

水面変動を伴う栈粗度流れの LES 解析

神戸大学大学院自然科学研究科 学生員 ○吉村 英人
 神戸大学大学院工学研究科 正会員 藤田 一郎

1. はじめに

我々はこれまで栈粗度流れ場における数値計算および実験を行ってきたが¹⁾、河川の流れの数値計算を行う場合、水面である自由表面の取り扱いが重要となってくる。本研究では、新たに自由表面モデルを取り入れ、栈粗度流れ場の数値計算を行った。

2. 数値計算法

計算は直交スタガード格子を用いた LES により行う。また、水面の取り扱いには気相と液相を同一の方程式で解くことが出来る気液二相流モデルである密度関数法²⁾を用いた。計算に用いたフィルタを施した非圧縮性流れの N-S 方程式、連続式、密度関数の保存式を以下に示す。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial}{\partial x_i} \{2\bar{\mu} S_{ij}\} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + g_i \quad (1) \quad \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\phi} \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3) \quad \bar{\rho} = (1 - \bar{\phi}) \rho_g + \bar{\phi} \rho_l \quad (4) \quad \bar{\mu} = (1 - \bar{\phi}) \mu_g + \bar{\phi} \mu_l \quad (5)$$

ここに、 $\bar{u}_i$ は流速ベクトル、 $\bar{p}$ は圧力、 g_i は重力加速度ベクトル、 S_{ij} は歪み速度勾配テンソル、 τ_{ij} は SGS 応力、 ρ_g は気相密度、 ρ_l は液相密度、 μ_g は気相粘性係数、 μ_l は液相粘性係数、 $\bar{\phi}$ は密度関数である。 $\bar{\phi}$ は全てグリッドスケール成分であることを表す。LES における SGS 応力のモデルには壁面近傍でのダンピングを不要とする MTS SGS モデルを用いた。また、速度の境界条件を外力項に取り入れることにより任意の境界形状を取り扱うことの出来る境界埋め込み法を用いて栈粗度形状を表現した。なお、本研究では表面張力の影響は無視できるものと考え表面張力モデルは用いていない。

密度関数法は、密度関数 $\bar{\phi}$ の保存式を解くことによって水面を捕獲する方法である。密度関数 $\bar{\phi}$ は各格子セルの液体体積占有率により求め、気相で 0、液相で 1 の値をとり、 $0 < \bar{\phi} < 1$ の値の格子セルは水面であることを示す。この密度関数を用いて式(4)、式(5)から求めた密度及び粘性係数を計算に使用することで、気相と液相を一度に解くことが出来る。ただし、密度関数の値の拡散を防ぎ計算を安定に進行させるために値の補正を行っている。また、厳密には水面が変動することによりサブグリッド応力が発生するが本研究ではこの効果は無視する。

3. 計算条件

主流方向 x 、壁垂直方向 y 、横断方向 z にそれぞれ $(4.5H, 1.5H, H)$ の計算領域に一辺 $d=0.225H$ の正方形栈粗度を粗度間隔 $10d$ で配置した流れ場を対称とする。 H は平均水深を表す。格子数はそれぞれ $(90, 64, 48)$ とし、 x 方向、 y 方向には不等間隔格子を z 方向には等間隔格子を用いた。主流方向及びスパン方向には周期境界条件、上部境界には Slip 条件、底面境界には境界埋め込み法による Non-Slip 条件を適用した。また、水理条件として断面平均流速 U_m と平均水深 H を基準にしたレイノルズ数 6250、フルード数 0.25、河床勾配 1/500、 $\rho_l/\rho_g = 800$ 、 $\mu_l/\mu_g = 66.7$ を与えた。

キーワード 開水路乱流、水面変動、LES、境界埋め込み法、栈粗度

連絡先 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 TEL/FAX 078-803-6439

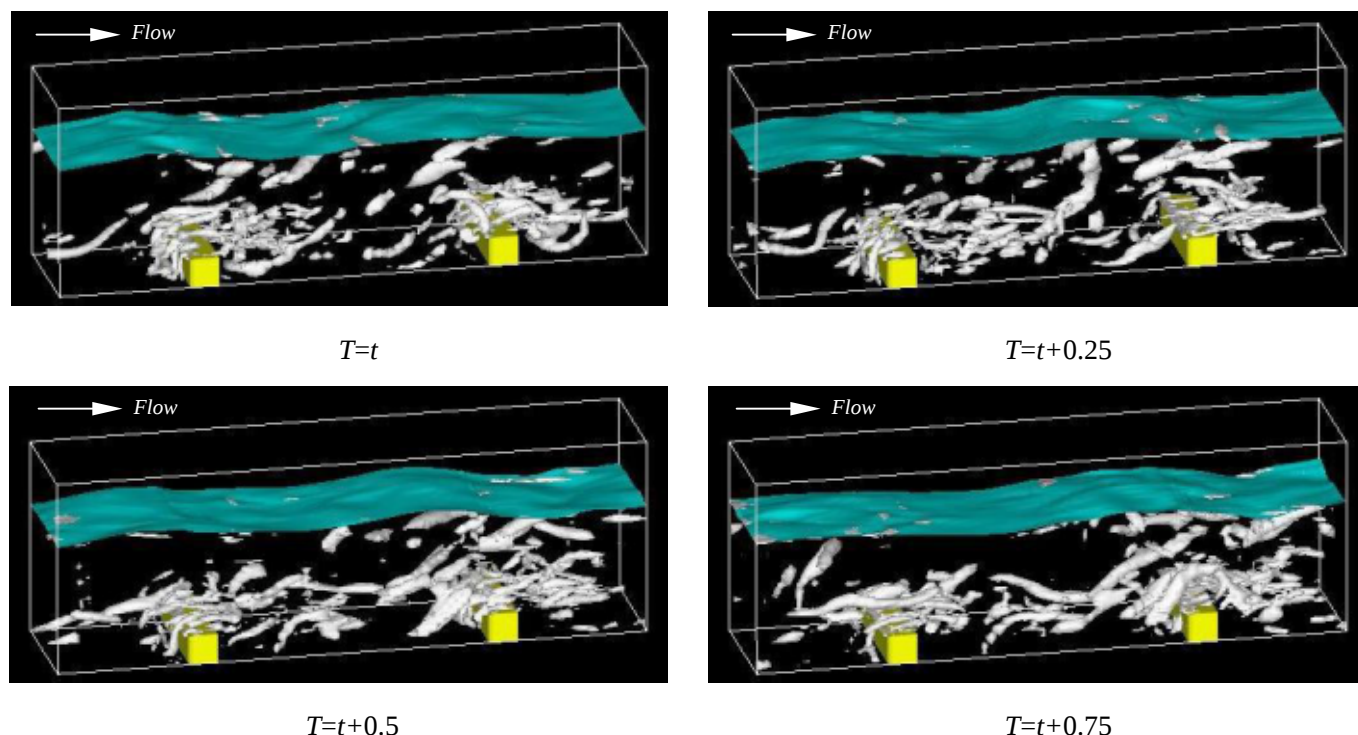


図-1 速度勾配テンソルの第二不変量 $Q=80$ の等値面と水面の可視化画像 ($T= tU_m/H$)

4. 計算結果

数値計算により得られた結果を可視化し、流れの構造について検討する。図-1 に速度勾配テンソルの第二不変量 $Q=80$ の等値面と水面を可視化したものを時系列で示す。速度勾配テンソルの第二不変量が正の領域は流体が剛体運動を行っている領域に対応しており、すなわち渦の存在意味する。河川の水表面で見られる波紋はコルク・ボイル渦と呼ばれる河床底面から上昇流が原因の一つであるが、これらは本研究のような栈粗度流れ場においては栈粗度先端から剥離して直接上昇流となり発生するものと、剥離して底面へ向かう下降流の最付着点付近から発生するものに分けられる。図-1 に示す可視化画像からはこのような底面から水面に向かう上昇流や、それによって発生する波紋が確認できる。水面変動に着目してみると下流側栈粗度の上流付近で水位の上昇が時間の経過と共に見られる。この水位の上昇と共に最付着点付近から強い上昇流が多数発生しているのが見られることから、水面の変動と上昇流の発生に何らかの相関があることが考えられる。また、上昇流が水面付近まで到達することによって水面形は複雑に変形しており、これらはフルード数の大きな流れ場ではより顕著に現れると考えられる。

5. まとめ

本研究では水面変動を考慮した LES により栈粗度流れ場の数値計算を行った。今後は、これらの上昇流と水面変動の関係や、上昇流が流れ場に与える影響などを流れ場や水理条件を変え、実験値との比較も含めてより詳細に検討していくつもりである。

参考文献

- 1) 吉村英人, 藤田一郎: 境界埋め込み法を取り入れた LES による開水路栈粗度乱流場の上昇剥離渦の解析, 水工学論文集, Vol.51, pp.769-774, 2006.
- 2) 秋山守, 有富正憲監修: 新しい気液二相流数値解析, コロナ社, 2002.