

## 泥流の堆積機構：二層モデルに基づく検討

宇都宮大学農学部 ○酒井 佑一

東京大学大学院農学生命科学研究科 堀田 紀文

## 1 はじめに

土石流の堆積機構を明らかにすることは、土石流の到達範囲を推定する上で重要である。比較的粗い粒径の土砂からなる土石流（石礫型土石流）では、現在の土砂濃度に対応する平衡河床勾配が存在し、これに近づくように侵食・堆積が生じる<sup>1)</sup>。このとき、平衡河床勾配は流れ底面での外力と粒子間応力のつり合いを考慮することで導出される。

一方、比較的細かい粒径の土砂からなる土石流（泥流）は、石礫型土石流で想定される勾配よりも緩勾配まで流れることが知られている。これは、泥流では粒子が乱流によって支持されるようになるためと考えられるが、泥流の堆積機構は十分に検討されていない。

泥流の堆積機構についても、石礫型土石流と同様に応力構造に基づいて検討する必要がある。泥流の応力構造については、均一粒径からなる土砂を用いた水路実験での検討をもとに、流れ上層で粒子が乱流によって浮遊し、下層では粒子が層流状態で粒子間応力が卓越する二層構造の流れとなることが指摘されている<sup>2)</sup>。このことから、泥流を二層モデルで表現することで、泥流の平衡河床勾配が理論的に導出されている<sup>3)</sup>。このとき、二層の境界の位置をどのように決定するかが重要となるが、これには既往研究<sup>4)</sup>において石礫型土石流から泥流への流れの遷移を検討した結果を適用できる。

そこで本研究では、水路実験によって泥流の堆積機構を検討し、二層モデルを用いることで泥流において土砂の堆積が生じる条件の説明を試みた。

## 2 泥流の堆積実験

まず、泥流の堆積機構を検討するため、水路実験を行った。実験には長さ8 m、幅0.1 mの矩形直線水路を使用した（図1）。水路底面には粗度として粒径2.9 mmの均一粒径の土砂粒子が貼り付けられている。実験では、下流に設置したタンクにおいて水と土砂を攪拌しながら混合し、サンドポンプで吸い上げることで泥流（一定流量・土砂濃度）を上流端から供給した。供給された泥流は水路を流下し、下流端からタンクに戻るような循環システムになっている<sup>5)</sup>。

実験の各ケースでは、上流端から供給する泥流の流量と土砂濃度を実験条件として設定し、土砂の堆積が生じる水路勾配と泥流の堆積過程を検討した。ここで、供給する泥流の流量と土砂濃度には、定常状態の流れにおいて水路下流端での直接採取によって計測した値を用いている。水路勾配 $\theta$ は、初期条件として土砂の堆積が生じないような十分大きい勾配

に設定し、土砂の堆積が生じるまで $0.1^\circ$ 刻みで勾配を下げた。ただし、各勾配においては堆積が生じるかどうかを十分な時間を置いて確認した上で勾配を下げていく。

泥流の堆積過程を記録するために、2台のビデオカメラを設置して泥流の流動の様子を側壁から撮影した。また、泥流の水位変動を測定するため、超音波変位センサーを下流端から1 m間隔で6台設置した。泥流の構成材料としては、東北珪砂8号（中央粒径 $d$ は0.11 mm）を用いた。ここで、土砂粒子の比重は2.6、内部摩擦角は $34^\circ$ である。

## 3 二層モデルに基づく泥流の平衡河床勾配

ここでは、二層モデルをもとに泥流の平衡河床勾配を算出する方法について述べる。泥流の流動モデルとして、図2のような二層モデルを考える。流動深 $h$ の流れに対し、河床から高さ $\delta$ の位置を境界として、それより上層では乱れによって土砂粒子が浮遊し、下層では粒子が層流状態で流れ、粒子間応力が卓越する層が形成されるとする。定常状態の流れにおいて、運動量保存則を考慮することで、以下のように平衡勾配 $\theta_e$ が表される<sup>3)</sup>。

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho_w - 1)C}{(\sigma/\rho_w - 1)C + 1} \frac{\delta}{h} \tan \phi_s. \quad (1)$$

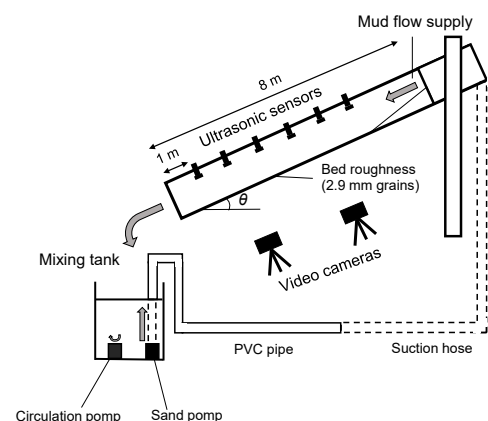


図1 泥流の堆積実験。

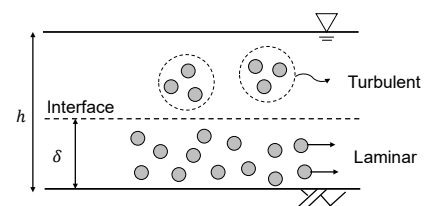


図2 泥流の二層モデル：流れ上層は乱流，下層は層流。

ここで、 $\sigma$  は土砂粒子の密度、 $\rho_w$  は水の密度、 $C$  は断面平均土砂濃度、 $\phi_s$  は内部摩擦角である。ただし、式 (1) の導出の際には土砂濃度の鉛直分布は一様としている。式 (1) は、全層が層流の石礫型土石流 ( $\delta/h = 1$  に対応) では材料物性が同一ならば平衡濃度と勾配が一对一对応するのに対して、泥流では流動深のうち粒子間応力層が占める割合 ( $\delta/h$ ) も影響を与えることを示している。

既往研究<sup>2)</sup>より、 $\delta/h$  は以下のように表される。

$$\frac{\delta}{h} = \sqrt{\text{Re}_{Dc} \frac{K(c)}{\rho_m/\rho_w} \frac{d}{h}} \quad (2)$$

ここで、 $K(c)$  は土砂濃度  $c$  の関数、 $\rho_m$  は土石流の密度である。 $\text{Re}_{Dc}$  は石礫型土石流から泥流への遷移が始まる際の限界レイノルズ数で、既往研究<sup>4)</sup>の結果に基づき  $\text{Re}_{Dc} = 3000$  とする。式 (1) と式 (2) を用いることで、泥流の平衡河床勾配が算出できる。

#### 4 結果と考察

まず、実験の各ケースで共通してみられた泥流の堆積過程について述べる。初期勾配から堆積が生じる勾配までは、泥流が堆積層を形成することなく固定床上の流れを形成したが、ある勾配まで水路勾配を下げると水路下流付近で堆積層を形成し始めた。堆積が始まる時の水路勾配で固定しておくと、形成した堆積層は上流側に徐々に発達した。その後、堆積によって局所的に河床勾配が緩くなったところで跳水が発生すると、常流部分で堆積が進み、上流進行する波長の長い河床波を形成した。河床波は下流で発生して上流端まで到達することを繰り返すため、局所的な河床勾配の変動は大きいですが、河床波を河床位の変動成分とみなすと、平均的には河床勾配は一定で水路勾配と一致すると考えられた。そこで本研究では、堆積が始まる時の水路勾配を泥流の平衡河床勾配とみなして解析を行った。

図3は、泥流の土砂濃度  $C_{exp}$  (水路下流端で測定した値) と堆積が始まる時の河床勾配  $\theta_{e,exp}$  の関係を表したものである。図には参考のため式 (1) において  $\delta/h$  を変化させた理論線も示している。泥流では、全層が層流の石礫型土石流と異なり、土砂濃度と河床勾配が一对一对応しないことがわかる。また、流動深  $h$  が大きいほど、同程度の土砂濃度に対して平衡河床勾配が低くなる傾向がある。本研究では粒径  $d$  は固定しており、式 (2) より  $h$  が大きいほど  $\delta/h$  が小さくなるため、この傾向は式 (1) における関係と対応している。

実験で測定された平衡河床勾配  $\theta_{e,exp}$  と、二層モデルによって算出された平衡河床勾配の理論値  $\theta_{e,cal}$  の比較を図4に示す。ここで、 $\theta_{e,cal}$  の算出には断面平均土砂濃度  $C$  を与える必要があるが、単純化のため土砂濃度分布は一様として  $C_{exp}$  を使用した。また、泥流の流動深  $h$  としては、泥流の堆積が生じる直前の勾配において流れが定常状態になった際の

水位を使用した。図4をみると、実験値と理論値は比較的よく対応しているが、理論値は実験値を系統的に過小評価する傾向にある。これは、断面平均濃度に  $C_{exp}$  を使用したことにより起因すると考えられる。水路下流端で測定された土砂濃度は厳密には輸送濃度であり、濃度分布や流速分布の影響を受ける。一般的に移動床では輸送濃度は断面平均濃度より小さくなるため、式 (1) で  $C_{exp}$  を用いると平衡河床勾配を過小評価することになる。つまり、平衡河床勾配を厳密に求めるには断面平均濃度を用いる必要があるが、単純に濃度分布を一様として輸送濃度を用いても、実際の平衡河床勾配を系統的に過小評価することから、防災上は安全側の評価にはなると考えられる。以上のことから、二層モデルに基づく平衡河床勾配は泥流の平衡河床勾配の推定に有効であるといえる。

#### 参考文献

- [1] Egashira, S. et al. (2001). *Phys. Chem Earth (C)*, **26**(9), 645–650.
- [2] Itoh, T. & Egashira, S. (2007). *Proc. of DFHM4*, 151–163.
- [3] 江頭進治ら (1994). 京大防災研年報, **32**, B-2, 359–369.
- [4] 酒井佑一・堀田紀文 (2021). 令和2年度砂防学会研究発表会概要集, 613–614.
- [5] 長谷川祐治ら (2015). 平成27年度砂防学会研究発表会概要集 B, 182–183.

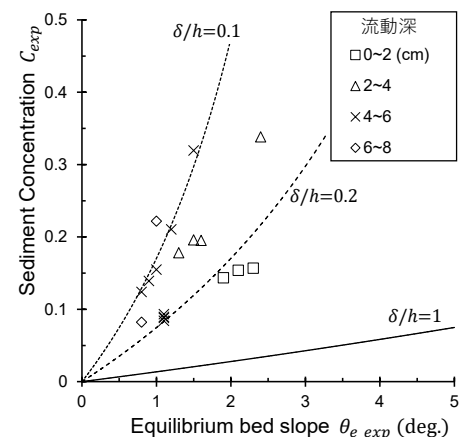


図3 泥流の土砂濃度と堆積が始まる時の水路勾配の関係。

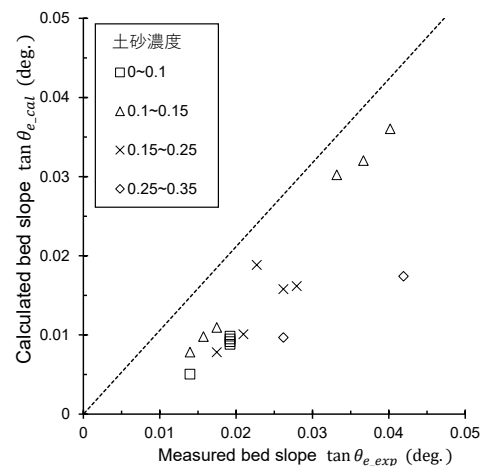


図4 平衡河床勾配の実験値と二層モデルによる理論値の比較。