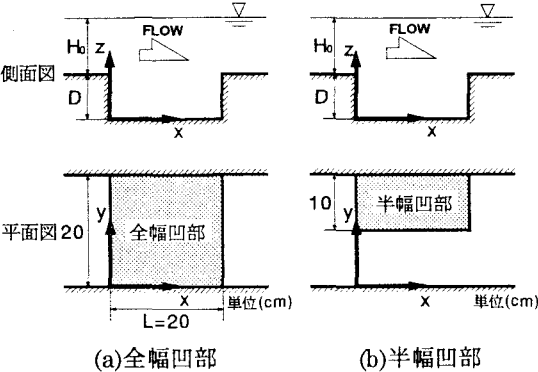


図-1 実験水路の模式図

表-1 実験水路の凹部形状

	凹部幅	凹部深さ D
CASE1	全幅	2cm
CASE2	全幅	3cm
CASE3	全幅	4cm
CASE4	半幅	2cm
CASE5	半幅	3cm
CASE6	半幅	4cm

3. PIV による画像計測

3.1 計測法

図-2 に画像計測システムの概要を示す。比重 1.02、粒径 0.075~0.15mm の高分子ポリマー粒子をトレーサーとして流水中に投入し、流況を可視化した。トレーサー粒子が水路全体に混合した後、スリット状にしたヘリウム・ネオンレーザー光を開水路鉛直・水平断面に照射する。可視化画像を CCD カメラで撮影しビデオテープに収録する。ビデオ画像は画像メモリーボード搭載のパーソナルコンピュータに 512×512 画素、256 階調のバイナリーデータとして保存する。

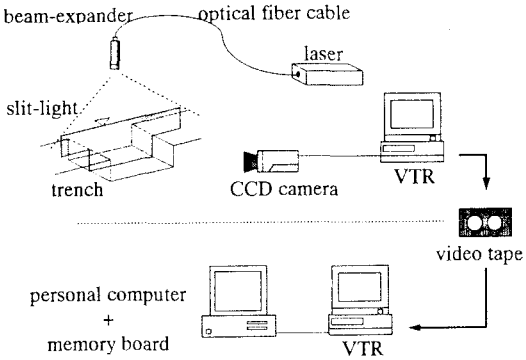


図-2 計測システムの概要

3.2 相関法による画像処理

実験で得られた画像を濃淡画像相関法(PIV)³⁾により解析し、鉛直・水平断面内の流速分布を求める。この手法では連続する二枚のトレーサー画像を使用する。第一画像中で着目点を中心に取り出した参照フレーム内の濃度パターンが第二画像中のどの位置に移動したかを相互相関係数を用いたパターンマッチングにより調べる。算出された相互相関係数の中で最大値をとる参照フレームの位置が、着目点を中心とする周囲の流体塊が平均的に移動した位置を示している。従ってその移動距離と二枚の画像の時間差 Δt を用いて流速ベクトルが求められる。

3.3 異常ベクトルの補正

相関法はパターンマッチングに失敗すると、周囲の流況と著しくかけ離れた異常流速ベクトルを発生させる。ここでは局所的な発散値の増大をもって異常値を検出・除去し、それを周囲の正常値を用いて補間するアルゴリズム³⁾を適用した。今回の実験における異常ベクトルの発生確率は約 2%以下であった。

4. $k-\varepsilon$ 乱流モデルによる数値シミュレーション

4.1 解析モデル

基礎方程式はレイノルズ平均を施した質量保存式, x, y, z -方向運動方程式であり, これらを有限体積法により離散化し数値解析を行う。乱流項を完結するために $k-\varepsilon$ 二方程式モデル⁴⁾を採用する。モデル定数については Launder-Spalding が推奨する標準値を使用した。実際の計算は, 流入水深 H_0 と流入断面平均流速 U_0 で基準化した無次元空間上で行った。

$$a) \quad \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$b) \quad \frac{\partial}{\partial x_j} (U_i U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{1}{Re} + \nu_t \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right\} - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$c) \quad \frac{\partial}{\partial x_i} (U_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\frac{1}{Re} + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right\} + \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (3)$$

$$d) \quad \frac{\partial}{\partial x_i} (U_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\frac{1}{Re} + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right\} + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

ここで, $(U_i, i=1,2,3): (x,y,z)$ 方向の平均流速成分, p : 平均圧力, k : 乱流運動エネルギー, ε : 乱流エネルギー散逸率, $\nu_t = c_\mu k^2/\varepsilon$: 渦動粘性係数, $Re = U_0 H_0/\nu$: Reynolds 数である。

4.2 境界条件および壁面近傍の取扱い

数値解析を行う計算領域および計算格子を図-3に示す。上流側境界の流入条件を三次元分布として与えるため, 流入水深の 100 倍の長さを持つ矩形開水路において初期流入流速の断面平均流速を U_0 乱流諸量 k, ε を微小な値として与え, 境界層を発達させることにより流入境界条件を作成した。水表面境界においては, 水面変動はないものと仮定して対称条件を用い, 下流側境界は吹き出し条件とした。

初期値として, 流速に関しては, $U, V, W=0$ とし, k, ε については適当に小さな値を与えた。

壁面近傍の取扱いについては, 平均量については壁法則を, 乱流諸量に関しては道奥ら⁵⁾(1993)と同一の取扱いとした。これは $y^+ < 40$ の領域において実験的関数形で表された乱流諸量を導入することにより, 場所によって異なる壁面近傍の乱れを表現するものである。

4.3 数値計算法

計算格子は壁面近傍で密となる不等間隔格子を採用し, 上流側・下流側に, それぞれ流入水深 H_0 の 6 倍, 3 倍の矩形開水路部を設けた(図-3)。流速と圧力の定義点異なるスタッガード格子を使用し, 収束解は SIMPLE アルゴリズムを用いて求めた。

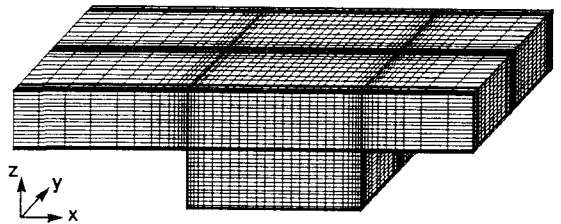


図-3 数値解析の計算領域および計算格子の例 (CASE2: 格子数(52×36×34))

5. 実験および解析結果と考察

5.1 PIV 計測による凹部流れの経時変化

図-4に CASE2 の鉛直中央断面における瞬間流速ベクトルの PIV 測定結果の一例を示す。画像計測法は, 従来の点計測法と比較すると精度が若干劣るものの, 非接触で多点同時計測が可能であり, 瞬時に移り変わる流れの全体像を把握できるという特徴を有する。(凹部-主流)境界面において主流は

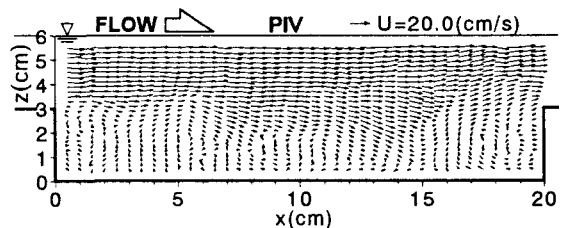


図-4 鉛直中央断面の瞬間流速ベクトル (CASE2) (全幅凹部: $D=3\text{cm}, y=10\text{cm}, Re=3800$)

激しく波打ち、 $x=6\sim 15\text{cm}$ で主流が凹部内に深く潜り込んでいる。これより、後述する平均化操作を施した流況からは得ることのできない流れの非定常性に関する情報を得ることができる。

図-5 は、CASE2 の鉛直中央断面における z -方向流速 W の時空間相関分布を示している。ここでは、 $(x,y,z)=(2.0,10.0,3.0)\text{cm}$ を基点として、ラグタイム τ に対する時空間の相関係数を算出している。 $\tau=0\text{sec}$ (同時空間相関)では、 x -方向にほぼ $2\sim 3\text{cm}$ 毎に高相関値が分布し、時間の経過に伴い対応する高相関領域が下流側に移動している。これは、凹部内における周期性を持つ流れ(擾乱)の存在・移流を示唆するものであり、凹部上流端近傍で周期的な擾乱が発生していることが推察できる。

5.2 全幅凹部(図-1 (a))の流況

図-6~8 に CASE1~3 の鉛直中央断面における平均流速ベクトルの PIV 計測および数値解析の結果を示す。図-6 では凹部深さが比較的浅いため上流側凹部境界で剥離した流れは凹部底面で再付着している。下流側段上がり部では断面が急縮するため、鉛直上向きの流況を呈している。図-7 では凹部内において再付着点は定常的には存在せず、上流側に大規模循環、下流側に小規模の循環が生じている。図-8 は凹部深さが比較的深い場合であり凹部全域を循環する微小流速が存在するのみである。いずれの場合にも測定値と計算値は良好な一致を示している。

図-9 に CASE1 の鉛直中央断面における x -方向平均流速 U および z -方向平均流速 W の PIV 計測値と数値解析値を示す。主流方向である U の鉛直分布に関して、PIV と $k-\epsilon$ モデルは良好な一致を示している。 W

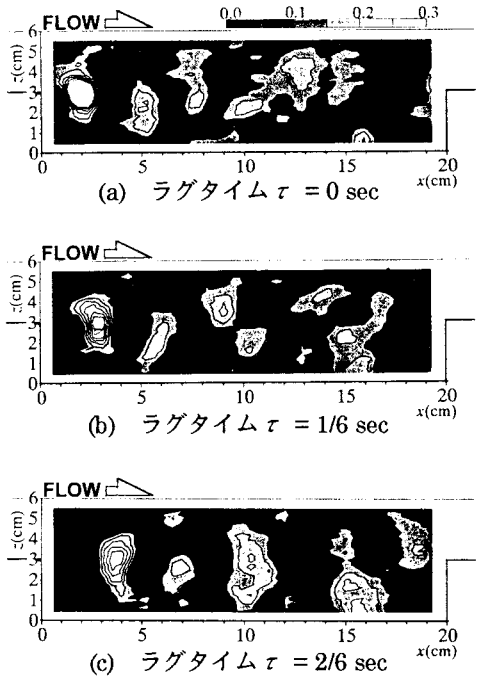


図-5 鉛直中央断面の z -方向流速 W の時空間相関分布 (CASE2)

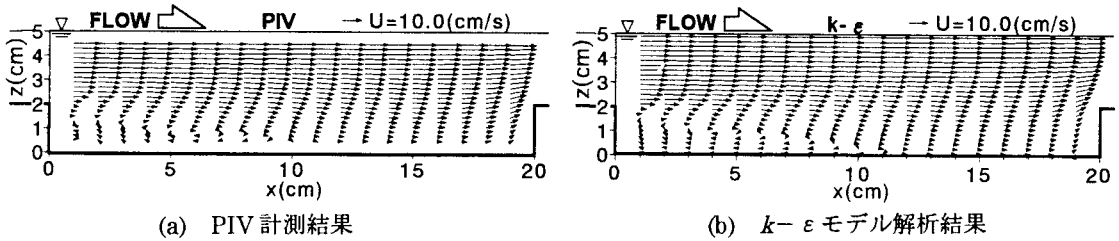


図-6 鉛直中央断面の平均流速ベクトル (CASE1)
(全幅凹部: $D=2\text{cm}$, $y=10\text{cm}$, $Re=3800$)

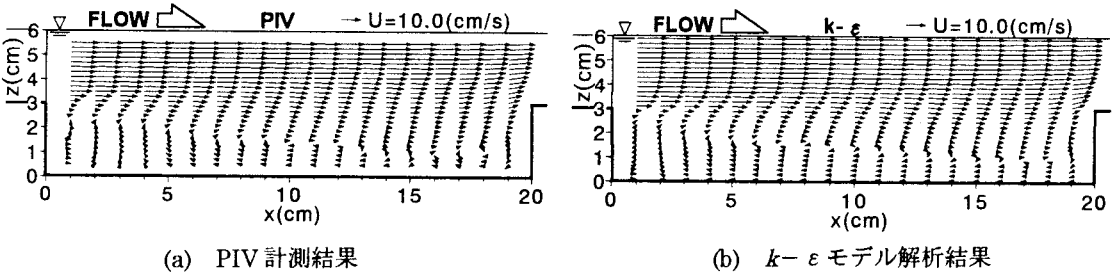


図-7 鉛直中央断面の平均流速ベクトル (CASE2)
(全幅凹部: $D=3\text{cm}$, $y=10\text{cm}$, $Re=3800$)

の鉛直分布については、上流側死水域および下流側段上がり部において若干の不一致が見られるが、凹部内ではほぼ良好な一致が得られている。

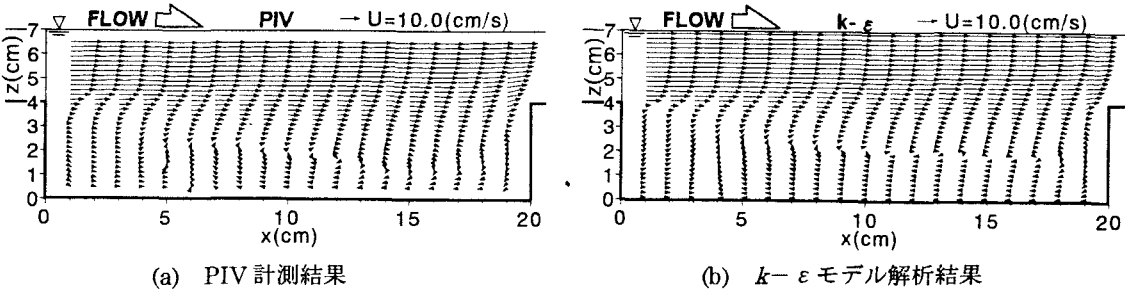


図-8 鉛直中央断面の平均流速ベクトル (CASE3)
(全幅凹部: $D=4\text{cm}$, $y=10\text{cm}$, $Re=3800$)

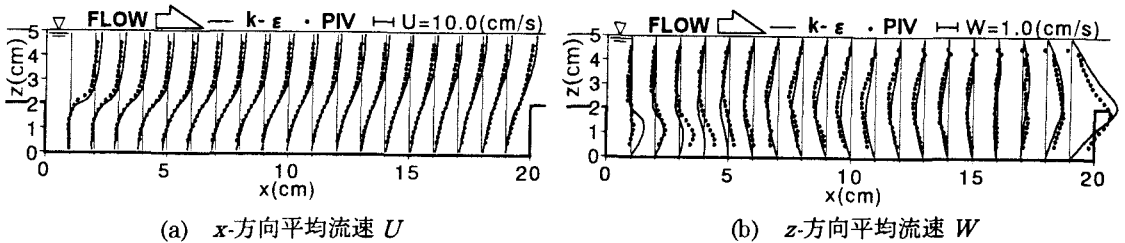
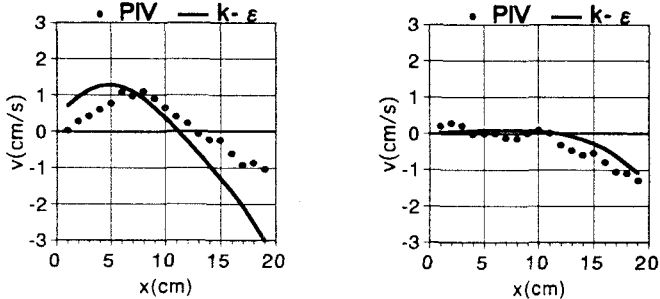


図-9 鉛直中央断面における平均流速分布 (CASE1)
(全幅凹部: $D=2\text{cm}$, $y=10\text{cm}$, $Re=3800$)

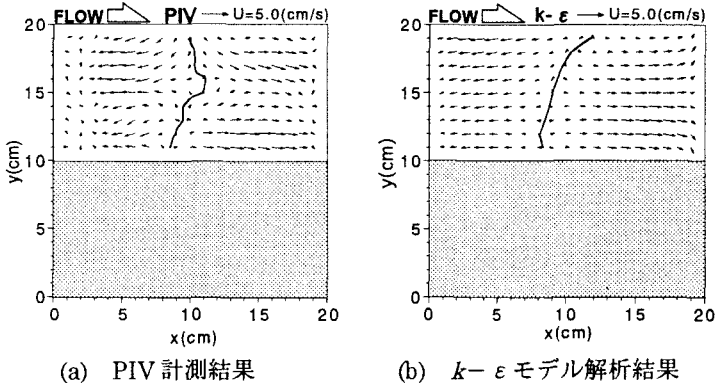
5.2 半幅凹部(図-1(b))の流況

図-10は、半幅凹部水路における(凹部-主流)境界面直上での水路中央線に沿った y -方向流速 V を示したものである。凹部が断面内の片側に設置されているため主流が上流側より凹部内に流入し、下流側では逆に凹部から流出している。また、CASE4の方がCASE6に比べて相対的に大きな値を示している。これは、凹部深さ D が浅いほど主流の運動エネルギーが凹部全体に伝搬しやすく、凹部内の流動が活発になるためと考えられる。計測値と計算値は、凹部深さ D の浅いCASE4の下流側流出部を除き、良好な一致を示している。

つぎに、図-11にCASE4の凹部底面近傍での平均流速ベクトルおよび再付着点位置(実線)を示す。ここでは、水平流速ベクトルの絶対値



(a) CASE4 ($D=2\text{cm}$, $y=10\text{cm}$, $z=2.25\text{cm}$, $Re=3800$)
(b) CASE6 ($D=4\text{cm}$, $y=10\text{cm}$, $z=4.25\text{cm}$, $Re=3800$)
図-10 半幅凹部水路における(凹部-主流)境界面直上での y -方向平均流速 V



(a) PIV計測結果
(b) $k-\epsilon$ モデル解析結果
図-11 半幅凹部底面近傍の平均流速ベクトルおよび再付着点位置(CASE4: $D=2\text{cm}$, $z=0.25\text{cm}$, $Re=3800$)

が0となる位置を再付着点とした。凹部上流端で剥離した流れは凹部のほぼ中央において再付着し、上流側に逆流域を形成している。再付着点は凹部内壁近傍ほど上流側に移行している。これは側方からの主流の落ち込みによる運動量供給のためと考えられる。

5.3 乱流諸量の鉛直分布

図-12に、CASE1, 4における凹部中央断面でのレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ 分布を示す。凹部深さ D が浅く、前述のように凹部内部へ主流が落ち込むため、レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ のピーク値も凹部内部に移行している。 $k-\varepsilon$ モデルは定性的には現象を再現しているが、下流側段上り部でレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ を過大評価するなど詳細な現象再現はなされていない。これは、 $k-\varepsilon$ モデルが等方性乱流を仮定しており、水路断面形状の急縮による乱れの非等方性を十分に表現できないためと考えられる。

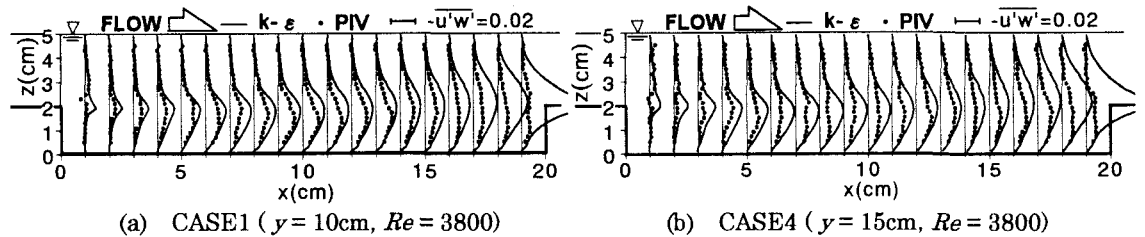


図-12 凹部中央断面におけるレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ 分布($D = 2\text{cm}$)

6. 結論

PIVを用いた画像計測法および $k-\varepsilon$ 乱流モデルによる数値解析により、水路床に凹部を有する開水路流れの特性を調べ、両手法の有効性を検討した。得られた結果を以下に列挙する。

- (1)凹部を有する開水路流れの瞬間の流況は、(凹部-主流)境界面が激しく波打つ非定常性の強いものであり、凹部内では周期的な流れ(擾乱)が下流側へ移流している。
- (2)凹部深さの増大に伴い、流況は凹部底面に再付着する流れから凹部全域を循環する流れへと変化する。その遷移過程では、上流側の循環流に加え凹部下流側隅角部にも循環流が発生する複雑な流況を呈する。
- (3)半幅凹部を有する開水路流れでは、主流部と凹部の間で側方からの流体塊の流入が確認できる。また、流入量に関しては、再付着点を有する浅い凹部の方が、凹部に循環流を形成する深い凹部に比べて大きな値をとる。
- (4)PIVと $k-\varepsilon$ モデルの結果の比較より、時間平均流速分布に関しては、両者の結果は概ね良好な一致を示し、 $k-\varepsilon$ モデルの有効性が認められた。しかし、レイノルズ応力に関しては下流側段上り部で両者の結果に大幅な相違が見られるので、乱流諸量の評価については、 $k-\varepsilon$ モデルは検討の余地があると考えられる。

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.
- 2) 池上 迅・神田 徹・藤田一郎・宮本仁志・岡本直久：水路床に凹部を有する開水路流れの特性，土木学会第 51 回年次学術講演会概要集，1996.
- 3) Fujita, I. and Kaizu, T. : Correction method of erroneous vectors in PIV, Jour. of Flow Visualization and Image Processing, Vol. 2, pp. 173-185, 1995.
- 4) Rodi, W. : Turbulence models and their application in hydraulics - A state of the art review, Book Publication of International Association for Hydraulic Research, 2nd Ed., 1984.
- 5) 道奥康治・辻本剛三・宮本仁志：吹送密度流の流動・混合特性，水工学論文集，Vol. 37，pp. 293-298，1993.