

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 4 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22780140

研究課題名（和文） 土石流における先端部形成が流動の間欠性に与える影響

研究課題名（英文） Formation of front part in multigranular debris flow affecting the intermittent fluidity

研究代表者

堀田 紀文 (HOTTA NORIFUMI)

筑波大学・生命環境系・准教授

研究者番号：00323478

研究成果の概要（和文）：土石流における先端部形成が流動機構に与える影響について、均一粒径土石流と混合粒径土石流の水路実験結果と数値計算結果を比較することで検討を行った。均一粒径の土石流では、実験と数値計算の結果は良く一致していた。一方で、混合粒径の土石流で両者は一致しなかった。混合粒径土石流では、逆グレイディング現象によって、流れの剪断応力が主に小粒径によって受け持たれていたことが、両者の不一致の原因であることが示唆され、土石流発達初期においては先頭部での分級は流速に影響せず、計算値が実際の流速より過少評価されることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：Characteristics of flow mechanics affected by formation of front part in debris flows consisted of sediment particle with monogranular and two diameter mixed was examined by comparison between experimental and calculated results. Both experimental and calculated results were corresponded with monogranular debris flows, whereas disagreement was shown in debris flow with mixed particle size. The disagreement was considered to be induced by the dominant shear stress due to smaller sediment particles, resulting from inverse grading detected in flow body of the debris flows. In addition, it was indicated that the calculated velocity was underestimated than actual velocity, as the particle size segregation in the front part of multigranular debris flows did not affect the fluidity in the developing phase.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学・森林科学

キーワード：土石流, 土砂災害, 防災, 混合粒径, 先頭部

1. 研究開始当初の背景

土石流の流動機構に関する研究は、定常・等流での流れ場をモデル化することによって得られた構成則（例えば、高橋, 1977; Savage, 1982; Egashira et al., 1997）に基づいて進められてきた。研究の進展に伴って、土石流の汜濫計算（例えば、中川ら, 2002;

Rickenmann et al., 2006）なども実用レベルで供されるようになり、砂防施設の配置やハザードマップの作成など、防災対策を立案する上でも効果を発揮している。その際、土石流を構成する砂礫は均一粒径と仮定され、平均粒径を用いて取り扱われることが多い。しかしながら、混合粒径の土石流の流動機構に

関しては十分な検討が行われていない。

石礫型土石流と呼ばれる土石流においても、多くの場合幅広い粒径分布を有する砂礫からなることが現地観測によって明らかにされている(奥田ら, 1987)。そのような混合粒径土石流においては、先端部への巨礫の集中や、逆グレイディング現象と呼ばれる流れ表面への巨礫の集中などの分級が生じることが知られている。また、段波状に間欠的な流動を示すことが報告されている。

逆グレイディング現象については、粒状体の分野でも多くの検討が行われている。土石流を対象としても山野・大同(1985)による統計力学的観点からのメカニズムの検討などが行われている。このような逆グレイディング現象は、表面流速が大きいという流速分布に従って土石流先端部への巨礫の集中を生じさせていることが指摘(水山, 1986)されている。

土石流の先端部の挙動を明らかにすることは、土石流の構造物への衝突時における衝撃力や、下流への到達時間の予測という観点で重要である。さらに、粒径が大きい場合に土石流の剪断応力は増大し、流速が低下することから、先端部への巨礫の集中によって、土石流先端部の発達と、その後生じると考えられる先端部の破壊が土石流の間欠性に影響を与えると考えられるが、その機構については十分な検討が行われていない。

2. 研究の目的

本研究では混合粒径土石流における分級現象が流動特性に及ぼす影響を、水路実験と数値計算の比較から明らかにすることを目的とする。土石流先端部の挙動に着目し、まず均一粒径の土石流について、従来十分な検討が行われなかった先端部の数値計算による再現性の検証を行う。そのうえで、混合粒径の土石流について、いくつかの条件下で分級の実態と流動特性の関係について実験から明らかにし、平均粒径を用いた数値計算との比較を行う。

3. 研究の方法

(1) 実験

長さ 10m, 幅 10cm の水路(図-1)を用い、勾配 15° に固定し実験を行った。水路の下流側 5.0m の底面を 10cm 嵩上げし、粗度として平均粒径 0.29cm の砂礫を一定の間隔で貼り付けた(固定床区間)。水路の上流側には下流側の粗度面と同じ高さになるよう、砂礫を 10cm の深さまで堆積させた(移動床区間)。水路上流端より一定流量の水を供給して上流区間で浸食・土石流化させることで実験を行った。

実験では流下する土石流の流動深の測定と高速ビデオカメラ(EX-F1, Casio)による

撮影を行った。固定床区間の上流端から 1.0m, 1.5m, 2.0m, 2.5m, 3.0m, 3.5m, 4.0m, 4.5m の 8 箇所に流動深の時間変化を測定するための超音波変位センサー(センサユニット: E4C-DS30, Omron, アンプユニット: E4C-UDA, Omron)を設置し、サンプリングレート 500Hz でデータロガー(NR-2000, Keyence)に記録した。全てのセンサーは同期させた。また、流下する土石流の先端部の採取を水路下端で連続 5 回行った。

実験には粒径 0.29cm (d3) と 0.14cm (d1) の 2 種類の土砂を用いた。比重はともに 2.64 である。実験は d3, d1 による均一粒径と、両者の混合粒径で行った。隣接した超音波センサーで記録された到達時刻の差から、土石流の流下に伴う先端速度の時間変化を算出し、高速ビデオカメラで撮影した画像における土砂の移動を追跡することで、いくつかのケースについて流速分布や簡易的な濃度分布を求めた。

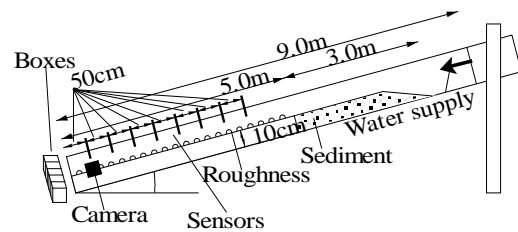


図-1 実験水路

(2) 数値計算

土石流の数値シミュレーションには、1次元の浅水流方程式を用い、河床面剪断応力には宮本・伊藤(2002)のモデルを、侵食速度には江頭(1988)の侵食速度式をそれぞれ適用した。数値計算にはリープ・フロッグ・スキームによる差分法を用い、差分間隔は時間間隔を 0.01s, 空間間隔を 0.5cm とした。実験と同条件で計算を行ったが、計算に用いた粒径は実験条件から求まる平均粒径とした。

4. 研究成果

(1) 均一粒径土石流

固定床区間上流端から 4.5m の位置での、実験と計算による流動深の時間変化を図-2 に示す。どのケースにおいても、先端付近で流動深が大きく増加し、その後は時間の経過とともに漸減していることが分かる。図-2 から、実験における流動深には小刻みな変動が見られるものの、先端近くで乖離が見られることを除けば、実験結果と計算結果は先端部から後続流にかけて良く一致していることが見て取れる。8 箇所の測定点全てで同様の結果が得られた。

図-3 は、土石流の先端速度の実験結果と計算結果を d3 と d1 で比較したものである。図-3 から、実験、計算結果のどちらでも、流下に伴い先端速度は増加している。本研究に

おける土石流が加速傾向にあり、定常に達していないことが分かる。d3 と d1 を比較すると、d1 のケースが実験でも計算でも先端速度が大きく、先端速度の増加率も僅かに大きい。ただし、d3 では実験と計算結果が概ね一致しているのに対して、d1 では実験における先端速度は計算結果をやや下回る。

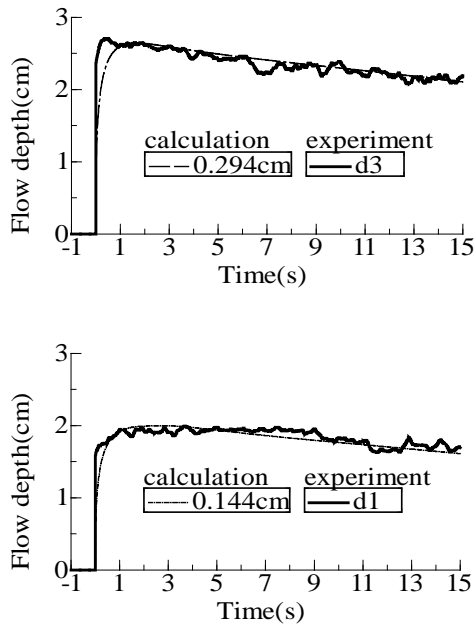


図-2 均一粒径土石流の流動深

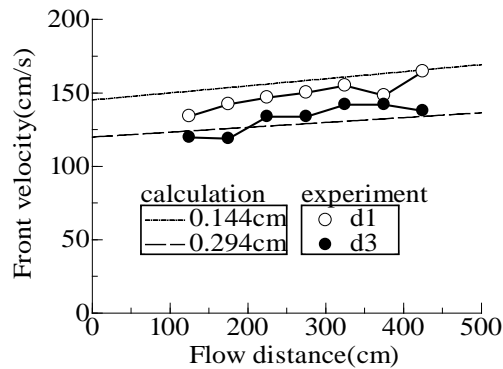


図-3 均一粒径土石流の先端流速

(2) 混合粒径土石流

混合粒径の土石流における流動深の時間変化を図-4 に示す。混合比 5:5 と 3:7 の実験と、それぞれの平均粒径、d3 と d1 による 4 通りの均一粒径の計算結果を比較した。図-4 から、混合比 5:5 と 3:7 の実験における流動深は近い値を取り、それぞれの平均粒径を用いた計算結果とは一致せず、両者の値は d1 の計算結果に近かった。

図-5 は、土石流の先端速度を示している。混合比 5:5 と 3:7 の実験結果はほぼ同程度の値を示し、混合比の違いによる先端速度の違

いは見て取れない。一方で、実験結果は均一粒径の計算結果のどれとも一致しなかった。図-5 の実験における先端速度は、流下前半（固定床区間上流部）において d3 の計算値と近い値を取るが、その後の変化は d3 の計算結果よりも大きな傾きを有し、流下後半（固定床区間下流部）では d3 の計算値から外れていた。

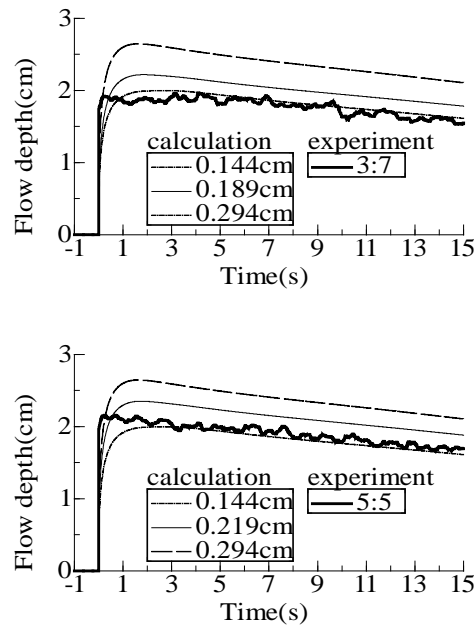


図-4 混合粒径土石流の流動深

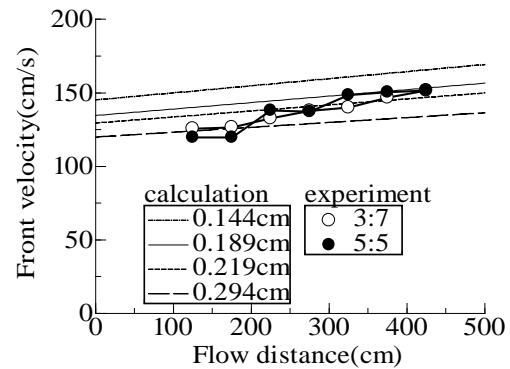


図-5 混合粒径土石流の流動深

図-6 は、取得したサンプル内に含まれる d3 の割合を示している。初期（堆砂区間）混合比 3:7, 5:5 どちらの実験でも、先頭部での混合比が初期混合比より増大していることが分かる。d3 の割合は先端に近いほど大きく、後続流に近づくにつれ小さくなり、後続流では初期混合比と一致する。d3 の砂の初期混合比が大きい 5:5 の実験の方が 3:7 の実験に比較して先頭部での d3 の割合が高い。初期混合比に収束するまでに要する時間については 3:7 と 5:5 の実験で違いは見られなかった。

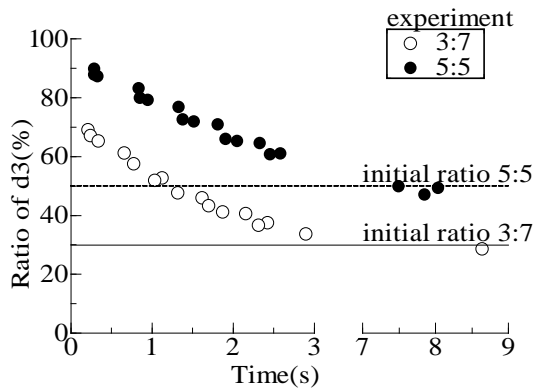


図-6 先頭部及び後続部の混合比

図-7 に混合粒径土石流での先頭部と後続流の流速分布を示す。先頭部と後続流では流速分布形に違いがあった。先頭部付近では底面近傍の速度勾配が小さく、移動床上の土石流の流速分布に近い。一方、後続流では底面近傍での速度勾配が大きく、固定床上の土石流の典型的な流速分布（高橋の論文？伊藤の論文でも）に近かった。この傾向は混合比によらず、均一粒径の土石流でも同様であった。図-7 から、混合粒径土石流内部での $d1$ と $d3$ 粒子の間に速度差はないが、後続流では逆グレイディング現象が生じているため、速度勾配が大きい底面近傍は $d1$ が占めていた。

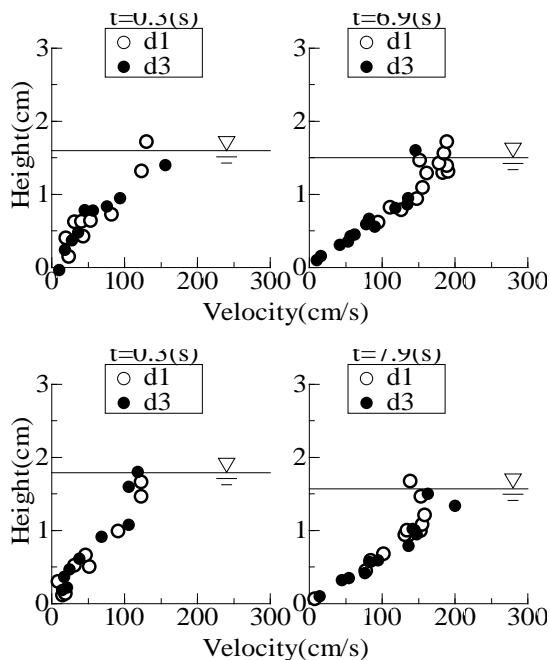


図-7 先頭部(左)及び後続部(右)の流速分布
上図は混合比 3:7, 下図は 5:5

(3) 先頭部形成が流動特性に与える影響

混合粒径の土石流では実験値と計算値は基本的に一致しなかった。計算値では平均粒径に応じて結果が異なるのに対して、実験値

は条件 (3:7, 5:5) によらず $d1$ の計算結果に近い値を取った。上流からの供給流量に対して、流れにかかる抵抗によって固定床区間での流動深と流速が決定される。土石流の剪断応力は理論的には粒径（と流動深の関係）によって変化するから、計算値が平均粒径に応じた値を取るの当然である。それに対して、混合粒径の実験値で粒径による違いがあまり現れなかったという結果は、本研究の実験における土石流の応力構造が、必ずしも構成粒子全体にかかる応力で決定されているわけではないことを意味する。すなわち、土石流内部の剪断応力は、主に特定の粒径の砂礫間に働く粒子間応力によって生じていたと考えられる。本研究の場合、3:7, 5:5 ともに実験値が $d1$ の計算値と近い値を取ったことから、 $d3$ よりも $d1$ にかかる応力によって流れが決定されていたと解釈できる。

混合粒径土石流の応力構造が、主に小粒径の砂礫によって決定されると考えた際に、土石流先頭部での分級について矛盾が生じる。土石流先頭部では分級が生じ、流下に伴う $d3$ の集中が起きていた。流れに占める $d3$ の割合が増えるにも関わらず、流動深や先端速度は $d1$ のそれに近づいており、内部応力を $d1$ が選択的に受け持つという仮説とは反しているように思える。この点に関しては、以下のような考察が可能である。

土石流先頭部への $d3$ 粒子の集中（分級）は、表面流速が大きいという流速分布に従い、後続流での逆グレイディング現象によって流れ表面に浮上した $d3$ 粒子が先頭部へと供給されることで生じる。ここで、後続流だけでなく先端部の流動深も $d3$ ではなく $d1$ の計算結果に近かったのは、本研究での土石流先頭部がまだ発達初期段階にあったためだと考えられる。土石流先頭部の流速、流動深が先頭部における応力構造によって決まっておらず、後続流において主に $d1$ 粒子間の応力構造によって流速が与えられた（流れ表面の） $d3$ 粒子が後続流から供給されることによって決定されているのである。図-7 の後続流表面における $d3$ 粒子の速度が図-5 に示された水路末端部での先端速度とほぼ一致していることもそれを支持する。また、図-5 における先端流速が、初期において $d3$ の計算値と一致していたのは、後続流で逆グレイディング現象がまだ生じていなかったためであり、逆グレイディング現象の進行に伴い、先頭部に供給される粒子の速度が増大することで $d1$ の計算値に近づいた、すなわち、 $d3$ の計算値より大きな速度となったと解釈できる。

図-5 で見たように、本研究における土石流は加速傾向にあり、実験・計算とも定常状態に達していない。図-8 は、 $d1$, $d3$ での先端速度を水路を延長して計算した結果である。

本研究の実験は 500cm までの範囲となるが、d1, d3 とともに、計算値はまだ定常に達していない。図-8 から、d3 は 700~800cm, d1 は 1500cm 以上の距離を流下しなければ定常に達せず、その意味では本研究の土石流は流下初期の状態にあると言える。このような土石流の発達領域では、土石流の流動シミュレーションによる到達速度の推定値は実際の値より過少となる。以上の結果は、土石流先端部への巨礫集中は後続流における分級に伴って生じること、特に流れの発達過程では、既存の土石流流下モデルが先端部の到達時間を過大に（：危険側で）評価していることを意味している。

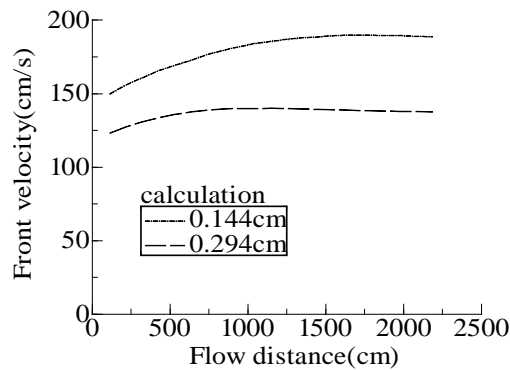


図-8 先端流速と流下距離の関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 3 件)

- ①金子宇弘, 堀田紀文, 岩田知之. 2011. 混合粒径土石流において微細土砂が流動特性に及ぼす影響. 砂防学会, 2011 年 5 月 18 日, 神奈川県民ホール
- ②岩田知之, 堀田紀文, 鈴木拓郎. 2011. 混合粒径土石流の分級現象が先端部の流動に及ぼす影響に関する研究. 砂防学会, 2011 年 5 月 18 日, 神奈川県民ホール
- ③岩田知之, 堀田紀文, 鈴木拓郎. 2010. 混合粒径土石流における先端部の流動に対する巨礫の集中の影響に関する研究. 砂防学会, 2010 年 5 月 27 日, 長野市若里市民文化ホール

[図書] (計 1 件)

- ① Hotta N. 2011. Pore water pressure distributions of granular mixture flow in a rotating mill. (In: Genevois R, Hamilton DL, Prestininzi A. (Eds.), 5th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and

Assessment), Casa Editrice Universita La Sapienza, Roma, 1118 pp, 査読有

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀田 紀文 (HOTTA NORIFUMI)

筑波大学・生命環境系・准教授

研究者番号：00323478