

深港川で発生した泥流の跳水現象の数値計算による再現

九州大学大学院生物資源環境科学府 ○土谷麻菜、九州大学 水野秀明

1. はじめに

日本国においては、土石流やがけ崩れ、地すべりによる土砂災害は毎年発生し、特に平成 30(2019)年では合計 3459 件発生した。土砂災害による被害を防止・軽減するためには、砂防堰堤や治山堰堤といった構造物による対策(ハード対策)と警戒避難や土地利用規制などによる構造物によらない対策(ソフト対策)を効率的に組み合わせることが求められる。

本研究では、それらの対策のうちハード対策、特に、土石流や泥流を都市域など保全対象域に氾濫させることなく下流へ導流するための土石流導流工に着目する。土石流や泥流は溪床勾配の変化、狭窄と拡張といった川幅の変化、湾曲といった線形の変化のような地形の変化点を流れる際に、偏流、攪乱波、せきあげ背水のように流れの表面の形状(水面形)を変える。そのため、土石流や泥流を氾濫させることなく導流するためには、そのような流れの水面形の変化を考慮して流路を設計しなければならない。これまでに、砂や礫などの粗い粒子を多く含む石礫型土石流の場合では、水面形の変化は桜島・焼岳等での観測や水路実験により明らかにされてきた。しかし、シルトや粘土などの細かい粒子を多く含む泥流型土石流の場合、水路実験がなされているものの、実際の溪流で発生した事例が少ないため、水面形や流れの構造の変化は十分に解明されていない。

そこで、本研究は平成 27 年 7 月 28 日に鹿児島県垂水市深港川で発生した泥流(写真1)を対象として、3 次元数値計算により泥流の水面形を再現し、速度成分の斜面垂直方向の変化を明らかにすることを目的とする。

2. 3 次元数値計算による泥流の構造の推定

2.1 3 次元数値モデルの概要

本論では非圧縮性流体を対象とし、基礎方程式は式(1)に示す質量保存則と式(2)に示す運動量保存則とした。

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}_m) = 0 \quad \dots (1)$$

$$\frac{\partial (\rho_m \vec{u}_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}_m \vec{u}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_m \nabla \vec{u}_m) + \rho_m \vec{g} \quad \dots (2)$$

ここで、 ρ_m :空気と液体の混合物の密度[kg/m³]、 \vec{u}_m :空気と水の混合物の 3 次元速度ベクトル[m/s]、 p :圧力[N/m²]、 μ_m :空気と液体の混合物の粘性係数[Pa·s]、 \vec{g} :重力加速度ベクトル[m²/s]とする。

また、本論では二相界面を計算する手法として、Volume-of-Fluid(以下 VOF 法)を用いた。VOF 法では、ボイド率 α から自由表面の位置を特定する。計算式は式(3)~(5)に示す。

$$\rho_m = \alpha \rho_w + (1 - \alpha) \rho_G \quad \dots (3)$$



写真1. 深港川で発生した泥流の様子 (大隅河川国道事務所提供、平成 27 年 7 月 28 日撮影)

$$\mu_m = \alpha \mu_w + (1 - \alpha) \mu_G \quad \dots (4)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{u}_m) = 0 \quad \dots (5)$$

ここで、 α :ボイド率で単位体積当たりに含まれる液体の体積割合($0 \leq \alpha \leq 1$)、 ρ_w :液体の密度[kg/m³]、 ρ_G :空気の密度[kg/m³]、 μ_w :液体の粘性係数[Pa·s]、 μ_G :空気の粘性係数[Pa·s]とする。

2.2 平成 27 年に深港川で発生した泥流の特徴

土谷(2020)は、平成27年7月28日に鹿児島県垂水市二川地区で撮影された泥流の映像から、「一定区間」の泥流の先端部の速度と水深を観測した。写真1は映像から作成した静止画で、その映像は図1に示す導流堤の下流から撮影したものである。計測の結果、泥流の先端部が一定区間を 13.2 秒程度で通過したことから、速度は 10.3m/s 程度であった。また、護岸の高さから泥流の深さは 2.8m 程度であった。

2.3 地形条件の生成と泥流の供給条件

まず、「一定区間」を含むように、日本の平面直角座標第 2 系で(経距[m], 緯距[m])の順で左下の点(-19880,-156270)から右上の点(-19780,-156140)で囲まれた長方形の範囲において、1m×1m×0.25m のメッシュを作成した。次に、平成 27 年 7 月 8 日に国土交通省が行ったレーザー計測により得られたグリッドデータから、標高を補完した。このメッシュを垂直上向きに z 方向に 20 層とした。ただし、導流堤の正確な形状が不明であったため、その天端の標高が 18m、天端の幅が 7m、側壁の勾配が 1:0.5 と仮定し地形条件に追加した。以上を 3 次元数値計算を行う地形条件とした。

泥流の供給は生成した地形条件のうち一定領域から行うこととした。泥流を供給させる領域の範囲(以下「流入範囲」と呼ぶ)は、経距で-19790 から-19780、緯距で-156198 から-156188 で囲まれた矩形とした。流入

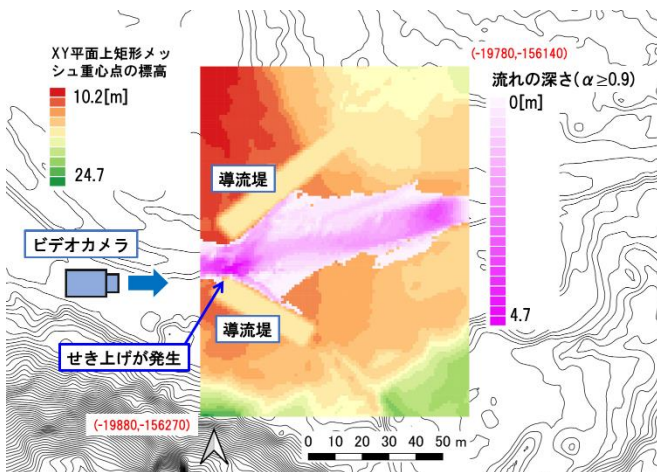


図1. 計算結果（流れの深さ）

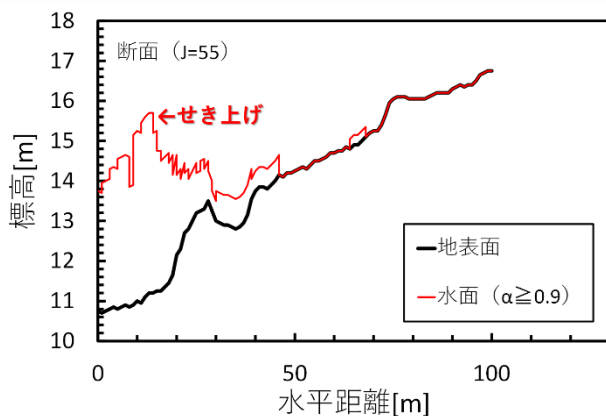


図2. 経距方向の水面形

範囲を水平面上に投影した面積は 100m^2 となる。ビデオの読取結果より、流入範囲から計算領域内に供給する質量の時間割合を $288.4\text{m}^3/\text{s}$ とした。

2.4 計算結果

3次元数値計算はOpenFOAMを用いて行った。泥流の密度を $1640\text{kg}/\text{m}^3$ 、泥流の動粘性係数を $0.001707317\text{m}^2/\text{s}$ (粘性係数 $2.8\text{Pa}\cdot\text{s}$)、空気の密度を $1\text{kg}/\text{m}^3$ 、空気の動粘性係数を $1.480 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ として20秒間の流れについて計算を行った。最大クーラン数は0.6であった。

本論で $\alpha \geq 0.9$ の計算セルを液体を含むセルとした理由は、跳水や段波の部分では流れは泡を含んでいるためである。この条件を満たす計算セルを抽出し、流れの深さを計算して、地図上に表したものが図1である。緯距の -156215m を通る経距方向の水面形を図2に示す。図1と図2から、導流堤付近で最大 4.6m 程度のせき上げが発生したことがわかる。

3. 考察

図1より、導流堤の上流側で、流れの表面と導流堤の表面がほぼ同じ高さとなることが分かった。さらに、導流堤の上流側で流れの表面が高くなっており、せき上げ現象が生じた。これは写真1で分かるよう

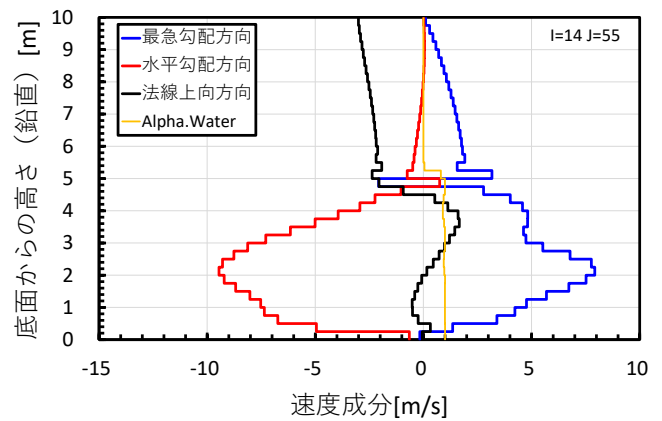


図3. 速度成分の斜面垂直方向の変化

に、実際の泥流と同じものであった。このことから、数値計算は概ね泥流を再現したと考えられる。

せき上げ部分の速度成分の斜面垂直方向の変化をグラフに表したものが図2である。法線上向方向の速度成分の分布を見ると、底面から水深 3m 程度までは速度成分は負の値を示し、水深 3m から水深約 4.8m までの水面付近では速度成分は正の値を示した。このことから、せき上げが発生している泥流中では、底面付近では底面方向への流れが発生し、水面付近では水面方向への流れが発生していると考えられる。

4. おわりに

本研究は平成27年7月28日に鹿児島県垂水市深港川で発生した泥流を対象として、3次元数値計算によって泥流の水面形を再現し、速度ベクトルの鉛直方向の変化を明らかにすることを目的とした。その結果をまとめると次のようになる。まず、3次元数値計算により泥流を概ね再現することが出来た。次に、計算結果より泥流の速度成分の分布を見ると、せき上げ現象が発生している箇所では、底面付近では斜面垂直方向下向きの流れが発生し、水面付近で斜面垂直方向上向きの流れが発生していることが分かった。今後は、泥流の水面形の再現手法として、より簡便な計算手法である浅水流方程式などの適用性を明らかにしていきたいと考えている。

本研究は国土交通省河川砂防技術研究開発公募地域課題(砂防)「微地形が泥流型土石流の水面形の変化に及ぼす影響の解明」の研究助成を受けた成果の一部である。関係各位に謝意を表す。

引用文献

- 湊明彦 (2009) : 非圧縮性界面追跡法 (VOF法), アドバンスソフト シミュレーションシリーズ1 気液二相流の力学と数値解析入門, アドバンスソフト株式会社, p.81-85
- 土谷麻菜, 江藤稚佳子, 水野秀明, 久保田哲也 (2020) : 『平成27年に鹿児島県深港川で発生した泥流の3次元計算による再現』, 砂防学会研究発表会概要集「愛知大会」, p.139-140