

第II部門

T型合流部下流で生じる剥離域の制御に関する研究

| | | |
|--------------|-----|--------|
| 神戸大学大学院工学研究科 | 学生員 | ○北田 真規 |
| 神戸大学大学院工学研究科 | 正会員 | 藤田 一郎 |
| 神戸大学大学院工学研究科 | 学生員 | 伊藤 崇博 |
| 神戸大学大学院工学研究科 | 学生員 | 戸田 敦士 |

1. 前書き

都市域の中小河川ではT字状に合流する機会が多く、洪水時には剥離域が生じることで通水性が低下する懸念がある。このような剥離渦は、下流側の隅角部に曲率を与えることにより、その発生を抑制することができるはずである。そこで、本研究では、T型合流部における表面流の実験及び2DのNavier Stokes方程式を格子ボルツマン法での解析し、曲率の効果に関する検討を行った。

2. 実験

2.1 実験水路

実験には幅50cm、本流長さ8m、支流長さ2.5m、深さ30cmのガラス製水路の中で任意の合流形状、任意の支流幅の合流水路を簡易に組み立てられるような工夫をした水路を使用した。上流より2mの位置が合流点になるように設置し、合流角は90度で固定している。本実験では合流前の水路幅を本流側50cm、支流側25cmとした。

2.2 実験方法

表面流速の計測にはLSPIV(Large Scale Particle Image Velocimetry)を用いる。撮影にはディテクト社製の高速ビデオカメラを使用した。画像サイズは1080*992(pixel)、フレームレートは100fpsとし、40秒間撮影することで4000枚の画像を撮影した。可視化に使用するトレーサーはおがくずを用いた。広範囲にわたって撮影するため、カメラを水路上方に取り付け、斜め向きのアングルから撮影を行った。撮影画像は幾何補正を行い、真上から見た画像へと変換する。画像サイズは1853*676(pixel)とした。

2.3 実験ケース

ここでは、実験ケースとして、支流側の流入流量(Q₂)と合流後の流出流量(Q₃)の比(Q_r=Q₂/Q₃)の値が0.50となるケースをとりあげる。合流形状としては、直角とR=25cm、12cm、5cmを比較する。

2.4 実験結果

実験結果のうち、渦度分布の平均値を図-1に示す。この結果から、曲率半径の増加によって、剥離域が小さくなっており、R=25cmでは剥離渦がほとんど発生していないことがわかる。

3. 格子ボルツマン方程式

3.1 基礎方程式

格子ボルツマン方程式(Lattice Boltzmann Method 以下、LBM)は、流体を格子上を移動する仮想粒子の集合体として仮定し、粒子の並進・衝突の時間発展をLB方程式により計算してマクロな流れの諸量を求めるメゾスケールの解析手法である。

キーワード 合流, 剥離渦, LSPIV, 格子ボルツマン法

連絡先 〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1 078-803-6439

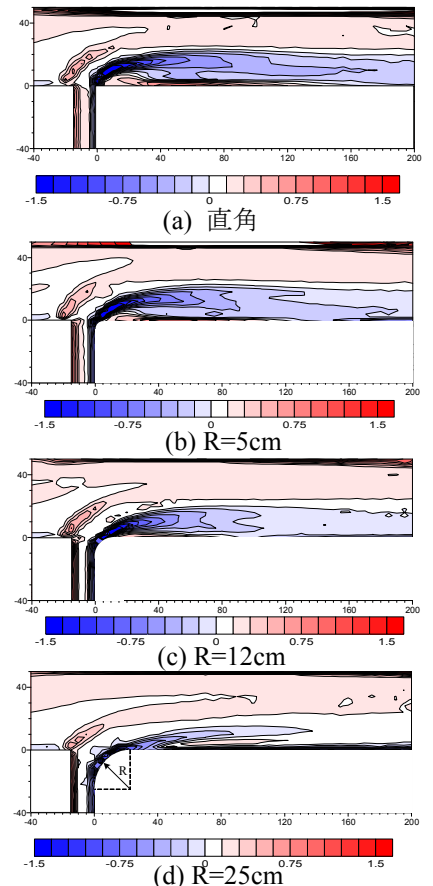


図-1 実験による渦度分布

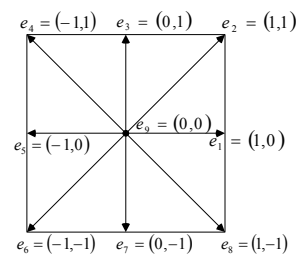


図-2 次元9速度方向格子

本研究では Navier Stokes 方程式を対象とした 2 次元 9 速度の LBM を使用し、そのときの格子パターンに図-2 の 2 次元 9 速度モデルを使用する. ここで、 \mathbf{e}_α ($\alpha=1\sim 9$)は α 方向の粒子の速度ベクトルを表し、LBM の基礎式である、LB 方程式と局所平衡分布関数は以下の式(1), (2)を使用する.

$$f_\alpha(\mathbf{x} + \mathbf{e}_\alpha \Delta t, t + \Delta t) - f_\alpha(\mathbf{x}, t) = -\frac{1}{\tau}(f_\alpha - f_\alpha^{eq}) + \frac{\Delta t}{6e^2} e_{\alpha i} F_i \quad (1) \quad f_\alpha^{eq} = \begin{cases} \frac{4}{9} \rho \left(1 + \frac{3}{e^2} e_{\alpha i} u_i + \frac{9}{2e^4} e_{\alpha i} e_{\alpha j} u_i u_j - \frac{3}{2e^2} u_i u_i \right) & \text{for } \alpha = 9 \\ \frac{1}{9} \rho \left(1 + \frac{3}{e^2} e_{\alpha i} u_i + \frac{9}{2e^4} e_{\alpha i} e_{\alpha j} u_i u_j - \frac{3}{2e^2} u_i u_i \right) & \text{for } \alpha = 1, 3, 5, 7 \\ \frac{1}{36} \rho \left(1 + \frac{3}{e^2} e_{\alpha i} u_i + \frac{9}{2e^4} e_{\alpha i} e_{\alpha j} u_i u_j - \frac{3}{2e^2} u_i u_i \right) & \text{for } \alpha = 2, 4, 6, 8 \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 f_α は粒子の分布関数、 $\mathbf{x}=(x_1, x_2)=(x, y)$ 、 τ は緩和時間係数、 f_α^{eq} は局所平衡分布関数、 $\mathbf{e} = \Delta \mathbf{x} / \Delta t$ 、 $\Delta \mathbf{x}$ は格子サイズ、 Δt は時間ステップ、 t は時間、 F_i は i 方向の外力成分、 u_i は速度成分、 ρ は流体密度を表している.

3.2 LBM の手順

LBM は、仮想粒子の並進と衝突の 2 つの過程を繰り返すことで流体の運動を計算する方法で、並進過程においては、粒子は速度に応じた方向の隣接する格子点へと移動し、衝突過程においては、粒子分布が単一割合で局所平衡状態へ再配分される. これを式で表すと、式(1)のようになり、左辺が並進過程を、右辺の第 1 項が衝突過程を、右辺の 2 項目は外力項をそれぞれ表している.

3.3 境界の取り扱い

本研究で使用する LBM の境界条件は、Bounceback 条件と呼ばれる、No-Slip 条件を使用する. これは壁面の格子点における分布関数は 9 方向のうち、6 方向は並進過程の段階で決定されるが、壁面から流体方向への 3 つの分布関数は未知であるため、壁面に入射してくる粒子は、壁面で跳ね返る際に元来た方向に跳ね返るようにすることで、未知の分布関数を決定するという手法である. これを構造物を設置したい格子番号に対して有効にすることで、容易に任意の境界を設定できる.

3.4 結果

計算で得られた渦度の瞬間分布を図-3 に示す. 隅角部で発生する剥離渦が良好に計算されており、曲率の追加により、剥離渦の領域が減少する様子が得られた. 本解析は、2 次元解析のため、図-1 と直接的には比較できないが、流量比が同じであれば、剥離域の規模や曲率の影響を定性的に検討できる. そこで、剥離域の幅(b)について比較したのが、図-4 である. これより、本解析結果は実験値をある程度、説明することができることがわかった.

4. あとがき

表面流を 2 次元 Navier Stokes 方程式を用いた LBM を使って計算を行い、概ね良好に再現できた. しかし、その直接的な比較は十分ではないため、今後は浅水流や 3 次元での計算および実験結果との比較を行う必要がある.

参考文献

1) 荒木健, 越村俊一: 格子ボルツマン法による自由表面流れの解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. B2-65, No. 1, 056-060, 2009.

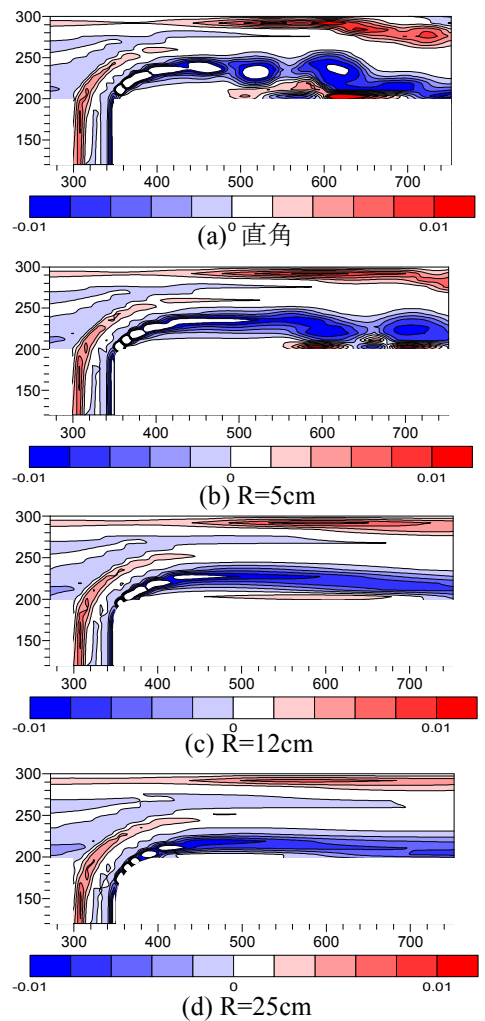


図-3 計算による渦度分布

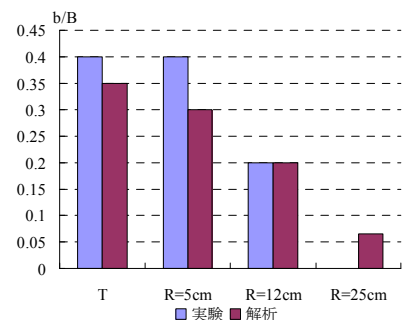


図-4 実験と計算による剥離域の幅の違い