

泥流の流動機構に関する実験的研究

京都府立大学農学部 ○三好岩生・水原邦夫・角谷朗

1. はじめに

雲仙・普賢岳の火山活動に伴って発生した土石流は、比較的勾配の緩やかな地点においても石礫を含む泥流的な流れが大量の土砂を輸送していく様子がみられている。このような泥流的な固液混相流の流動機構は、従来の土石流や掃流砂に関する知見で十分に説明されるものではなく、そのメカニズムを解明するための新たな検討が必要となる。ここでは細粒土砂と水からなる固液混相流の流動機構や土砂輸送能などについて実験的に検討を行った結果を報告する。

2. 実験方法

実験装置は図-1に示すように、長さが4m、幅10cm深さ30cmの水路、上流端に設置したホッパー型の発生装置と下流端の採泥器等から構成される。発生装置は決められた量の土砂と水を内部の羽根で十分に攪拌することによって、実験条件として定められた土砂濃度の固液混相体が得られるようになっている。水路床上には発生装置内に入れたものと同じ土砂を予め2cm厚で敷き詰めて移動床条件を設け、ここに予備給水を行って完全に飽和させたところへ発生装置内で作られた10lの混相体を供給して泥流を発生させた。水路下流端より90cmの地点で側面からハイスピードビデオ(200 f.p.s)で録画するとともに、下流端で流れを元河床直上面から水面までのいくつかの層別に採泥することによって流速分布や濃度分布を測定した。実験に用いた試料は粒径が1.43, 0.64, 0.18 mmの三種類の均一粒径砂であり、1.43mmのものは山砂をふるい分けたもの、0.64, 0.18mmのものは珪砂で、比重は全て約2.65であった。表-1に実験条件一覧を示す。

表-1 実験条件一覧表

実験No.	材料粒径(mm)	$\tan \theta$	供給土砂濃度
A-1	1.43	0.05	0
A-2	1.43	0.05	0.1
A-3	1.43	0.1	0.1
A-4	1.43	0.1	0.2
A-5	1.43	0.2	0.2
A-6	1.43	0.2	0.3
A-7	1.43	0.3	0.3
A-8	1.43	0.3	0.4
A-9	1.43	0.4	0.3
A-10	1.43	0.4	0.5
B-1	0.64	0.05	0
B-2	0.64	0.05	0.1
B-3	0.64	0.1	0
B-4	0.64	0.1	0.2
B-5	0.64	0.2	0.2
B-6	0.64	0.2	0.3
B-7	0.64	0.3	0.3
B-8	0.64	0.3	0.5
B-9	0.64	0.4	0.3
B-10	0.64	0.4	0.5
C-1	0.18	0.05	0
C-2	0.18	0.05	0.1
C-3	0.18	0.1	0
C-4	0.18	0.1	0.1
C-5	0.18	0.2	0.3
C-6	0.18	0.2	0.4
C-7	0.18	0.3	0.3
C-8	0.18	0.3	0.45
C-9	0.18	0.4	0.3
C-10	0.18	0.4	0.45

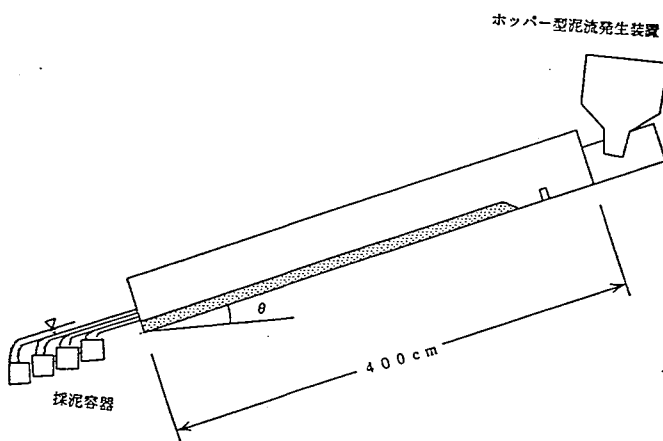


図-1 実験装置の概要

3. 実験結果

3. 1 発生した流れの流況について

発生した流れの最大水深は0.8～7.8cm，平均流速は約10～170cmの間にあり，実験条件によって流れの様子は大きく異なったが，いずれの場合もビデオ観測点付近ではほぼ定常状態の流れとなっており，疑似等流部と見なせる部分があった。また全体的に粒径と勾配が大きいほど最大水深が大きく先端に明瞭な段波を形成した。図-2に示されるように流速係数を見ると全体的に流れの抵抗が大きく，その傾向は特に土砂粒径0.18mmの場合に顕著である。

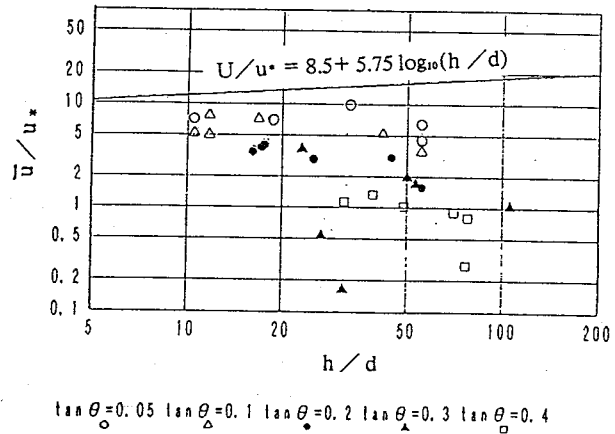


図-2 相対水深と流速係数の関係

3. 2 平衡土砂濃度

図-3に水路勾配と水路下流端で採泥されたサンプルの濃度の関係を示す。いずれの場合も測定された土砂濃度は，同勾配に対して供給された2種類の濃度の間にあり，ほぼ平衡濃度に達しているものと考えられる。土砂粒径が1.43mmの場合，tanθが0.1以下のときは芦田・高橋・水山の掃流砂量式⁹⁾

$$\phi = \frac{12-24\sqrt{\tan\theta}}{\cos\theta} \tau_*^{(1.5-\sqrt{\tan\theta})} \left(1-0.85 \frac{\tau_*c}{\tau_*}\right) \left(1-0.92 \frac{u_*c}{u_*}\right) \dots\dots (1)$$

に実験時に得られている比較対象実験の平均的な摩擦速度などを用いて計算される土砂濃度に，tanθが0.2のときは掃流状集合運動に関する水山の実験式⁹⁾

$$c = 5.5 \tan^2\theta \dots\dots (2)$$

による計算値に，またtanθが0.3のときには高橋による土石流の濃度式⁹⁾

$$c = \frac{\rho \tan\theta}{(\sigma - \rho)(\tan\phi - \tan\theta)} \dots\dots (3)$$

にほぼ一致している。しかしながら，粒径が0.64mmの場合，勾配が小さいときに掃流砂量式による値よりも濃度が大きくなる傾向が見られ，粒径が0.18mmのときは勾配が小さいときには各式による計算値よりも著しく大きい濃度となっており，逆に高勾配のときに濃度が小さくなる傾向が見られた。

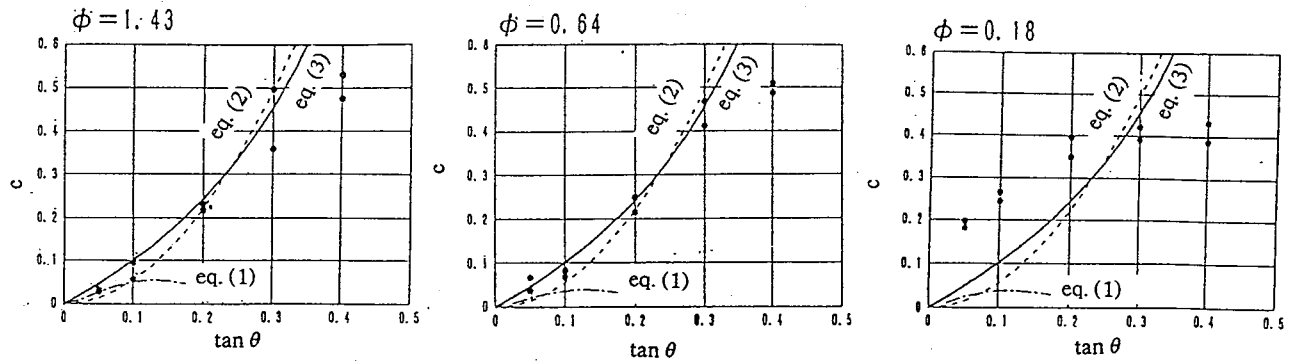


図-3 水路勾配と土砂濃度の関係

3. 3 流速分布・濃度分布について

図-4, 図-5に計測された流速分布・濃度分布の内の数例を示す。濃度分布を見ると, 土砂粒径が1.43mmの場合, $\tan\theta$ が0.05 のときには底層付近に少量の土砂輸送が見られるだけであり, 水路勾配が大きくなるにしたがって全体的に濃度が大きくなり, $\tan\theta$ が0.3以上になるとほとんど濃度勾配のない土石流濃度となっている。土砂粒径が0.18mmのときは $\tan\theta$ が0.05のときからかなりの高濃度で全体的に土砂が分布しており, $\tan\theta$ が0.2以上になるとほぼ濃度勾配のない流れとなる様子が見られた。流速分布を見ると, 土砂粒径が1.43mmおよび0.64mmの場合, 勾配が大きくなるに従って, ほぼ清水乱流に近い形から掃流状集合運動, 土石流を示すと思われる形へと変わっていく様子が見られる。一方, 土砂粒径が0.18mmのときは, $\tan\theta$ が0.2以下まではやや濃度勾配の影響を受けていると思われる変曲点を持った形となっているものの, 全体的に濃度勾配の影響は他の試料のときよりも小さく, とくに $\tan\theta$ が0.3以上になるとニュートン流体の層流の分布形に近い形となった。

4. 考察

土砂粒径が小さくなると緩勾配においても泥流の平衡濃度が高くなることは従来から指摘されていることであるが, 濃度の形成機構について合理的な説明は十分になされているとはいえない。今回の実験で用いた10⁻¹mmオーダーの粒径の土砂の場合, 粒土間反発による分散応力が濃度を維持するに十分なほど大きいとも考えられず, 逆にもっと小さい土砂粒子の場合には有効と考えられる電気的な応力が働くとも考え難い。したがってこのような粒径の場合には, 今回の実験結果から見ても, 濃度が比較的低いときには, 流れの乱れによって粒子が拡散するような浮遊砂の濃度形成機構に近いものが働くことが考えられる。ある程度以上に濃度が大きく, 流れの乱れが小さくなって層流的な流れになっている場合にはこのような機構も期待できないように思われるが, 粒子の瞬間的な浮遊状態がもたらす間隙流体の見かけの密度の上昇や粒子と流体間の相互作用を考えるとある程度の濃度の維持が可能であるのではないかとと思われる。今回の実験でも最も細かい土砂を用いた場合のみは急勾配条件でも他の試料に比べて濃度が小さかったのは, このように濃度形成機構が異なるためであると考えられる。泥流の流動形態に

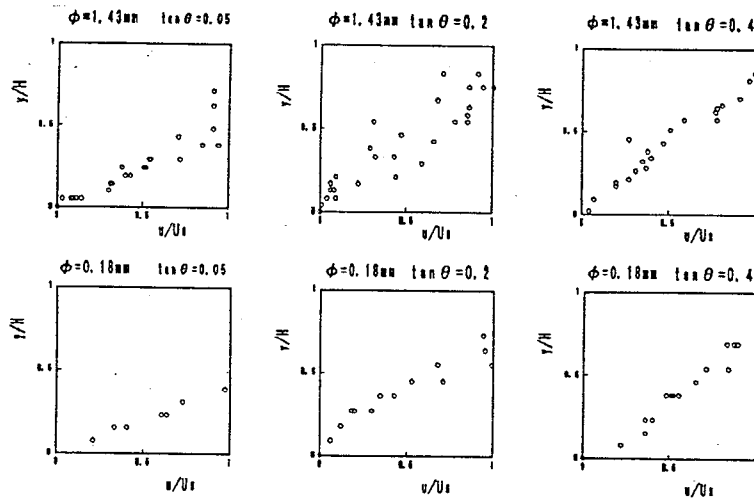


図-4 流速分布

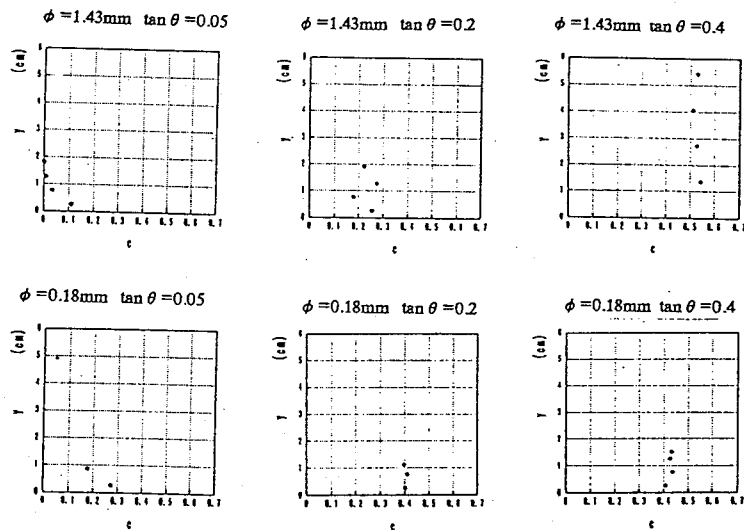


図-5 濃度分布

については、流速分布形からは乱流または高粘性ニュートン流体であるように見られた。十分に小さい土砂粒子を含んだ流れでは混相体を一様な連続体として扱えることは既に多く指摘されていることであるが、今回の実験で発生した流れは、濃度勾配の存在が見られたことなどからも解るように、一様な流体として扱える領域と石礫型土石流のように固相粒子の働きが支配的な領域の中間的な流れであると考えられる。このような流れのメカニズムを解明するためには、土砂粒子を取り込む流れの中の乱れの強さや大きさと土砂粒子の含有による物性変化との相互関係についてさらに検討を進める必要がある。

参考文献

- 1) 芦田和男・高橋保・水山高久(1978)；山地河川の掃流砂量に関する研究，新砂防，Vol.107, pp.9-17
- 2) 水山高久(1980)；土石流から掃流に変化する勾配での流砂量，新砂防，Vol.116, pp.1-6
- 3) 高橋保(1977)；土石流の発生と流動に関する研究，京都大学防災研究所年報，第20号，B-2 pp.405-435