

河川砂防技術研究開発 【成果概要】

①研究代表者	氏名 （ふりがな）		所属		役職
	みずの ひであき 水野 秀明		国立大学法人九州大学 大学院農学研究院		准教授
②技術研究 開発テーマ	名称	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			
③研究経費 （単位：万円） ※端数切り捨て。	令和 年度	令和 年度	令和 年度	総 合 計	
	2 0 1 万円	1 8 4 万円	1 1 4 万円	4 9 9 万円	
④研究者氏名	（研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）				
氏 名	所属機関・役職（※令和3年3月31日現在）				
江藤稚佳子	国立大学法人九州大学大学院生物資源環境科学府 博士後期課程 学生				
⑤研究の目的・目標	（様式地砂-1、地砂-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。）				
（背景）					
<p>土石流を氾濫させることなく安全な区域に導流するためには、その流れが溪床勾配の変化、狭窄と広漠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を通過する際に偏流、攪乱波、せきあげ背水のように流れの表面の形状（水面形）を変えることに留意して、土石流導流工の高さを水面より高くなければならない。砂や礫などの粗い粒子を多く含む石礫型土石流の場合、そのような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、水路実験がなされたものの、実際の溪流で発生した事例が少ないため、水面形の変化は十分に解明されていない。</p>					
（目的）					
<p>泥流型土石流や石礫型土石流が勾配・川幅・線形の変化部を通過する際に、内部の速度ベクトル・圧力・せん断応力をどのように変化させるのかを3次元で明らかにする。さらに、その変化の特徴を踏まえて、泥流型土石流や石礫型土石流の水面形の変化を簡易的に推定する手法を開発する。</p>					
（調査・研究内容及び成果）					
<p>鹿児島県南大隅町船石川（平成22年7月）、鹿児島県垂水市深港川（平成27年7月）、鹿児島県鹿児島市有村川で発生した泥流型土石流や石礫型土石流の流下痕跡や映像を分析し、勾配・川幅・線形の変化部における水面形の変化を明らかにする。さらに、土石流発生域の土砂を採取し、その土質特性とレオロジー特性を明らかにする。それらの特性を踏まえて、3次元と2次元で流れの解析を行い、流れの構造を明らかにする。さらに、水面形の変化を推定する簡略な方法を開発する。本研究成果は土石流・流木対策施設設計技術指針等において土石流導流工の線形と縦断・横断形状の設計方法に反映できる。</p>					

⑥研究成果

(具体的にかつ明確に記入下さい。4ページ程度。)

1. 数理モデルによる流れの構造の推定

3次元の数理モデルは質量保存則と運動量保存則からなる連立偏微分方程式で、

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

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

である。ここで、 ρ_m : 空気と液体の混合物の密度[kg/m^3]、 \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/m^2]、 μ_m : 空気と液体の混合物の粘性係数[$Pa \cdot s$]、 \vec{g} : 重力加速度ベクトル[m^2/s]である。なお、座標系は直角座標系で、水平面上にx軸とy軸、鉛直上向きにz軸を設定した。また、空気と液体の混合物の密度及び空気と液体の混合物の粘性係数は、Volume of Fluid法を適用して、 $1m^3$ の体積中に占める液体の割合を意味する「ボイド率」を用いて、

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

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

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

と計算する。ここで、 α : ボイド率で単位体積あ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/m^3]、 ρ_g : 空気の密度[kg/m^3]、 μ_w : 液体の粘性係数[$Pa \cdot s$]、 μ_g : 空気の粘性係数[$Pa \cdot s$]である。上記の連立偏微分方程式を有限体積法により離散化を行って計算した。計算に際しては、OpenFOAMを用いた。

本研究課題で対象とした鹿児島県南大隅町船石川、鹿児島県垂水市深港川、鹿児島県鹿児島市有村川で発生した泥流型土石流のうち、その水面形の時間変化をビデオで撮影できていた深港川の事例を対象として、流れの構造を推定した。

図-1は水面形の検証並びに流れの構造の解析を行った泥流型土石流の映像で、平成27(2015)年7月28日12:43頃に深港川で発生したものを撮影したビデオ映像より、約2秒間隔で静止画を抽出して並べたものである。なお、ビデオ映像は大隅河川国道事務所より提供してもらった。画像より、泥流型土石流がコンクリートブロック製の導流堤に差し掛かった際に、せき上げ背水を発生させたことが分かる。また、その水面は導流堤の天端とほぼ同じ高さまで達したことが分かる。映像より分析すると、泥流型土石流の先頭部の速度は約10.3m/sで、波高は約2.8mであった。また、平成27(2015)年7月8日に大隅河川国道事務所が撮影したオルソ画像を分析すると、流路の幅は約10mであった。このことから、泥流型土石流のピーク流量



図-1 深港川で発生した泥流型土石流の流下状況

(出典: <http://www.qsr.mlit.go.jp/n-topics/h27/150813/tarumizu.html>)

は約288.4m³/sであったと推定される。

図-2は3次元の数値計算を実施するための生成した計算メッシュの範囲を示したものである。地形は平成27(2015)年7月8日にレーザー計測により得られた1mメッシュの3次元座標より作成した。なお、このレーザー計測の結果は大隅河川国道事務所より提供されたものである。計算で対象とした領域は図-1の映像で映し出された範囲を含むように、日本の平面直角座標系2系で経距、緯距の順で左下の座標点(-19880, -156270)から右上の座標点(-19780, -156140)で囲まれた長方形の範囲とした。座標点の経距と緯距の値は長方形をそれぞれの方向に1m間隔で設定し、標高の値は鉛直方向に0.25mの間隔で41個生成した。計算セルは隣接する8つの座標点より生成した六面体とし、経距方向に100個、緯距方向に130個、鉛直方向に40個の520,000個を作成した。なお、レーザー計測を行った時点で、コンクリートブロック製の導流堤は破壊されており、計測値に反映されていなかった。そこで、レーザー計測結果とオルソ画像より、導流堤の天端の標高が18m、天端の幅が7m、側壁の勾配が1:0.5と仮定して、標高の値を補正した。

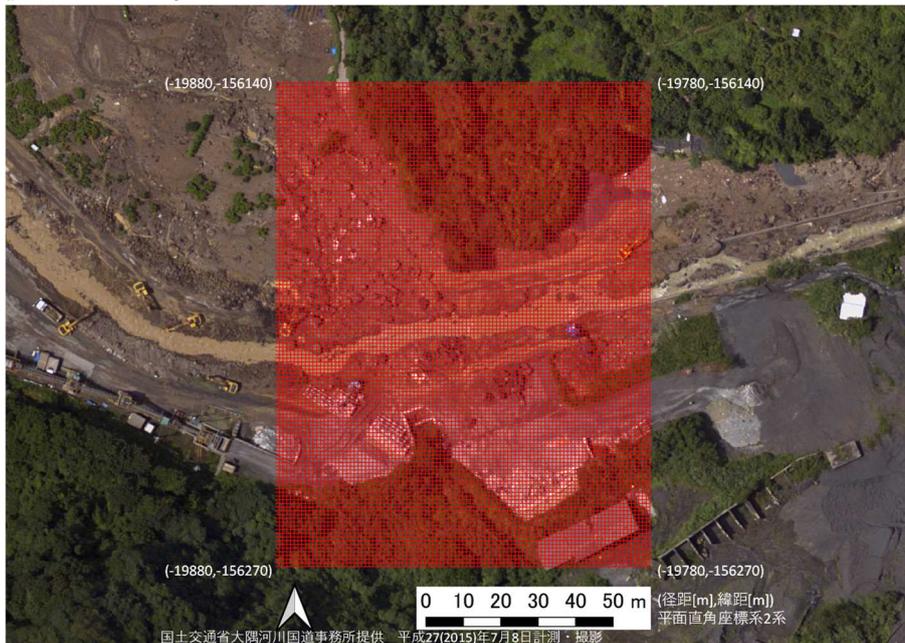


図-2 3次元の数値計算用のメッシュ生成範囲

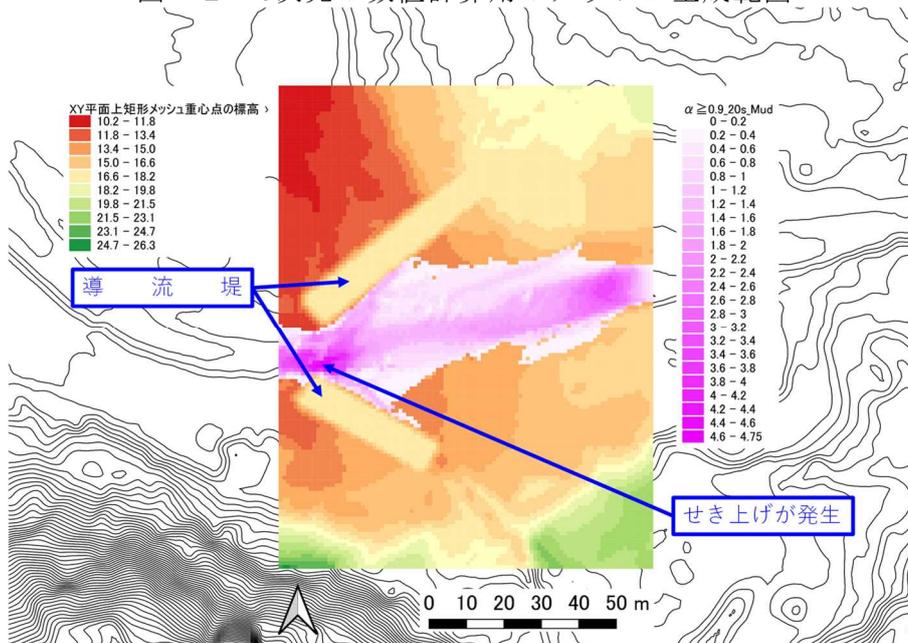


図-3 3次元の数値計算に用いた標高の分布と水深の計算結果

図-3は3次元の数値計算により再現した水深の分布である。計算に際しては、泥石流型土石流の密

度を 1640kg/m^3 、泥流型土石流の動粘性係数を $0.001707317\text{m}^2/\text{s}$ （粘性係数 $2.8\text{Pa}\cdot\text{s}$ ）、空気の密度を 1kg/m^3 、空気の動粘性係数を $1.480\times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ とした。計算は20秒間分を行い、最大クーラン数が0.6となるように計算時間ステップを設定した。左下の座標点(-19770, -156342)から右上の座標点(-19780, -156352)で囲まれた長方形より $288.4\text{m}^3/\text{s}$ の割合で質量を供給した。その際、流れの速度を経距方向に -9.987m/s 、緯距方向に -2.520m/s で与えた。なお、OpenFOAMは、計算結果として、式(1)から式(5)に示した連立偏微分方程式の変数である速度ベクトル、圧力、ボイド率を出力する。このうちボイド率を用いて水深を推定した。推定に当たっては、ボイド率が0.9、すなわち液体が全体積の90%以上を占める計算セルを抽出し、その最も高い位置にある計算セルが流れの表面に位置するものとした。計算の結果、泥流型土石流は導流堤の上流側で急激に水深を増加させており、導流堤の上流側でせき上げを生じさせた。また、泥流型土石流の水深の最大値は導流堤の直上流側で生じており、その値は 4.75m となった。その地点での標高を考慮すると、泥流型土石流の水深は概ね導流堤の天端と同じであった。さらに、泥流型土石流は導流堤の天端を乗り越えることなく、下流側に流れ下ったことも分かった。これらことから、3次元の数値計算に際して、泥流型土石流の粘性係数の推定値（粘性係数 $2.8\text{Pa}\cdot\text{s}$ ）を用いれば、計算結果は実際の現象を概ね再現できたことが分かった。

図-4は速度ベクトルを河床面の最急勾配方向、水平勾配方向、河床面の法線ベクトルの上向き方向（以後、「法線上向方向」と記す）に変換した値の分布を示したものである。水深が最も深くなった地点における分布を示した。この水深が最も深くなった地点がせき上げ区間の跳水の生じた箇所周辺である。図-4より、最急勾配方向の成分が最も大きく、次いで水平方向の成分であった。法線上向方向の成分は河床面に近いほど正の値で、流れの表面に近くなると負の値となった。このように流れの半分より表面に近い領域では、流れは河床面から離れる方向、すなわち表面に向いていたことが分かった。

図-5は速度ベクトルを河床面の最急勾配方向、水平勾配方向、法線上向方向に変換した値の分布を示したもので、図-4の地点より経距方向で下流側に 4m 離れた地点での分布である。最急勾配方向及び水平勾配方向の成分は図-4と同じ傾向であったが、法線上向方向の成分はほぼ負の値であった。これは流れが河床面に向かっていったことを示す。このことから、流れは最急勾配方向に向かうものの、跳水付近では表面に向かう部分と河床面に向かう部分、跳水より下流側ではほぼ河床面に向かう部分のみを有する構造であることが分かった。

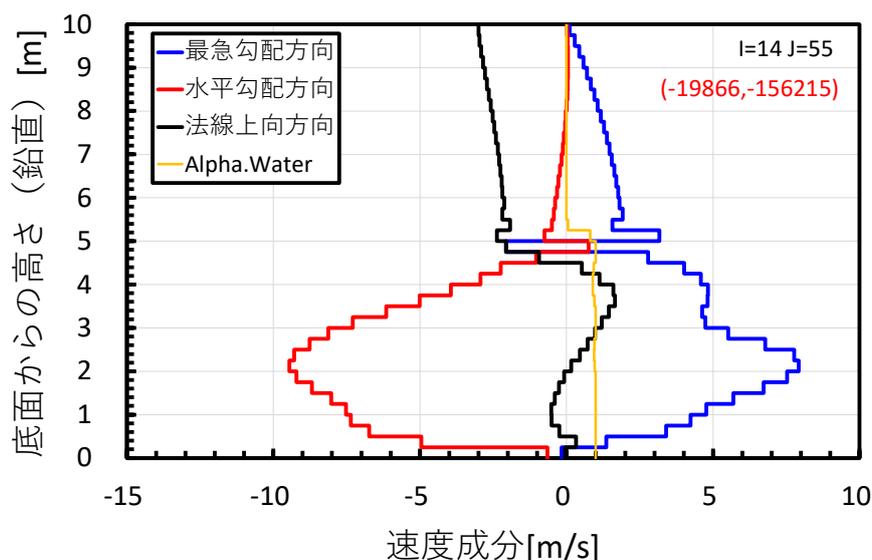


図-4 速度ベクトルの鉛直方向の分布

2. 水面形の変化を推定する簡略な方法の開発

2次元の数値計算の数理モデルは、土砂と水の混合物が土砂の分離を生じさせず流れる状態を想定しているので、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(Uh)}{\partial x} + \frac{\partial(Vh)}{\partial y} = 0 \quad \dots (6)$$

$$\frac{\partial(Uh)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(U^2 h + \frac{1}{2} g h^2 \right) + \frac{\partial(UVh)}{\partial y} = -gh \frac{\partial b}{\partial x} - gh \frac{n^2(U^2 + V^2)}{h^{4/3}} \cdot \frac{U}{\sqrt{U^2 + V^2}} \quad \dots (7)$$

$$\frac{\partial(Vh)}{\partial t} + \frac{\partial(UVh)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(V^2 h + \frac{1}{2} g h^2 \right) = -gh \frac{\partial b}{\partial y} - gh \frac{n^2(U^2 + V^2)}{h^{4/3}} \cdot \frac{V}{\sqrt{U^2 + V^2}} \quad \dots (8)$$

の連立偏微分方程式とする。ここで、 h は水深[m]、 U, V は水平面上での速度ベクトルのx成分とy成分[m/s]、 b は河床位[m]、 n は粗度係数[m^{-1/3}・s]である。水平面上での実験を行っているため、 $\partial b/\partial x = 0, \partial b/\partial y = 0$ である。

ビンガム流体の場合、等流状態であれば、深さ z における流速 u は

$$u = \frac{g}{\mu/\rho} i \cdot \left(sz - \frac{1}{2} z^2 - sb + \frac{1}{2} b^2 \right) - \frac{\tau_y}{\mu} (z - b) \quad \dots (9)$$

と求まり、断面平均流速 U は

$$Uh \equiv \int_b^s u dz$$

$$\therefore U = \frac{g}{\mu/\rho} i \cdot \frac{(s-b)^2}{3} - \frac{\tau_y}{\mu} \cdot \frac{s-b}{2} = \frac{g}{\mu/\rho} i \cdot \frac{h^2}{3} - \frac{\tau_y}{\mu} \cdot \frac{h}{2} \quad \dots (10)$$

と求まる。ここで、 i ：河床面の勾配、 b ：河床位、 s ：水位、 τ_y ：降伏応力、 h ：水深である。一方、マニングの流速式は

$$U = \frac{1}{n} (s-b)^{2/3} i^{1/2} = \frac{1}{n} h^{2/3} i^{1/2} \quad \dots (11)$$

である。式(10)、式(11)より、粗度係数は

$$\therefore n = \frac{1}{\frac{g}{\mu/\rho} i^{1/2} \cdot \frac{h^2}{3} - \frac{\tau_y}{\mu} \cdot \frac{h}{2} \cdot i^{-1/2}} \quad \dots (12)$$

と求まる。泥流型土石流の粘性係数が予め分かれば、上式より粗度係数の概ねの値を想定できる。

図-5は2次元の数値計算による、深港川の泥流型土石流の水深の計算結果である。粗度係数の値は0.03である。粗度係数の値は、ダムブレイク水路実験によれば1.1~4.3の間であったが、実際の泥流型土石流の水深がダムブレイクの実験よりも大きかったことから小さい値とした。計算結果によれば導流堤の上流側にせき上げが生じたものの、水位が導流堤の天端に届かなかったことが分かった。

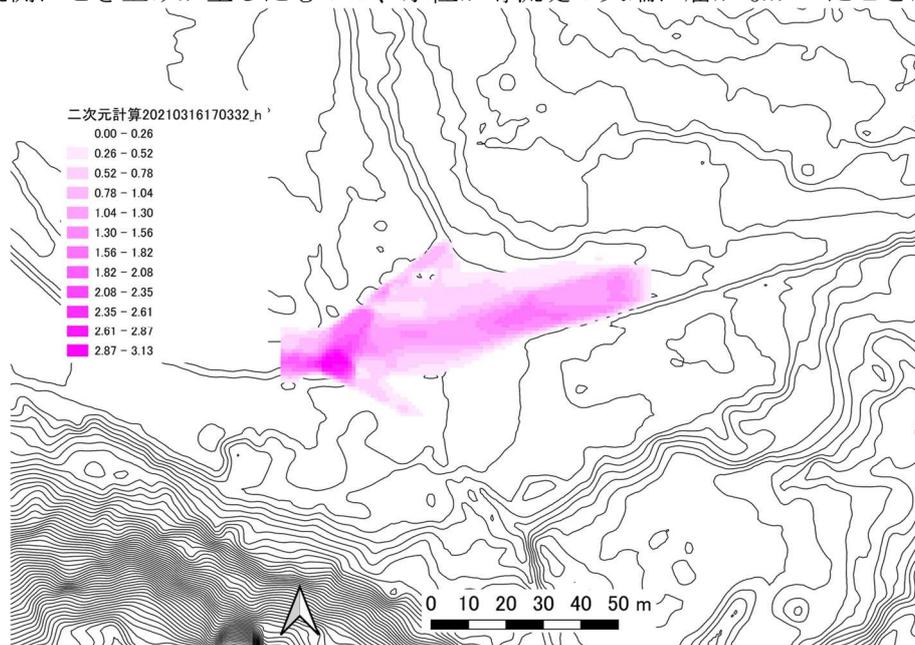


図-5 2次元の数値計算による水深の計算結果（深港川）

⑦研究成果の発表状況・予定

(本研究の成果について、論文や学会への投稿等又はその予定があれば記入して下さい。)(以下記入例)

- ・砂防学会誌への投稿(令和3年7月号に掲載予定。「粘性の高い液体を用いたダムブレイク現象の2次元数値計算による再現と精度評価」)
- ・令和3年度砂防学会研究発表会において公表予定

⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

⑨表彰、受賞歴

(単なる成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や砂防政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

本研究成果により、九州地方で発生する泥流型土石流のレオロジー特性や泥流型土石流への数値計算の適用性について明らかになってきた。しかしながら、鹿児島県内で発生した3事例のみでの検討であるため、今後は阿蘇山など他県での事例も対象としてレオロジー特性の分析と蓄積、並びに数値計算の適用性を明らかにしていく必要があると考えられる。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、砂防政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

応急対策で砂防設備を緊急に設置する必要がある場合、その形状や配置場所を検討する際に、本研究成果で使用した2次元の数値計算の数理モデルを適用できると考えられる。これは、2次元の数値計算は3次元のものよりも低い精度であったものの、非常に短時間で計算を終えられるという利点を有するためである。その際、対象となる流域内の山腹斜面の土砂や溪床堆積土砂を用いて、発生すると想定される泥流型土石流の粘性係数を計測すれば、2次元の数値計算で用いる粗度係数の値を推定でき、より精度の高い計算結果を得られる。

通常の実策においては比較的時間の余裕があるため、砂防設備の形状や配置を検討する際に、本研究で使用した3次元の数値計算の数理モデルも適用できると考えられる。流れの水面形や速度、圧力を推定するためには2次元の数値計算よりも3次元の数値計算の方が良いためである。