

数値解析 (APM 法) に基づく土石流の停止・堆積機構に関する研究 Study on the stoppage and deposition mechanisms of debris flows based on APM method

22D310427H 榎 直哉 (河川工学研究室)
Naoya SAKAKI / River Engineering Lab.

Key Words : Debris Flows, Stoppage and Deposition Mechanisms, APM Method

1. 序論

土石流は、土砂と水が混合して流下する現象であり、極めて大きな破壊力を有する。そのため、土石流は時に甚大な人的・物的被害をもたらす。こうした被害を防止・軽減するためには、土石流の流下・発達機構に加え、停止・堆積機構の理解も重要である。

現地観測結果によれば、扇頂部へ流出した土石流は、先端に集積した大きい粒子群が堆積することにより、その堆積地形が盛り上がったカマボコ状ローブが形成されることが知られている¹⁾が、その力学的機構は明らかになっていない。池谷ら²⁾は模型実験より、勾配変化に伴って最初に土石流先端の大きな粒子が停止・堆積し、その後、後続の小さい粒子群が堆積することを明らかにした。問題となるような土石流の堆積は、緩勾配区間で発生し、重力の影響が小さくなる。そこでは粒子群の輸送において流水の影響が大きくなると考えられる。しかし、土石流内部における流水の運動や、粒子の挙動を観測・計測することは困難である。そのため、計算力学的アプローチによる土石流の停止・堆積機構の解明が求められている。

加藤ら³⁾は、流れ場を Euler 的に、粒子運動を剛体として Lagrange 的に取り扱う解析手法である Arbitrary Particle Multiphase Method (以下、APM 法⁴⁾と呼ぶ) を用いて、渓床・溪岸の侵食を伴いながら流下・発達する石礫流の流動・発達機構を明らかにしたが、停止・堆積機構に関しては検討していない。

本研究では、土石流の停止・堆積機構を明らかにすることを目的とし、APM 法⁴⁾を用いた数値実験を実施する。数値実験で得られた結果より、まず、土石流の停止・堆積過程を示す。次に、石礫粒子群の姿勢の変化と流水の挙動を明らかにする。最後に、土石流の停止・堆積時における分級現象について示す。

2. 数値解析法の概要及び数値実験条件

本研究では Fukuoka らによって構築された、非球形粒子も解析可能な resolved CFD-DEM モデル APM 法を用いる。流れの解析では、サブグリットスケール以下の乱れのモデルとして Smagorinsky モデルを用い、LES として流れを解いている。以下に流れの基礎式を示す。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \{2(v + v_{SGS})S_{ij}\} \quad (2)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$v = \mu / \rho \quad (4)$$

$$v_{SGS} = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (5)$$

ここに、 u_i は流体計算格子内で質量平均した流速、 P は圧力と SGS 応力の等方成分の和、 ρ は流体計算格子内で体積平均した密度、 g_i は重力加速度、 μ は流体計算格子内で体積平均した粘性係数 v_{SGS} は、 C_s は Smagorinsky 定数、 Δ は計算格子幅である。下付きの添え字 i, j はそれぞれ各方向成分を示す。

粒子運動については、剛体の並進と回転の運動方程式を用いて解き、石礫の接触判定および接触力は、石礫粒子を構成する球それぞれで個別要素法を用いて評価する。粒子が受ける流体力については、流れ場の運動方程式における圧力項とせん断応力項を体積積分することによって直接計算する。以下に、基礎式を示す。

$$M\dot{u}_i^g = Mg_i + F_i^f + F_i^c \quad (6)$$

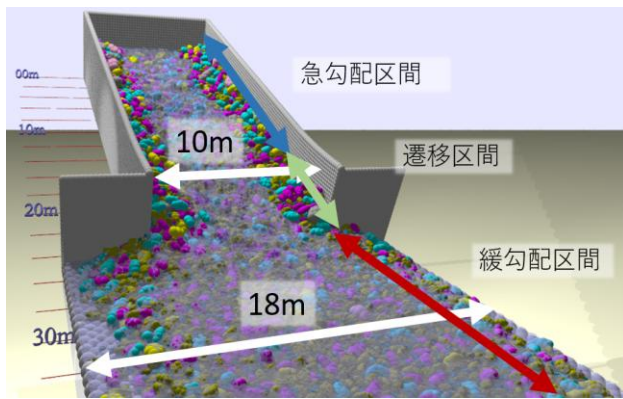
$$\dot{\omega}_{i'} = I_{i'j'}^{-1} \{ R_{j'i} (N_i^f + N_i^c) - \varepsilon_{j'k'l'} \omega_{k'} I_{l'm'} \omega_{m'} \} \quad (7)$$

$$F_i^f = \int_{\Omega_s} \left\{ -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} \{2(v + v_{SGS})S_{ij}\} \right\} d\Omega \quad (8)$$

$$N_i^f = \int_{\Omega_s} \varepsilon_{ijk} r_j^f \left\{ -\frac{\partial p}{\partial x_k} + \rho \frac{\partial}{\partial x_l} \{2(v + v_t)S_{kl}\} \right\} d\Omega \quad (9)$$

ここに、 M は質量、 g_i は重力加速度、 u_i^g は粒子速度、 F は粒子が受ける力、 N は粒子が受けるトルク、 ω は角速度、 I は慣性テンソル、 R はグローバル座標系からローカル座標系への変換行列、 ε はエディトンのイプシロン、 r_i^f は作用点の重心からの距離である。上付き添え字 f は流体の成分を、 c は固体の成分をあらわす。上付き添え字 $i - k$ はグローバル座標系を、 $i' - m'$ はローカル座標をあらわす。

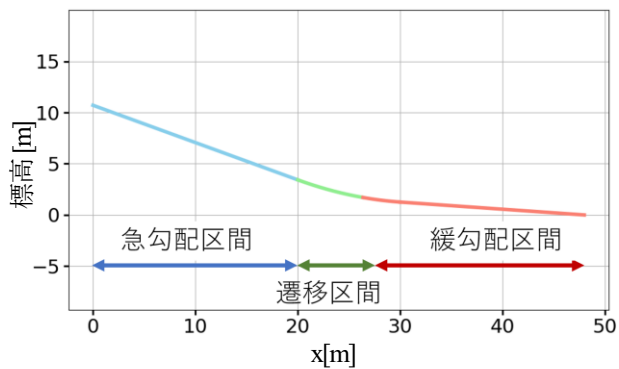
図-1 は、本研究で用いた数値実験水路の概要を示す。上流端から縦断的に 20m 地点までは 20° の一定勾配を有



(a) 数値実験水路の全体



(a) 縦断形



(b) 数値実験水路の縦断形

図-1 数値実験水路の概要

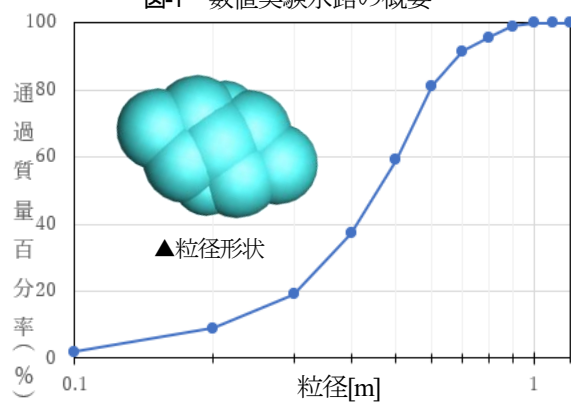


図-2 粒径分布

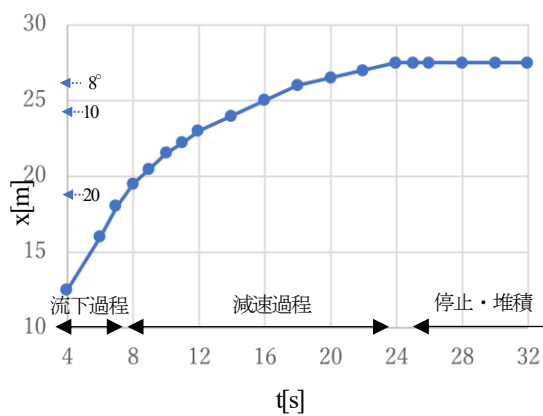
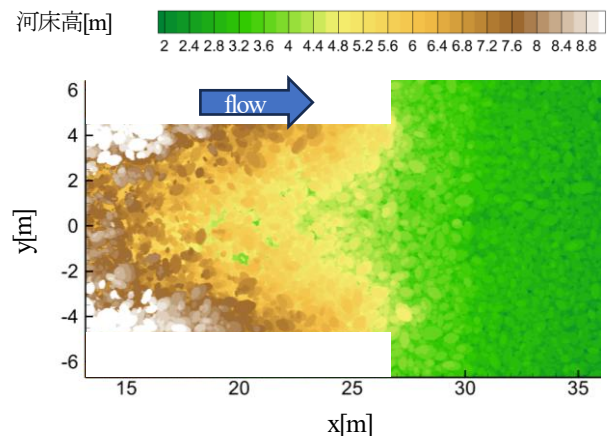
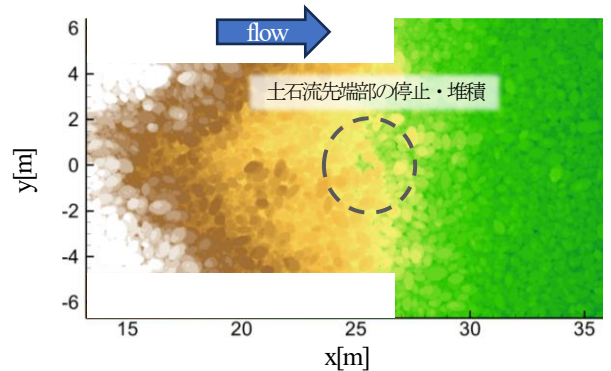


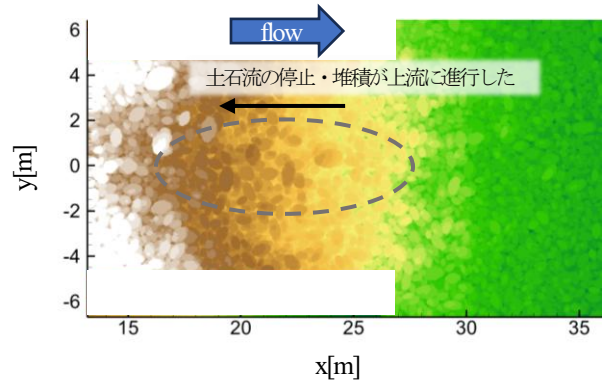
図-3 土石流先端位置の時間変化



(b) t=7sにおける縦横断形



(c) t=16sにおける縦横断形



(d) t=30sにおける縦横断形

図-4 河床高の時間変化

し、20m～30m 地点までは勾配が連続的に変化し、30mより下流の区間は、4°の一定勾配とし、また、26m地点より下流は、それより上流区間よりも広い幅を有する扇状地形を想定した水路を用いた。図-2には、粒度分布を示す0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 mの10種類の粒子群より成る。その粒子の形状および密度はすべて等しく、密度は 2650 kg/m^3 とした。急勾配区間および遷移区間には、溪岸を有しており、粒子群をランダムに投下することで溪岸を有する初期河床形状を作成した。上流端には一定流量 $15.0\text{ m}^3/\text{s}$ を与えた。

3. 勾配変化に伴う土石流先端部の減速及び停止・堆積過程

図-3は、土石流先端位置の時間変化を示している。図-3より、20°の一定勾配を流下している8s時点までにおいては、土石流は等速で移動している。その後、8sから24sの間においては水路勾配の変化に伴い、土石流の移動速度は徐々に減速する。さらに24s時点で、土石流は勾配8°の地点で停止・堆積した。

図-4は、7s, 16sおよび30s時点における河床高コンターを示している。図-4より、8sから16sの間に流下してきた土石流の先端部が水路中央、勾配10°地点に停止・堆積した。さらに16sから30sの間においては、その堆積領域が上流側へ拡大した。

以上の土石流先端部の減速、停止およびその上流側への堆積の進行を含む一連の過程は、既往の土石流実験¹⁾で報告されている結果と同様の傾向を示している。

4. 土石流の減速、停止・堆積過程における石礫の姿勢変化と流水の挙動

図-5は、水路中央断面における土石流先端部の流速分布および粒子運動の時間変化を示す。コンターはx方向流速の大きさ、ベクトルは流速ベクトルを表し、黒線は粒子を示している。図-5より、20°区間を流下している7s時点において、先端を構成する石礫粒子群は水面付近を運動している。このため、全水深にわたって石礫が流動する層が形成されている。また、この時点では、先端部の粒子の姿勢は不規則であり、特定の方向を持たずに流下している。その後、水路勾配が小さくなる16sでは、先端部の粒子群の姿勢が流下方向に長軸を向けるように変化し、覆瓦構造を呈するようになる。同時に、先頭部において水が流動する層と石礫が運動する層の分離が生じている。覆瓦構造を形成した石礫表面では、 4 m/s 以上の流速が生じている。さらに24sでは、先端部のみならず、後続流として流下してきた水面付近の石礫も同様に覆瓦構造を形成し、粒子間隙は小さくなり、石礫間隙の流速は 1.0 m/s 以下となっている。

5. 土石流の停止・堆積時における分級

図-6は、30s時点における堆積状況を示している。実験開始時に勾配10°以下の区間に存在していた粒子を黒

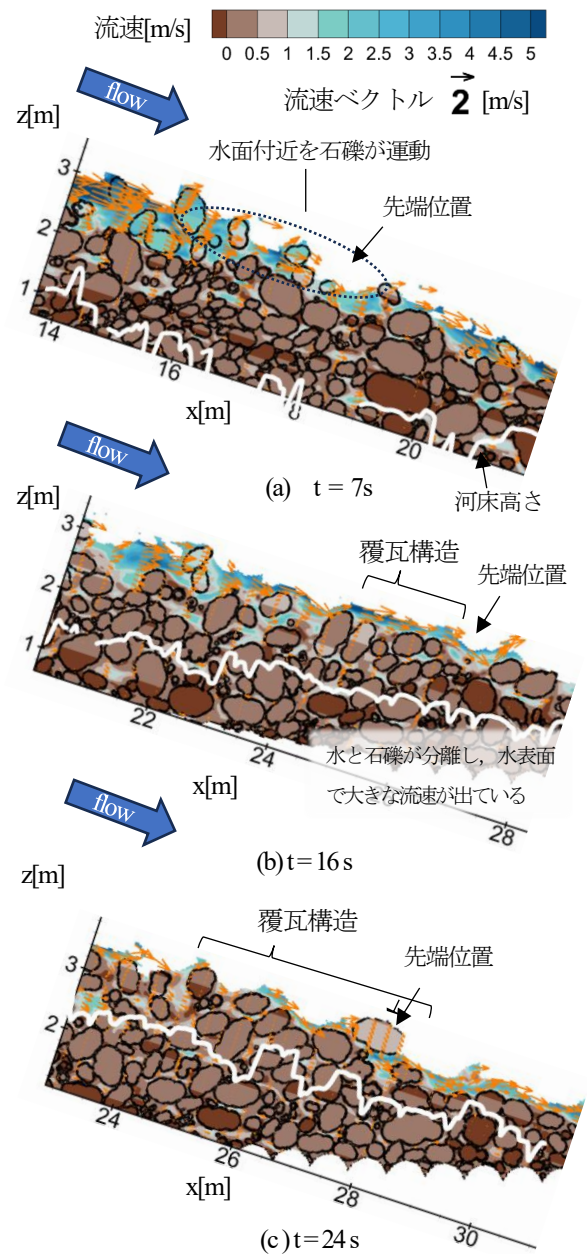


図-5 水路中央断面における土石流先端部の流速分布及び粒子運動

色で示し、上流から流下してきた粒子については粒径ごとに色分けして表示している。なお、水は非表示としている。図-6より、流下してきた粒子は粒径が小さいほどより下流側まで到達している。また、最も小さな粒径集団については、大きな粒子間の間隙へと落ち込むため、堆積河床表面にはほとんど現れていない。このことから、30s時点において、分級が堆積域内で生じている。図-7は、30sにおける対象区間の水表面流速分布および水表面流速ベクトルを示している。図-7より、前章で示した勾配10°地点における礫群の堆積に伴う河床上昇の影響を受け、約22m地点において流れが左右に二分され、左岸および右岸付近の2か所において水表面流速の大きい領域が形成されている。

これらより、中央部に形成された堆積域によって流れが側方へと偏向され、水表面付近において高流速域が形成されることで、比較的小さな粒子がその流れに追従して下流側へ輸送される。

6. まとめと今後の課題

本研究では、勾配変化を有する水路を用いて土石流先端部の挙動に着目し、先端位置の時間変化、河床変動、粒子の姿勢および流水の挙動を分析した。得られた結果を以下に示す。

土石流先端部は勾配 20° 区間ではほぼ一定速度で流下する一方、勾配が小さくなる区間に進入すると減速し、勾配約 10° 以下の区間において停止・堆積に至った。そして、水路中央部を中心とした河床上昇および堆積域の上流側への進行が確認された。

また、流下時には石礫粒子が水深方向に広く分布し、

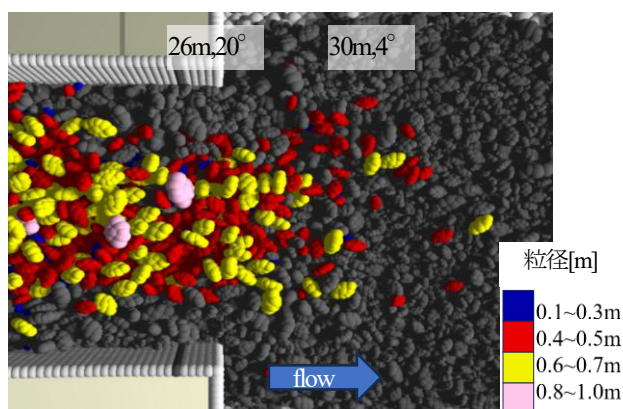


図-6 分級の様子

不規則な姿勢を保ったまま運動しているのに対し、減速過程では粒子の姿勢が流下方向に長軸を向けるように変化し、覆瓦構造が形成されることが示された。この過程において、先端部では石礫が集積する領域と水の流動が卓越する領域とに分離し、粒子間隙の縮小とともに、石礫間を流動していた水の流速が低下することを示した。

そして、停止・堆積後の堆積状況および水表面流速分布の検討から、水路中央部に形成された堆積域により流れが側方へと偏向され、水表面付近に高流速域が形成されることが示された。これにより、比較的小さな粒子が下流側へ輸送される一方で、最小粒径の粒子は大粒径粒子間の間隙に落ち込むことで、分級が生じていた。

今後は、停止・堆積時における土石流先端部の流水の三次元的な流れ構造の時間的な変化及び、粒子群に作用する重力、流体力、接触力を分析し、覆瓦構造の形成及び土石流の停止・堆積機構を明らかにする。

参考文献

- 1) 高橋保：土石流の機構と対策，近未来社，2004.
- 2) 池谷浩，水山高久：土石流の流動と堆積に関する研究，土木研究所報告，第157号，1982.
- 3) 加藤 宏季，福岡捷二：石礫流による溪床・溪岸侵食に関する研究，土木学会論文集B1（水工学），Vol.80, No.16, 23-16051, 2024.
- 4) Fukuoka, S., Fukuda, T., Uchida, T.: Effects of sizes and shapes of gravel particles on sediment transports and bed variations in a numerical movable-bed channel, *Advances in Water Resources*, 72, pp.84-96, 2014.

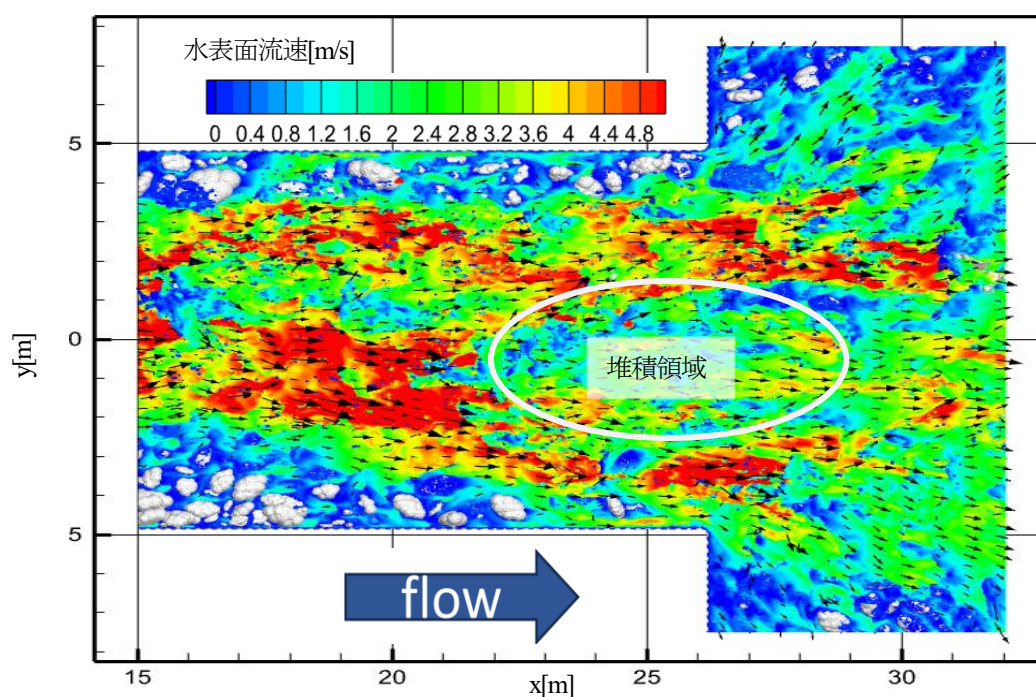


図-7 30 s における水表面流速コンター