

## 火山地域における微細土砂の土石流（ラハール）への影響：水路実験による基礎的検討

神戸大学大学院海事科学研究科 ○大海陸人, Christopher Gomez

## 1. はじめに

火山性土石流（ラハール）は、粗粒（礫・巨礫）と微細土砂（シルト～細砂）が高い固液混合比で混在することで、スケール依存かつ非線形な流動・堆積挙動を示す。そのため、従来の斜面勾配や粒子群の内部摩擦角に基づいたマクロな流体力学モデルでは、粒子間の衝突・摩擦・空隙充填など、実際のラハールで発生する粒子レベルの力学的挙動を再現しきれないという限界が指摘されている（前田ほか, 2011）。また、インドネシアのスメル火山（Semeru Volcano）Curah Lengkong 流路における詳細な地形・堆積物調査（Gomez et al., 2018）および著者が 2024 年に実施した現地踏査（写真①参照）では、ミリメートル級から数十センチメートル級までの粒径が混在し、流路断面内での礫密度の局所的変化が選択的堆積を誘発していることが確認された。これらは、流体の乱流構造や局所地形起伏が粒径選別を強く制御していることを示唆する。しかし、これらの堆積構造の形成過程、特に礫前後における微細土砂の侵入・堆積・再侵食がどのように発生するかを粒子レベルで定量的に把握した研究は少なく、実験的検討が求められている。本研究では、回転水槽を用いて礫の存在による微細土砂の選択的堆積への影響を再現し、礫前後の堆積パターンと表面形状の変化を定量評価することで、火山地域における局所地形形成メカニズムの理解と、ラハール堆積挙動のモデル構築に資することを目的とする。

写真1 スメル火山 Curah Lengkong 流路



## 2. 実験方法

本研究では、微細土砂が粗粒障害物（礫）に遭遇した際の堆積・侵入・分散挙動を再現し、火山流路における選択的堆積の初期過程を室内実験により検討した。

### 2.1 実験装置および材料

実験には、内径約 50 cm・高さ約 30 cm・容量 10,000 mL の円形ガラスピーカー（IWAKI Pyrex）を用い、底床には新陶カラーサンド SY-3（粒径 1.0～2.0 mm）を厚さ 3 cm で均一に敷設した。中央には、半切り円筒容器を設置し、片側に切り欠きを入れることで水流の一方向性を持たせた構造とした。また、回転流を生成するため、円筒中央部にプロペラを設置し、回転速度を制御した。底床上には、直径約 3 cm の礫を流路中央部に 1 個配置し、さらに礫の前後それぞれに 2 個ずつ、計 4 個の 7cc キューブ（プラスチック立方体）を底床に埋設した。これにより、微細土砂の侵入状況や底床の変化を局所的に比較可能とした。微細土砂には、粒径 0.15～0.03 mm または粒径 0.30～0.05 mm の粒子（いずれも着色粉体）を用い、2.8 L の水に対して 100 g を投入することで 3.6 wt% の濃度条件とした。この設定は、過去の水路実験や現地観測から報告されている希釈～中濃度ラハール（2～5 wt% 程度）に基づいており、現場に即した粒子濃度の再現を目的とする。

### 2.2 実験手順

実験開始前に全体を静水状態にし、プロペラを用いて回転流を発生させた後、微細土砂を回転流生成部（円筒切り欠き側）に 1 分半かけて逐次投入した。観察は、円筒の切り欠きとは反対側（無切り欠き側）から行い、回転流の直接影響を遮断した環境下で、円筒周囲を回り込む一方向性流れによる粒子輸送・堆積挙動を記録した。流動後、沈降が落ち着いた時点でキューブを静かに回収し、重量変化（侵入粒子量）を測定した。また、キューブ表面全体を上方および斜めから撮影し、写真測量（SfM: Structure-from-Motion）によって三次元点群データを生成、表面形状を精密に再構成した。特に、表面粗度（標高変動の標準偏差や局所スケールの変化量）を指標として、微細粒子による被覆の程度を定量評価した。

## 3. 結果

本実験により、微細土砂が粗粒障害物（礫）に遭遇した際の堆積挙動に、明確な空間的偏りが生じることが確認された。とくに以下の傾向が顕著であった。

### 3.1 視覚的観察

礫を配置しない条件では、いずれの粒子も底床表面にランダムに分散・沈降した。粒径の小さい方がより広範囲に拡散し、局所的な濃集や堆積厚の差異は小さかった。一方、礫を配置した条件では、礫の前後で明確な堆積パターンの非対称性が確認された。上流側では、礫前面から約 0.5～1 個分の距離にわたって堆積が抑制され、底床の粗粒表面が露出したまま、または一時的に堆積しても再び侵食される傾向が強かった。これに対して下流側では、底床付近の粒子が流れの向きとは逆方向に移動しながら礫直下に引き寄せられ、そこに集中的に堆積する傾向が観察された。

### 3.2 キューブの重量分析

礫の上流および下流に配置したキューブの重量変化を比較した結果、礫の最も上流側と最も下流側のキューブで回収後の重量が変化する傾向が認められた。

### 3.3 SfM による表面粗度変化

底床表面の堆積状況を SfM（Structure-from-Motion）によって三次元点群化し、表面粗度を算出した。その結果、最も上流側と最も下流側が微細土砂によって粗粒底床の凹凸が平滑化される傾向がみられた。一方、上流側の礫直下では粗度に顕著な変化は見られなかった。この結果は、堆積厚や粒子分布の空間的差異を客観的・定量的に可視化できる指標として SfM の有用性を示すものであり、従来の主観的観察に比べて、堆積状態の再現性と信頼性を大きく高めるものである。

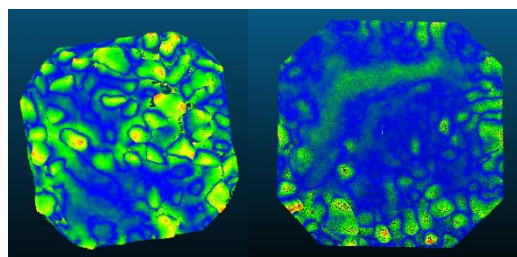


図1 表面粗度の1例（左:礫の上流直下，右: 礫の上流側）

## 4. 考察

本実験では、礫の前後で微細土砂の堆積に明確な非対称性が生じることが示された。特に下流側では、礫によって形成される低速・低圧域により微細土砂が集積しやすく、「堆積の捕捉場」として機能することが明らかとなった。キューブによる重量増加や SfM による粗度低下の定量結果は、視覚的観察と整合しており、局所的な堆積構造の形成過程を多角的に把握するうえで有効であった。本結果は、スメル火山などの実流路で観察される巨礫周囲の細粒濃集構造とも整合的である。これらの多角的アプローチにより、従来の主観的・経験的観察に依存してきた微細土砂の局所挙動を、客観的かつ再現性ある形で捉える方法論を提示できた点は、本研究の大きな成果である。これらの知見は、スメル火山など実流路で観察される局所的な堆積構造とも一致し、火山地域における選択的堆積メカニズムの解明に寄与する。一方、本研究は回転水路という単純化された設定であり、今後は傾斜や断面変化などを取り入れたより現実的な水路実験に発展させる必要がある。したがって、得られた知見は堆積機構の一側面を抽出したものであり、今後はより実環境に近い条件下（傾斜水路、変化断面、複数障害物など）での追試・検証が不可欠である。また、土砂濃度や粒径組成の異なる条件下での系統的な比較も必要である。

## 5. 結論

本研究は、微細土砂が礫に遭遇した際の局所的な堆積挙動を定量的に明らかにし、視覚・重量・三次元形状の多角的な評価により「捕捉場」の形成を検出した。これは、自然流路における堆積構造の物理的理解に資する知見である。今後は、本研究で得られた知見と評価手法を基盤に、直線水路を用いたスケールアップ実験に展開し、実環境に即したラハール堆積モデルの構築を目指す。

引用：前田ら, 2012, 砂防学会誌 64, 3-10; Gomez et al., 2018, Journal of Volcanology and Geothermal Research 353, 102-113