

OpenFOAM を用いた泥水流の数値解析

長岡工業高等専門学校

丸山将大

長岡工業高等専門学校

正会員

衛藤俊彦

1. はじめに

均一な流体中に砂を浮遊した流体が流入するとき、その密度差により泥水流が形成される。泥水流は海底渓谷や大規模な貯水池で発生し、多量の土砂輸送を伴う流れであり、海岸域での漂砂や渓谷の地形変化に影響を与える。泥水流の概要を図1に示す。本研究ではオープンソースの流動解析ツールである OpenFOAM を用いて泥水流の数値解析を行い、既往の実験結果と比較を行うことにより、解析モデルの妥当性の検証及び泥水流の流動特性を明らかにすることを目的とする。今回、解析の対象としたのは Parker ら¹⁾の泥水流の室内実験である。

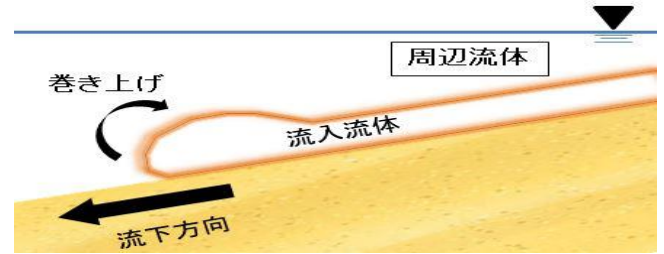


図1 泥水流の概要

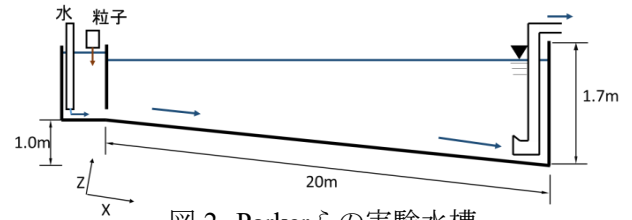


図2 Parker らの実験水槽

2. 解析方法

本研究では泥水流の解析に対して、OpenFOAM のソルバの中から twoLiquidMixingFoam ソルバを採用した。これは非圧縮、混合性の2流体を対象としたソルバである。乱流モデルは realizable k-ε モデルを用いた。本研究で用いる 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や底面からの巻き上げを考慮できない。そのため、拡散方程式に Garcia²⁾の提案式である巻き上げの項と重枝ら³⁾による粒子サーマルの解析で導入された粒子の沈降、堆積の項を加えた新たな式を導入し、本解析で用いた。底面においては、以下のように示される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial (u_i + w_{si})c}{\partial x_i} = D_m \frac{\partial^2 c}{\partial x_i^2} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_i}{S_c} \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) + w_s E_s - \beta w_s C_b \quad (1)$$

$$E_s = \frac{AZ_u^5}{(1 + \frac{A}{\alpha} Z_u^5)} \quad (2)$$

ここで、 $Z_u = R_p^{0.6} \times u_* / w_s$ 、 $R_p = \sqrt{g R_g D_s D_s} / \nu$ 、 t は時間、添え字 $i, j = 1, 2, 3$ はそれぞれ流下方向、流下方向と直交する方向、横断方向成分、 u は流速、 c は粒子濃度、 p は圧力、 ρ は流体密度、 g は重力加速度、 ν は渦動粘性係数、 S_c は乱流シュミット数、 D_m は拡散

表1 Parker らの実験条件

初期速度 $V_0(\text{cm/s})$	流入部高さ $H_0(\text{cm})$	初期濃度 $C_0 \times 10^{-3}$
27.0	8.0	4.1
砂粒子の密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	水の粘性係数 $\mu(\text{Pa}\cdot\text{s})$	砂粒子の粒径 $D_s(\text{mm})$
2.65	0.001	0.03

係数、 w_s は粒子の沈降速度、 A は 1.3×10^{-7} 、 C_b は底面近傍での粒子濃度、 u_* は底面での摩擦速度、 D_s は砂の粒径、 ν は動粘性係数、 R_g は相対密度差を示す。式(1)右辺第3項、第4項はそれぞれ粒子の底面からの巻き上げ、底面への沈降、堆積を表しており、式に含まれる α と β はそれぞれ巻き上げ、沈降、堆積のパラメータを表している。今回の解析では重枝らの研究と同様の $\beta=2$ とした。 α は既往研究から $\alpha=0.3$ を目安に試行錯誤的に検討し、 $\alpha=0.025$ とすることで Parker らの実験結果と比較的よい一致が得られたため、この値を採用した。本研究の解析対象は幅一様の水路であるため、横断方向を考慮しない二次元解析を行う。

3. 泥水流実験の概要

実験装置を図2、実験条件を表1に示す。実験水槽

は全長20m, 深さ1.7m, 幅0.7mであり水路床の勾配は0.05である。水路上流端には高さ8cmの開口部が設けられており, ここから泥水を流入させることで, 水槽内に泥水流を発生させ, その後, 定常になるのを待ち, 流速分布, 濃度分布が測定されている。

4. 泥水流の数値解析

本研究ではこのParkerらの既往実験に沿って解析モデルを作成した。格子は流下方向に4cm, 流下方向と垂直な方向には1cm刻みで分割した。図3, 4は流動距離1.5m地点と8.5m地点の流速分布のグラフ, 図5, 6は流動距離1.5m地点と8.5m地点の濃度分布のグラフである。図3の1.5m地点では, 速度の最大値で実験結果より大きい値を示し, z軸方向において実験結果より小さい値となった。また図5では, 濃度はz軸方向において実験結果より小さい値を示した。図4, 6の流動距離8.5m地点では解析結果は実験結果とよく一致している。

5. 結論

泥水流に対しOpenFOAMを用いて数値解析を行い, 既往の実験結果との比較を行った。解析モデルに巻き上げ及び沈降, 堆積の項を加え, $\alpha=0.025$, $\beta=2$ とすることで泥水流の流動を説明できることを示した。今回の解析では, 減速域の泥水流実験を対象とした。今後, 本解析モデルを自然界で発生するような泥水流の流動予測ができる解析モデルへと発展させていくため, 加速域にある泥水流の解析を行い, 妥当性を検討する必要があると考えられる。

文献

- 1) Parker et al: Experiments on turbidity currents over an erodible bed, Jour of Hydraulic Res, 25-1, 1987.
- 2) Garcia, M: Depositing and eroding sediment driven flows, turbidity currents, SAFL, University of Minnesota, Project Report, No.306, 1990.
- 3) 重枝未玲, 秋山壽一郎, 杉山誉: 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.

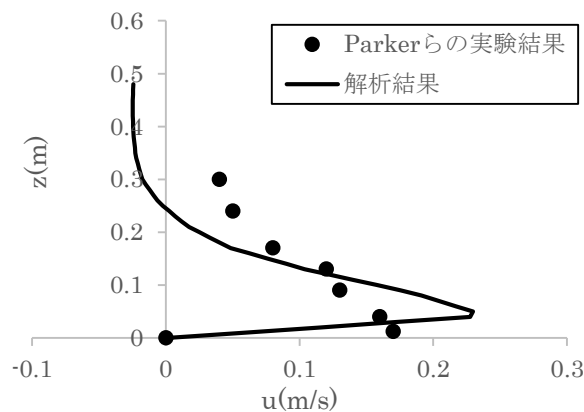


図3 速度分布, 流動距離1.5m地点

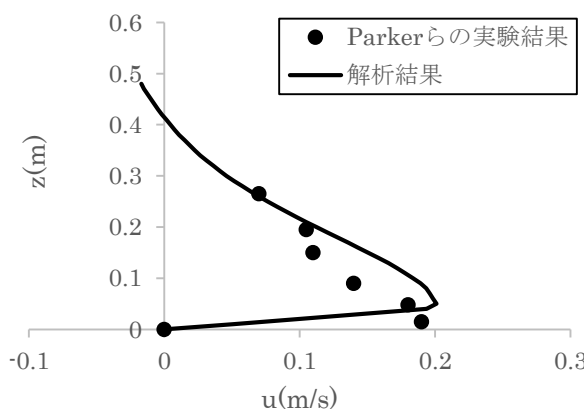


図4 速度分布, 流動距離8.5m地点

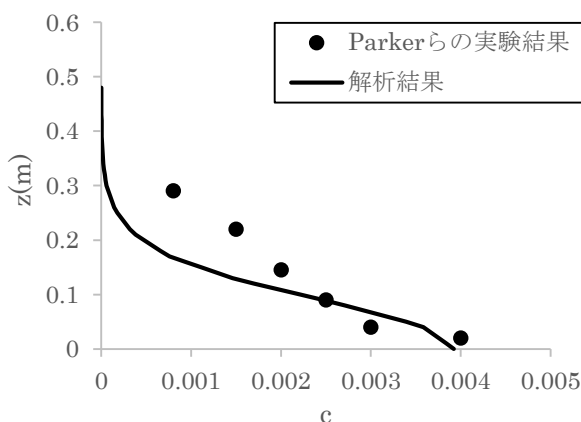


図5 濃度分布, 流動距離1.5m地点

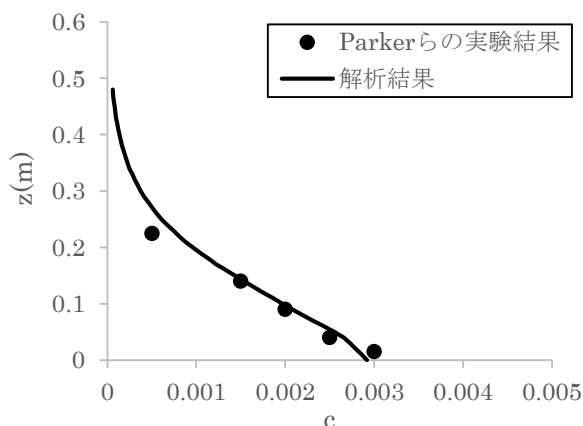


図6 濃度分布, 流動距離8.5m地点