

## 第 部門 密度関数に基づく開水路側岸凹部流れの LES 解析

神戸大学工学部	学生員	門谷 健	神戸大学自然科学研究科	学生員	樫 涼太
神戸大学自然科学研究科	学生員	松原 隆幸	神戸大学工学部	学生員	宝来 佑太
神戸大学工学部	正会員	藤田 一郎			

1. はじめに 本研究では、密度関数を移流させることにより 2 相流体の界面変動を扱うことのできる手法を 3 次元乱流モデルに用い、側岸に凹部を有する開水路流れの解析を行った。また解析精度検証のため、可視化画像解析に基づく実験を行った。

2. 計算手法 基礎方程式の解法としては Fractional Step 法を用いた。N-S 方程式から圧力項を除き時間微分項を差分近似すると、式(1)となる。ここで  $\mathbf{v}^*$  は次の時間ステップでの仮速度、 $\mathbf{F}$  は外力とする。

$$\mathbf{v}^* = \mathbf{v}^n + \Delta t(-(\mathbf{v}^n \cdot \nabla)\mathbf{v}^n + \nu \nabla^2 \mathbf{v}^n + \mathbf{F}) \quad (1)$$

Fractional Step 法では、この  $\mathbf{v}^*$  を基にして圧力を式(2)で示されるポアソン方程式で求め、更新された圧力値を用いて式(3)から次の時間ステップでの速度値を求める。

$$\nabla^2 \phi^{n+1} = \nabla \cdot \mathbf{v}^* / \Delta t \quad (2)$$

$$\mathbf{v}^{n+1} = \mathbf{v}^* - \Delta t \nabla \phi \quad (3)$$

$\phi$  は、局所圧力  $p$  及び局所密度  $\rho$  より  $\phi = p/\rho$  で与えられる。密度は非圧縮性を仮定し、密度関数  $\phi$  (液相で 1, 気相で 0)を用いて以下の式から求める。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \mathbf{v}) = 0 \quad (4)$$

$$\rho = \rho_a(1 - \phi) + \rho_w \phi \quad (5)$$

ここに  $\rho_a$  は空気の密度、 $\rho_w$  は水の密度を示す。

移流方程式の差分には 2 乗量保存型中央差分法、ポアソン方程式に SOR 法、密度関数の移流項に風上差分を使用し、渦粘性係数は標準 Smagorinsky モデルを用いて計算する。

3. 可視化実験 実験には、長さ 4m、主流幅 15cm の循環式開水路を製作して行った。側岸凹部は、水路の中央付近に設置し、アスペクト比が自在に変えられるように工夫しているが、今回の比較では、奥行  $b=5\text{cm}$ 、長さ  $L=40\text{cm}$  のアスペクト比が  $As=L/b=8$  のケースを対象とした。実験においては若干のせき上げを行い、等流に近い状態を保つようにした。

水路床勾配は 1/300、平均水深は 4.1cm、フルード数は  $Fr=0.8$  である。可視化にはレーザーライトシートを用い、水平の 3 つの断面に照射して得た可視化映像を水路床側から高速度ビデオカメラで撮影し、PIV 解析に用いた。

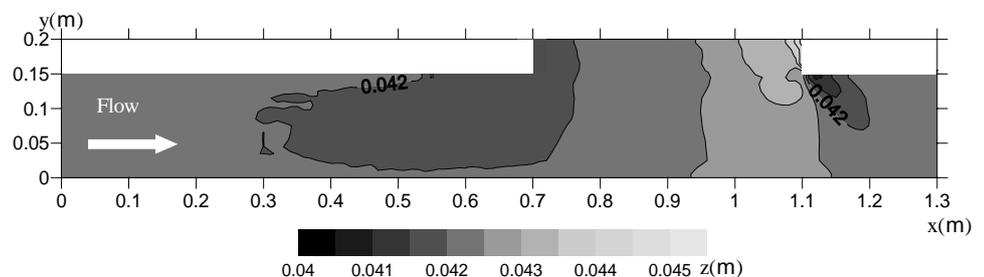


図-1 解析結果の時間平均水深分布

4. シミュレーションモデル 計算領域を図-1 に示す．解析においては流れ方向の境界条件を周期境界とした．格子数は， $130 \times 20 \times 40$  とした．このうち液相は計算空間の下半分の約  $1/2$  になるように設置した．時間ステップは  $10^{-4}(\text{sec})$  とし，実時間で 50～100 秒間のデータを用いて平均処理等を行った．

5. 解析結果および考察 図-1 に時間平均水深分布を示す．水深が凹部下流端において最も高く，凹部の下流側で局所的に低下している様子が再現されている．また，凹部のある断面では全体的に水位が上昇している様子が得られた．

図-2 は PIV によって求めた内部流速ベクトルと解析結果の時間平均流速ベクトルの比較であり，それぞれ底面からの高さ  $z$  が 1cm, 2cm, 3cm における凹部内の流速分布を示している．主流部から凹部内へ流れ込むベクトルは実験および解析のどちらにおいても  $z=1\text{cm}$  において最も強くなっており，それに対して  $z=3\text{cm}$  付近では主流部と凹部の境界においても流速ベクトルはほぼ主流方向を向いていることがわかる．

図-3 は図-1 の  $x=0.9\text{m}$  における下流側から見た横断面流速ベクトル分布を示している．上側の白色の部分が気相，下側の灰色の部分が液相を表している．底面付近から凹部内に向かった流速ベクトルが反時計回りに回って水面付近では再び主流方向へ向かう流れが再現されている．

6. おわりに 開水路側岸凹部流れの3次元解析と実験を行い比較的良好な結果が得られた．実験では周期的な水面変動等も確認されているので，今後，解析においても詳細に検討を進める予定である．

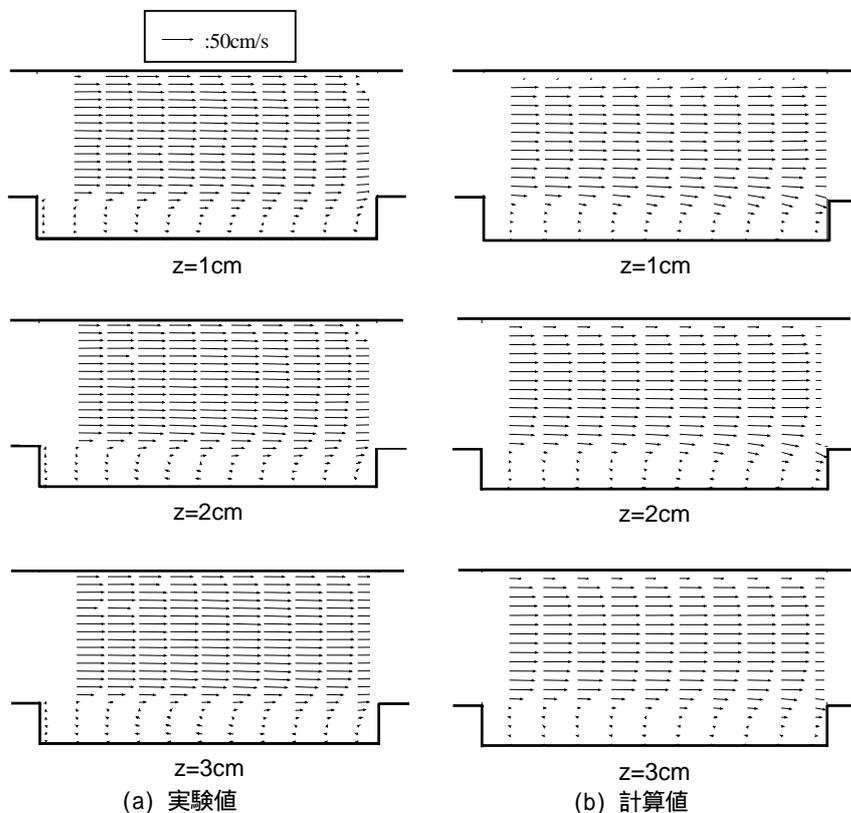


図-2 水辺断面における実験および解析結果の比較

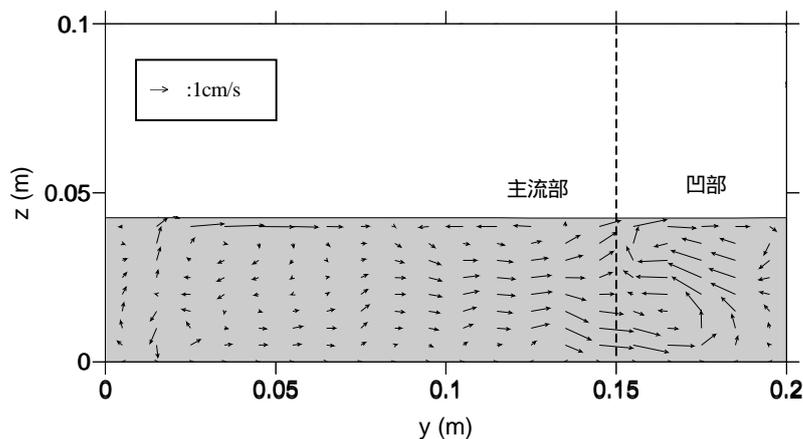


図-3 凹部内横断面の流速分布 ( $x=0.9\text{m}$ )

参考文献

1. Fujita, I., Ozawa, J. and Nagahama, K.:Hydraulic Characteristics of open-channel flow with a side concavity,Advances in Fluid Modelling & Turbulence Measurements (Proceeding of the 8th International Symposium on Flow Modeling and Turbulence Measurements )(FMTM2001),pp.39-46,2001.