

密度関数法と LES を用いた段落ち流れの数値計算

山口大学大学院 学生会員 ○八軒 啓彰
山口大学大学院 正会員 朝位 孝二

1. はじめに

河川の段落ち部における構造物の被災を防ぐためには、段落ち流れの構造を解明する必要がある。河川のような規模の大きい流れの検証には数値計算によるシミュレーションが有効である。朝位・坪郷はダムブレイク問題においてシミュレーションを行った際に質量保存保証付き体積補正法の妥当性を検証したが、これは閉じた境界の水の運動に関するものである。開水路流れのように開いた境界においてはまだ適用されていない。本研究では開いた境界における質量保存保証付き体積補正法の適用法と、段落ち流れの解析が可能なモデルの開発を目的とする。その評価方法として渡辺ら¹⁾の実験結果を用いて、比較検討を行う。

2. 解析手法

河川の段落ち流れは自由水表面を有しており、時間的に変化するため、変化を表現できるモデルが必要である。本研究では密度関数による移流計算で自由水表面を表現する界面補足法を用いた。しかし、界面補足法では液相体積と質量保存の再現性に問題が生じてしまう。これを補正することを界面鋭敏化と呼ぶ。

本研究では朝位ら²⁾が提案した密度関数法における界面鋭敏化法を用いた。これにより、液相体積および質量保存を保証し、かつ水面をシャープに維持できる。これを本研究では質量保存保証付き体積補正法と呼ぶ。

3. 計算モデルとLES, 基礎方程式について

本研究では実験結果と比較するために図-1のような段落ち流れの計算モデルを仮定した。

数値計算手法として乱流モデル LES を用いる。LES(Large Eddy Simulation)とは計算格子以上のサイズの渦は直接計算し、格子以下のサイズの渦(SGS:Sub Grid Scale)に対してはせん断力とみなして

キーワード 数値解析 段落ち流れ 密度関数

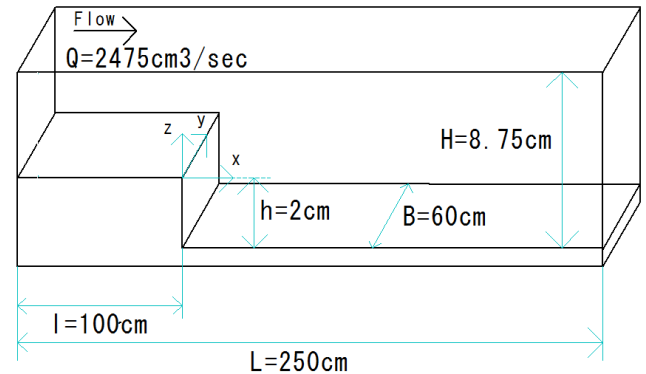


図-1 計算モデル

モデル化を行う方法である。

SGS モデルには Smagorinsky モデルを用いる。また、抵抗則を併用して壁面の摩擦の影響を補う。

基礎方程式として非圧縮性流体の連続式、密度関数の保存則と運動方程式を用いた。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \cdots (1), \quad \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial u_i \Phi}{\partial x_i} = 0 \cdots (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu_{SGS} + \nu) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \cdots (3)$$

ただし、

$$\nu_{SGS} = (C\Delta)^2 \left[\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right], \Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{\frac{1}{3}}$$

とする。

ここで u は流速ベクトル、 ρ は密度、 p は圧力、 ν_{SGS} は SGS の渦動粘性係数、 C は Smagorinsky 定数、 $\Delta x \Delta y \Delta z$ は計算格子間隔である。 Φ は規格化された密度関数で 0 から 1 の範囲をとる。 $\Phi=0$ で気相、 $\Phi=1$ で液相と定義する。また $C=1$ とした。

4. 計算結果と考察

本研究では計算条件として $\Delta x=2.5\text{cm}$, $\Delta y=0.25\text{cm}$, $\Delta z=1\text{cm}$, 計算時間を 120 秒, 粗度係数 0.0026 を用いた。

まず、開いた境界における質量保存保証付き体積

連絡先 〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1 山口大学大学院理工学研究科 環境動態システム工学研究室
TEL:0836-85-9318

補正法の適用性の是非について考える．図-2 に補正法の有無による初期値との質量誤差の時間変化の比較について示す．図-2 から補正法を用いることによって高精度で質量の保存性を満足しているといえる．このことから質量保存保証付き体積補正法は開いた境界においても適用性がある．

図-3、図-4 に段落ち部から流下方向 8.5cm における水路中央部と水路側壁近傍の流下方向流速と水深の関係図を示す．実験結果と数値計算結果を比較すると水路中央部では概ねの一致が確認できた．水路側壁近傍では定性的には再現できたが、定量的には大きな差が確認できた．その原因として側壁近傍では側面の影響を強く受けやすくその影響を十分に考慮できなかったためだと考えられる．

図-5、図-6 に段落ち部から流下方向 8.5cm における実験結果と数値計算結果の二次流ベクトル図を示す．その結果として流れの方向は再現できたが、定量的には、数値計算結果の方が実験結果よりも速い流速分布を示した．

5. まとめと今後の課題

本研究では開いた境界における質量保存保証付き体積補正法の適用法と、段落ち流れの解析が可能なモデルの開発を目的とし、数値解析を行い既存の実験結果と比較した．その結果、質量保存保証付き体積補正法は開いた境界においても適用性があるといえる．解析精度について、水路中央部では高い再現性が得られたが、境界面からの影響の大きい側壁近傍では定量的な再現にはいたらなかった．

今後の課題として、側壁近傍での流下方向流速、二次流ベクトルを定量的に再現するために乱流モデルの改善や不等間隔格子の採用などを行う必要がある．
謝辞

研究に際して当時卒論正の岩村祐一氏にご協力頂きました．ここに謝辞を示します．

参考文献

- 1) 渡辺勝利, 蒲生諒, 安部一輝, 佐賀孝徳: 段落ち流れの側壁付近における二次流れの構造, 土木学会論文集 B1 (水工), Vol.70, No.4, I_703-I_708, 2014.
- 2) 朝位孝二, 坪郷浩一: 密度関数法による自由水表面流れ解析のための体積補正法に関する研究, 土木学会論文集 B, Vol.62, No.1, 122-127, 2006.

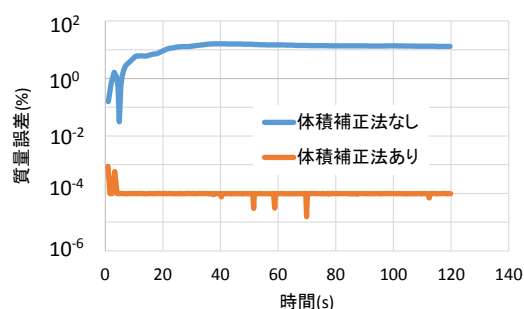


図-2 質量保存保証付き体積補正法の有無による初期値との質量誤差の時間変化の比較

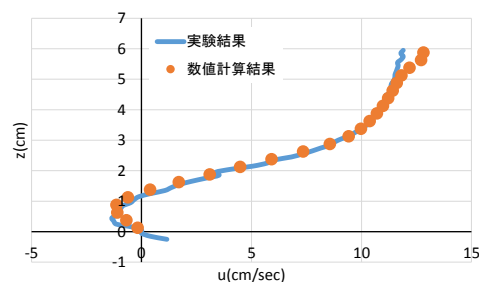


図-3 水路中央部の $x=8.5\text{cm}$ における u - z 図

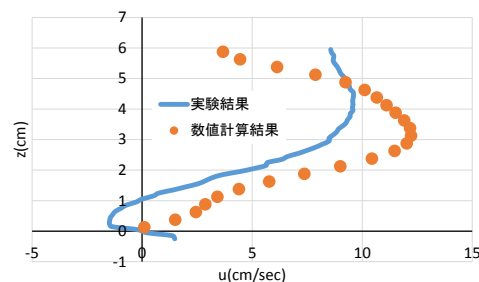


図-4 水路側壁近傍の $x=8.5\text{cm}$ における u - z 図

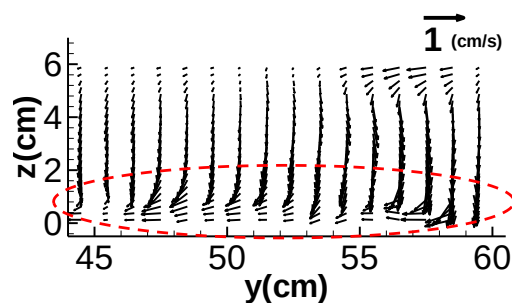


図-5 実験結果 二次流ベクトル

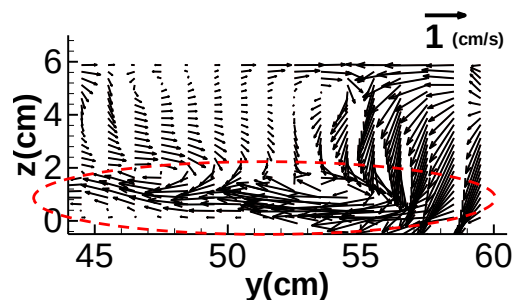


図-6 数値計算結果 二次流ベクトル