

巻き上げを考慮した OpenFOAM による 泥水流数値シミュレーションの妥当性検証

長岡工業高等専門学校 環境都市工学専攻 岩波 優希
長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 衛藤 俊彦

1. はじめに

均一な流体中に土砂が浮遊した流体が流入するとき、その密度差により形成される密度流を泥水流と呼ぶ。泥水流の流下に伴う土粒子の巻き上げ・沈降・堆積は流動特性に影響を及ぼす。これまで、泥水流の挙動予測のために $k-\varepsilon$ 乱流モデルや OpenFOAM を用いた LES 乱流モデル¹⁾など、様々な数値解析モデルが提案されてきた。これらは周囲流体と土砂を含む流体の二流体を対象とした解析モデルが主である。しかし、河川水が海域へ流入するような泥水流では、淡水、塩水、土砂の3成分が共存するため、これらを適切に区別して取り扱う必要がある。そこで本研究ではこれら3成分を独立して取り扱うことが可能な OpenFOAM ベースの解析モデルを構築した。さらに Garcia(1990)の室内実験²⁾を対象として各パラメータに対する感度解析を行い、実験結果との比較を通してモデルの妥当性を検証した。

2. 解析モデルの概要

OpenFOAM の標準ソルバ twoLiquidMixingFoam をベースに構築された計算モデルに塩分濃度の移流拡散方程式を新たに追加し、淡水、塩水、粒子の3成分系の計算モデルを構築した。本研究のベースとなる twoLiquidMixingFoam ソルバは泥水流の流動機構に大きな影響をもたらす粒子の沈降を考慮できない。小林ら³⁾の研究に倣い、底面境界での拡散方程式は粒子の沈降を表すため、以下の式を用いた。

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i + W_{si})\bar{c}}{\partial x_i} = D_m \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x_i^2} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_{SGS}}{S_c} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} \right) + \alpha \frac{S_b}{V_b} (E - D) \quad (1)$$

移流拡散方程式に粒子の沈降速度の項を加え、沈降粒子濃度フラックス D と巻き上げ粒子濃度フラックス E を流入させている。巻き上げ粒子濃度フラックス E は次式の通りである。

$$E = |\mathbf{W}_s \cdot \mathbf{n}| E_s \quad (2)$$

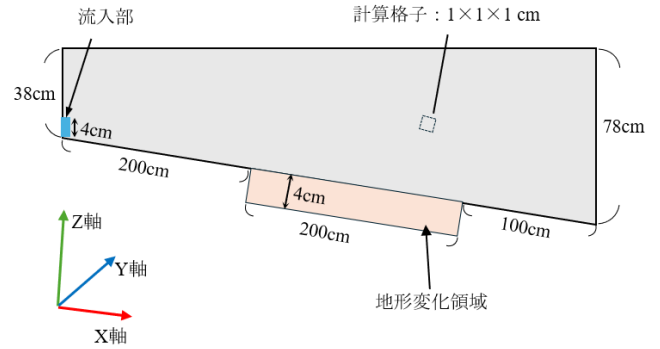


図 1 . 計算領域の概略

ここで、 $\mathbf{W}_s$ は粒子の沈降速度ベクトル、 $\mathbf{n}$ は底面の法線ベクトルである。 E_s は粒子の連行係数であり、次式で表される。

$$E_s = \frac{AZ^5}{1 + \frac{A}{E_{sa}} Z^5} \quad (3)$$

連行係数に含まれる E_{sa} は巻き上げられる粒子濃度の上限値を規定するパラメータである。

本解析モデルの妥当性を検証するため、Garcia の室内実験を対象として数値計算を行った。Garcia の実験に基づいて作成した計算領域を図1に示す。初期状態は淡水で満たされ、斜面上端の流入口から塩水を連続的に流入させて密度流を発生させた。水路底面の斜面途中の地形変化領域には一様粒径の石炭粒子が敷き詰められているものとし、塩水流下に伴う粒子の巻き上げと泥水流の発達過程をシミュレーションした。周囲水の密度は 999.68 kg/m^3 、流入塩水の密度は 1021.68 kg/m^3 、地形変化領域に充填した石炭粒子の密度は 1350 kg/m^3 、平均粒径 D_s は $50 \mu\text{m}$ とした。動粘性係数 ν は全流体共通で $1.307 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ を用いた。解析手順として、まず流入流速を変化させた計算を実施し、実験の流速分布を最も良好に再現できる流入条件を決定した。続いてその条件下においてパラメータ E_{sa} の感度解析を実施し、粒子濃度分布と濃度フラックスの再現性が最も高くなる最適値を検討した。

3. 解析結果

本研究では、まず泥水流の流速分布を実験値と一致させるため、流入流速を変えた複数パターンの計算を実施した。地形変化領域 ($x=250\text{cm}\sim 400\text{cm}$) における各流入流速の流速分布の比較を図 2 に示す。図 2 に示すように、流入流速 5.0cm/s の条件が実験値と良い一致を示した。そこでこの流入流速を適切な条件と判断し、以降の濃度分布および濃度フラックスの感度解析に適用した。

決定した流入流速 5.0cm/s の条件の下、泥水流の濃度分布の再現性向上を図るため、連行係数の上限を規定するパラメータ $E_{s\alpha}$ を変化させた感度解析を実施した。 $E_{s\alpha}=0.012, 0.018, 0.026$ における濃度分布の計算結果の比較を図 3 に示す。図 3 に示すように、 $E_{s\alpha}$ の値を大きくするに伴い、底面からの巻き上げフラックスが増加するため、泥水流の粒子濃度が高くなる傾向が明確に確認された。実験値との比較を行った結果、 $E_{s\alpha}=0.026$ では巻き上げ量が過大評価となり、 $E_{s\alpha}=0.018$ においても一部で実験値を上回る結果となった。一方で、 $E_{s\alpha}=0.012$ と設定したケースにおいて、地形変化領域における粒子濃度分布が実験値と最も良好な一致を示した。

図 4 に地形変化領域上の濃度フラックスの計算結果の比較グラフを示す。濃度分布と同様に $E_{s\alpha}=0.012$ の条件が、地形変化領域の全域にわたって実験値の推移を非常に良好に捉えていることがわかる。以上の結果より、適切な連行係数の上限値 ($E_{s\alpha}=0.012$) を設定することで、流速分布、濃度分布、および濃度フラックスを最も高精度に再現できることが確認された。

4. 結論

本研究では、淡水・塩水・粒子の 3 成分を独立して扱う解析モデルを構築した。Garcia の実験結果と比較した結果、構築した解析モデルは適切な巻き上げ上限値の設定により、流動特性を非常に良好に再現できることが示された。今後は地形変化プログラムを本モデルに導入し、巻き上げ・堆積による地形変化を考慮した泥水流の解析を行うとともに、実験結果との比較により妥当性を検証する。

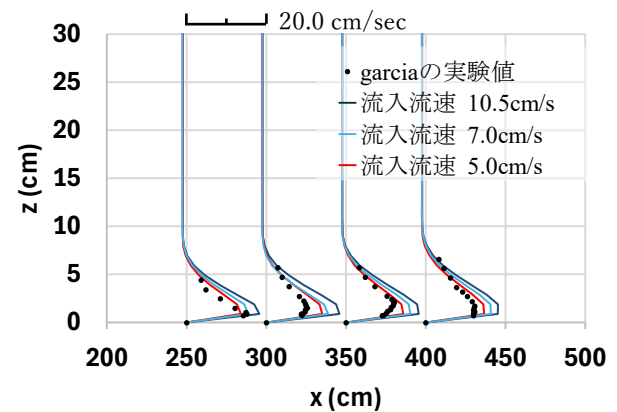


図 2. 流速分布の比較結果

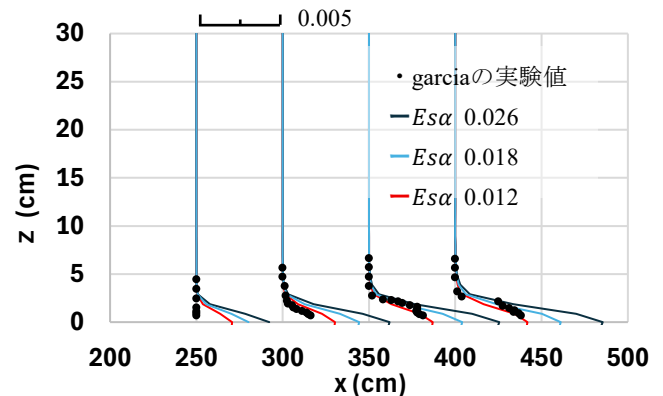


図 4. 濃度分布の比較結果

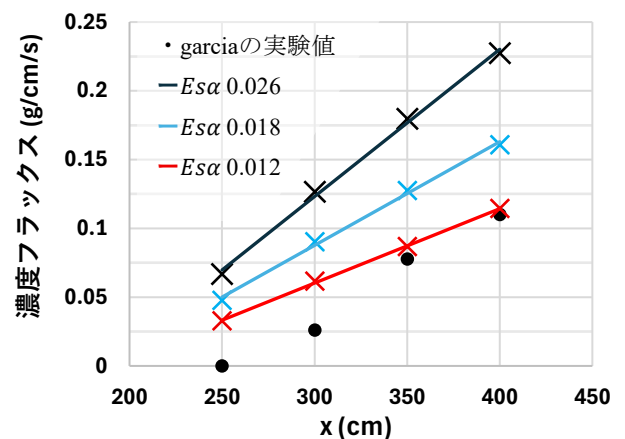


図 3. 濃度フラックスの比較結果

参考文献

- 1) 重枝未玲, 秋山壽一郎, 杉山 崇: LES 乱流モデルを用いた水平流動する単一粒径・二粒径混合粒子サーマルの数値解析, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.1249-1254, 2008.
- 2) Garcia, M.H.: Depositing and eroding sediment-driven flows: turbidity currents, Ph.D. dissertation, University of Minnesota, Minneapolis, Minn. 1990.
- 3) 長距離流動する泥水流先端部の平衡状態に至る発達過程の流動解析, 土木学会論文集, Vol.79, No.17, 23-17054, 2203