

LES モデルにより 3 相の共存場における 3 次元流れに関する解析

(株)フジヤマ 正会員 ○福原禄夫 同左 非会員 谷口範昭
同上 非会員 青嶋安弘 同上 非会員 内田守亮 同上 正会員 清水雅子

1. はじめに

降雨による斜面崩壊が毎年のように多発しており甚大な被害をもたらしている。崩壊後の土砂は斜面を流下して河川に流入した後、勾配の低下や河川水から受けた抵抗で堆積する。堆積した土砂が河道を閉塞することで、河川水の氾濫が発生することもある。

崩壊後の土砂が斜面を流下する流動機構、河道での堆積機構および、土砂の堆積による河川水の流動機構について、力学的なメカニズムを解明することが重要である。

2. 数値解析の概要

斜面崩壊後の土砂流動についての解析は、固体力学、流体力学に基づき行われている。ここでは、降雨による崩壊後の土砂は、多くの水が含まれ、流動性が高いことを条件とするため、河川水と同じようにニュートン流体としてモデル化するものとする。

空気、水、土砂の共存場における流れ構造を同時に解析するため、数値解析に安定性が高い CCUP のスキーム¹⁾を LES モデル²⁾に用い、3 相の共存場における 3 次元流れの解析を試みた。

3. 数値解析の支配方程式

本解析では、圧縮性の空気を含む 3 相の共存場を統一的に表す 3 次元 LES モデルの支配方程式、及び密度方程式、圧力方程式等を以下に示す（流速等はフィルター操作後の値を表す）。

① 質量保存式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

② 運動方程式

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\nu_e}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \nu_e \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} + F_i$$

② 密度方程式

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial t} + \frac{\partial(\varphi_i u_j)}{\partial x_j} = 0$$

④ 圧力方程式

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho C_s^2 \frac{\partial p}{\partial x_{ii}} = 0,$$

⑤ 空気の状態方程式

$$p = \rho R T$$

ここでは、 $i, j : 1, 2, 3$ 、 u_i : 速度、 ρ : 密度、 p : 圧力、 φ_i : 密度関数、 F_i : 体積力、 R : 気体定数
 T : 温度、 C_s : 音速、 $\nu_e = \nu + \nu_t$ 、 ν : 分子粘性係数、 ν_t : Smagorinsky モデルの SGS 渦粘性係数

$\nu_t = [c \cdot \Delta_F]^2 |\bar{D}|$ 、 $c = 0.173$ (Smagorinsky 定数)、 Δ_F : フィルター代表の長さ (セルの体積の 3 乗根)

$$|\bar{D}| = \sqrt{2 \bar{D}_{ij} \bar{D}_{ij}}, \quad \bar{D}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

4. 数値解析のアルゴリズム

本解析での CCUP は CIP 法を用いるため、時間分離解析法、即ち、非線形の流れ方程式を移流項と非移流項に分けて計算を行う手法である³⁾。圧力に関するポアソン方程式について、反復解法には SOR 法を採用した。数値計算に用いられている各物理量はスタッガード格子に配置する。

キーワード : 3 相共存場、3 次元、CIP 法、CCUP 法

連絡先 : 〒435-0013 浜松市東区天龍川町 303-6 株式会社フジヤマ TEL. 053-462-8823

5. 数値解析のモデルおよび計算条件

モデルの安定性を検証するために、上層部を空気、下層部を水、土砂を柱状として空気域にある単純なモデルを設定した。計算条件は、メッシュサイズ $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 、メッシュ数 $20 \times 20 \times 20$ 、計算時間ステップ 0.0001s とした。空気、水、土砂の密度は 1.25kg/m^3 、 1000kg/m^3 、 2500kg/m^3 、粘性係数は $1.8\text{E-}05 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、 $1.0\text{E-}03 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、 $1.0\text{E+}01\text{Pa} \cdot \text{s}$ 、音速は 340m/s 、 1500m/s 、 5000m/s である。

6. 数値解析の結果

解析の結果を3次元表示で図-1～6に示す。

図-1はモデル化された土砂が落下し始め水に突入し、周辺の空気も連行された様子を表す。図-2では土砂の沈下に伴い、表面の水が周囲へ広がって行き、水面に凹部が現れ、下部の水は斜め下へ流れていくことが判った。図-3では、土砂の沈下に従い、土砂の上部に水の収束が現れ始めると共に、水は上層の空気域に跳ね返って行った。図-4より土砂は水域の底面に到達した後、周辺へ広がりながら堆積することが判った。図-5～6は土砂の上部では水がほぼ収束し、土砂は周辺へ広がりながら堆積することを表す。

以上の解析結果から、本解析モデルは、土砂の落下に伴い、空気、水、土砂の3相の共存場における流れを解析できることが読み取れ、モデルの有効性が伺える。

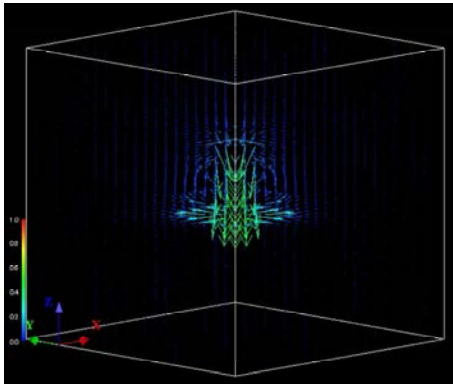


図-1 流速ベクトル($t=0.005\text{s}$)

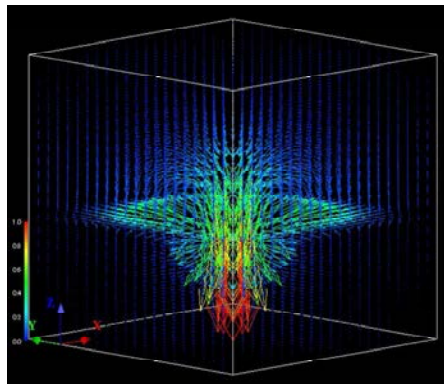


図-2 流速ベクトル($t=0.015\text{s}$)

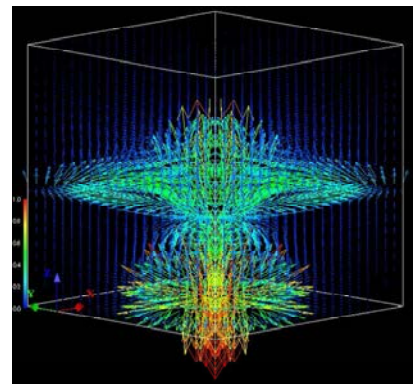


図-3 流速ベクトル($t=0.03\text{s}$)

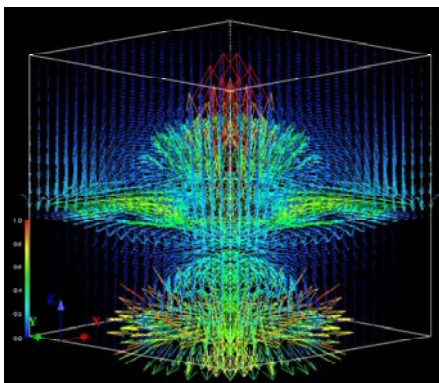


図-4 流速ベクトル($t=0.04\text{s}$)

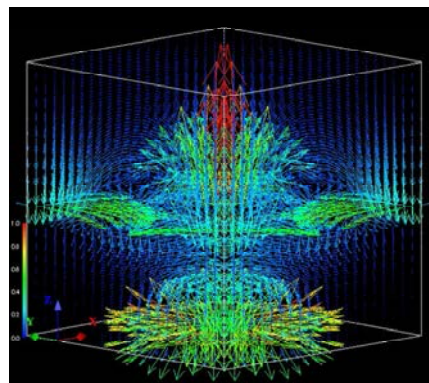


図-5 流速ベクトル($t=0.045\text{s}$)

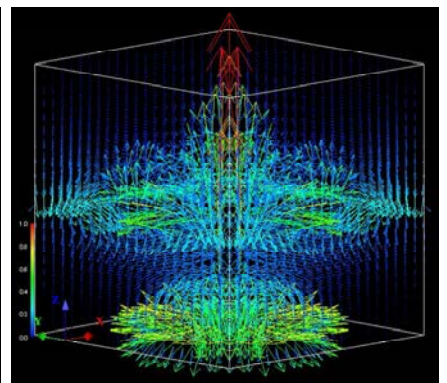


図-6 流速ベクトル($t=0.05\text{s}$)

7. 今後の課題

本解析モデルは降雨による崩壊後の土砂をニュートン流体と仮定しているが、その土砂をビンガム流体としたモデルの改良を試み、新たにその流動機構に検討を加えていきたい。

参考文献

- 1) 矢部孝・内海隆行・尾形陽一 (2005) : CIP 法、森北出版株式会社、
- 2) 梶島岳夫 (2007) : 乱流の数値シミュレーション、養賢堂、
- 3) 福原禄夫ら (2022) : 土木学会全国大会第 77 回学術講演会 II-196