



京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute
Kyoto University

一般共同研究

2023GC-10

実験的研究に基づく粘着性・非粘着性 ラハールの数値モデルの開発 Development of a numerical model on cohesive and non-cohesive lahars based on experiments

令和 7 年 5 月

May, 2025

研究代表者 常松 佳恵

Coordinator Kae Tsunematsu

1 はじめに

ラハールは火山の噴火時や噴火後に火山砕屑物と水と一緒に流れ下る現象である。重力に従って広範囲に流下するため、火口から長いものでは 100 km 以上も離れた場所まで到達することもあり、甚大な被害を及ぼした記録もある。ラハールの流下範囲はその流動の性質によって左右され则认为るが、Vallance and Scott (1997)ではレーニア山から発生したいくつかのラハールの流下範囲を比較し、粘着性のラハールが非粘着性のラハールよりも長距離流下することを示している。Scott et al. (1995) は、ラハール堆積物中の粘土の割合が 3–5 wt%以上含まれるものを粘着性土石流、それ以下のものを非粘着性土石流とした。一方、ラハールの流動と広がりに関して実験を行った例は多くあるが (Major, 1997; Iverson et al., 2004; Logan and Iverson, 2007), ラハールの粘着性・非粘着性に着目して実験を行った例は筆者が知る限りでは見当たらない。また、ラハール全般に関する数値モデル (Iverson et al., 1998; Pitman and Le, 2005) はあるものの、粘着性・非粘着性の違いを表すモデルについてはあまり注目されていない。そこで、本研究では粘着性を考慮した数値モデルを開発することを目指し、ラハールの粘着性・非粘着性と、流下距離や速度の関係を明らかにすることを目的とした。特に、本研究では粘土が流動性に与える影響に注目し、粘土と珪砂を固相の構成物とし、それに水を加えた固液二相流の実験を行った。

2 研究手法

2.1 水路実験

水路流下実験では粘土試料として入手しやすいカオリン粘土 (林化成) およびスメクタイト系鉱物であるベントナイトの粉末 (主成分はモンモリロナイト) を用い、それらをトーヨーシリカの 7 号珪砂 (粒径約 0.08–0.3 mm) と混合し、さらに水を加えてラハールを模した混合物とした。混合物は質量一定の質量 400 g とし、それを図 1 のような水路の上部に置き、ゲートを開放することによって水路内を混合物が流下する様子をビデオカメラで撮影した。初めの 52 ケースの実験は、幅 10 cm 長さ 150 cm の水路を使用し、その後 321 ケースは幅 7 cm、長さ 174 cm のものを使用した。水路の勾配は滑車を用いて変化させることが可能であり、10, 15, 20, 25, 30 度の傾斜で実験を行った。また実際にラハールが流下する際の流れ底部の摩擦を想定し、7 号珪砂を水路の底に貼り付けて実験を行った。

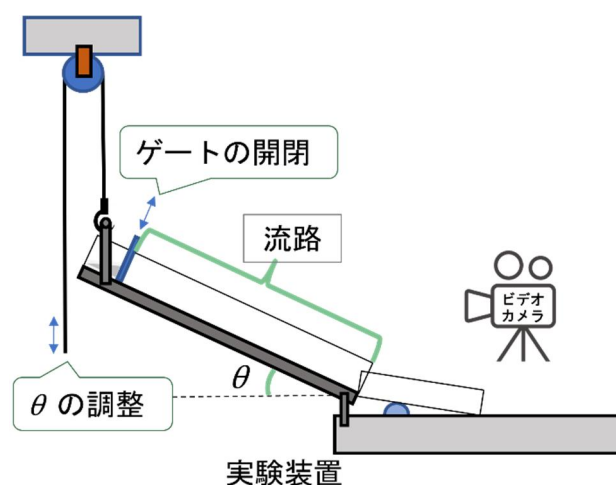


図 1 水路実験の装置. 水路の上部は滑車によって高さを変えることができるようになっており，水路の下部には氾濫原を想定した傾斜 3 度の木製の板を置いた．流れを正面からビデオカメラで撮影した．なお，水路の底面には，自然の状態に近い摩擦を再現するため，7 号珪砂を満遍なく薄く貼ったシートを敷いた．

水路実験では混合物の固相含有率，固相中の粘土含有率，粘土の種類，水路の勾配を変化させた条件で合計 373 ケースの実験を行った．主な実験条件を表 1 に示す．

粘土は温度によって物理的性質が変化しやすいため，室温は実験棟内の空調を利用して約 20℃の温度で実験を行った．また混合物の組み合わせは，珪砂と水，カオリンと水，カオリンと珪砂と水，スメクタイトと珪砂と水などで実験を行った．各ケースの固相中の粘土含有率，固相含有率，勾配，流下距離，平均速度などの結果をまとめた．

表 1 水路実験の主な条件実験

勾配 (°)	固相含有率 (wt%)	固相中の粘土含有率 (wt%)	粘土の種類
10	30, 40, 50, 60	0–100	カオリン
15	30, 40, 50, 60	0–100	カオリン
20	10, 30, 40, 50, 60	0–100	カオリン, スメクタイト
25	10, 30, 40, 50, 55, 60	0–100	カオリン
30	50	0–100	カオリン

なお，実験から得られた画像を解析することによって，平均速度と先端速度の二種類の速度を求めた．平均速度は，流下距離と流下時間から求め，1) 流れ全体が水路を流れ切った場合は，水路の長さを流下距離とし，流れ切るまでの時間を用い，2) 流れ切らなかった場

合は，ゲートから流れの先端までの距離を測定し，流れが動かなくなるまでにかかる時間を用いた．一方，先端速度はビデオのフレームごとに移動した距離（流下距離）をフレームの時間間隔で除して求めた．したがって，平均速度は実験ケースごとに一つの値が求められたが，先端速度では速度の時間変化が得られた．

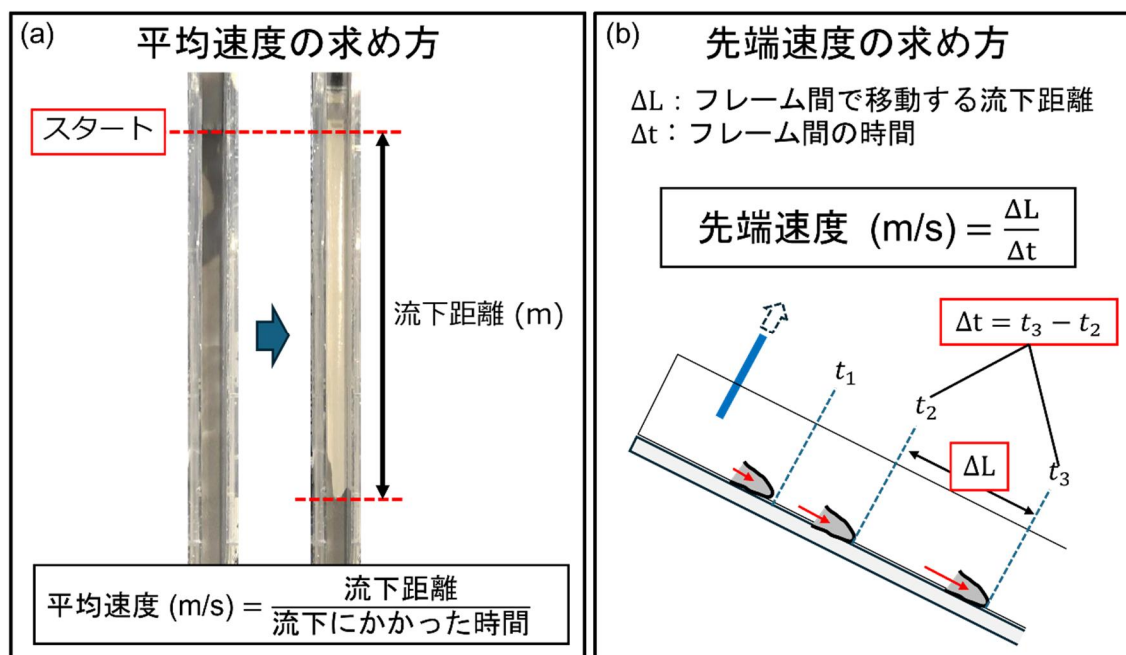


図 2 ビデオ画像から速度を求める方法．(a)平均速度は流下距離を，その距離を移動するのに要した時間で割り，(b)先端速度はフレームごとに流下した距離をフレームごとの時間で割ることによって求めた．

2.2 画像解析

ビデオカメラで撮影された画像は 30fps もしくは 60fps のフレームレートで撮影されており，一枚の画像の解像度は 1980×1080 ピクセルであった．この画像は動画からフレームごとの静止画に変換し，さらに射影変換によって画像の遠近による大きさの違いを補正した上で解析に用いた．射影変換には外村（2013）に示された方法を用いた．

3 結果

3.1 流動の様子

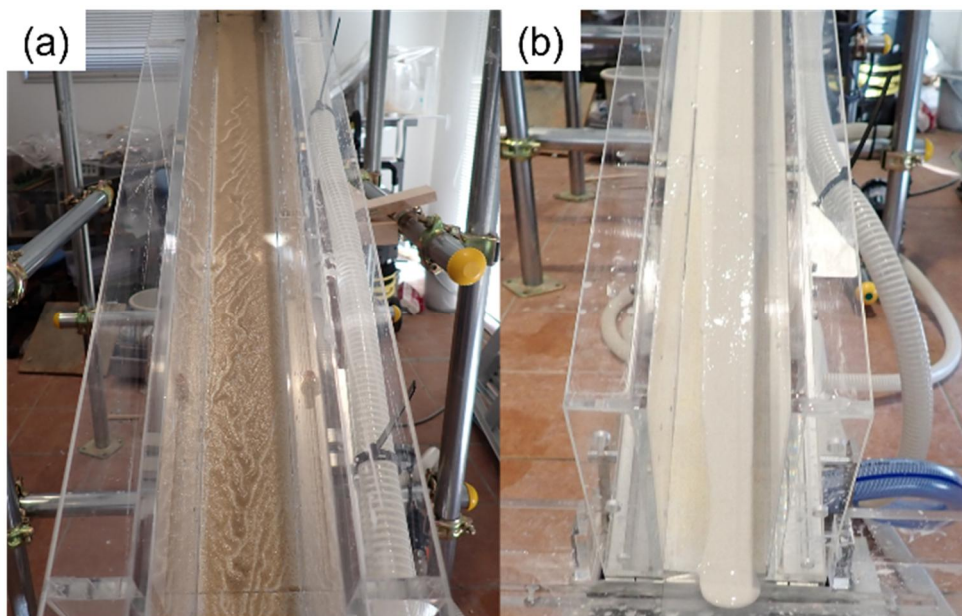


図 3 流下後の水路に堆積した粒子の様子 (a) 珪砂と水のみ混合物, (b) 珪砂とカオリンと水の混合物.

実験を行って水路の様子をカメラで撮影した際、砂と水の場合とさらにカオリンを加えた場合では流動の様子の違いが明らかであった。図 3(a)で表されるように、珪砂と水のみを混合した場合には、流動の際に水と砂が分離し、流路上には砂が模様を作って堆積して、水のみが氾濫原まで流れ下る様子が見られた。一方、図 3(b)に表されるように、珪砂と水にカオリンを加えた場合には、水と砂の分離が起こらずに様に水路の中に広がって下流まで流下する様子が見られた。

3.2 流れの平均速度

撮影した動画から、平均速度の粘土含有率に対する変化を解析した。液相（水）と固相（珪砂+粘土）の割合が 1:1 の場合に、固相中の粘土含有率に対して平均速度がどのように変化するかを表したグラフを図 4 に示す。グラフには、水路の傾斜角 20° 、 25° 、 30° それぞれに、固相が珪砂のみの場合の平均速度を点線で表した。平均速度が最大値を取るのは、固相における粘土の重量分率が 0.1–0.2 の場合であり（図 4）、平均速度の最大値は傾斜が大きいほど高くなる。また、どの傾斜角においても、珪砂に粘土を少し（重量分率 <0.1 ）加えただけで急激に平均速度が増加する様子が見られる。固相中の粘土の重量分率が約 0.5 を超える時、平均速度は急激に減少し、その後は 0 に近い値で推移する。

同様の実験をカオリンだけでなく、スメクタイト系鉱物でも行い、粘土鉱物による違いを検討した。異なる二種類の粘土を用いた実験について平均速度を比較した結果を図 5 に示す。スメクタイト系鉱物を用いた場合も、粘土の重量分率が 0.1 以下では平均速度は珪砂のみの場合よりも大きくなるが、それよりも粘土量が増えると平均速度が急激に減少する。カ

オリンと同様に粘土の重量分率に従って平均速度が一旦増加しその後減少するものの、スメクタイト系鉱物を用いた時は、減少に転じる重量分率の値が小さい。

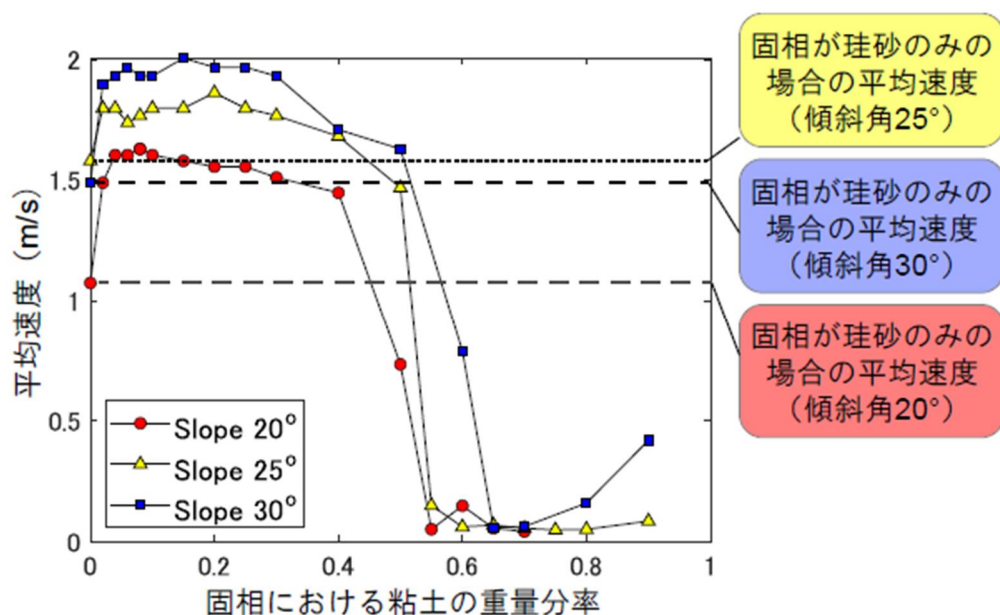


図 4 固相における粘土の割合を変化させた場合の平均速度。粘土はカオリンを用いた。この実験における水と固相（粘土+珪砂）の重量比は 1:1 である（水 200g, 固相 200g）。

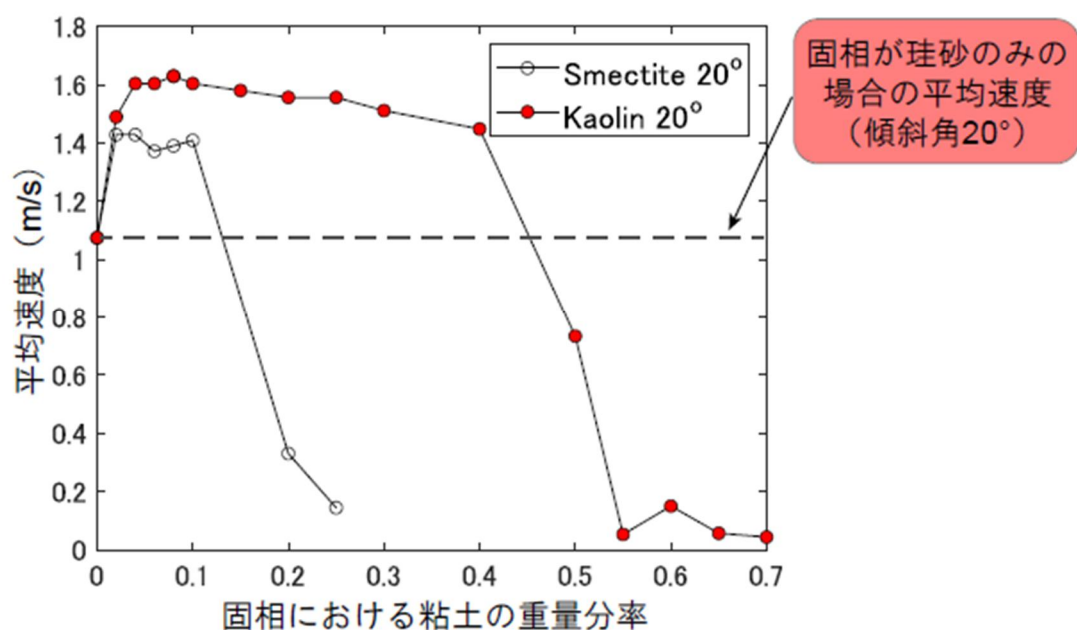


図 5 固相における粘土の割合を変化させた場合の平均速度。カオリンとスメクタイトを粘土として用いた場合の平均速度を比較した。この実験における水と固相（粘土+珪砂）の重量比は 1:1 である（水 200 g, 固相 200 g）。

3.3 流れの先端速度

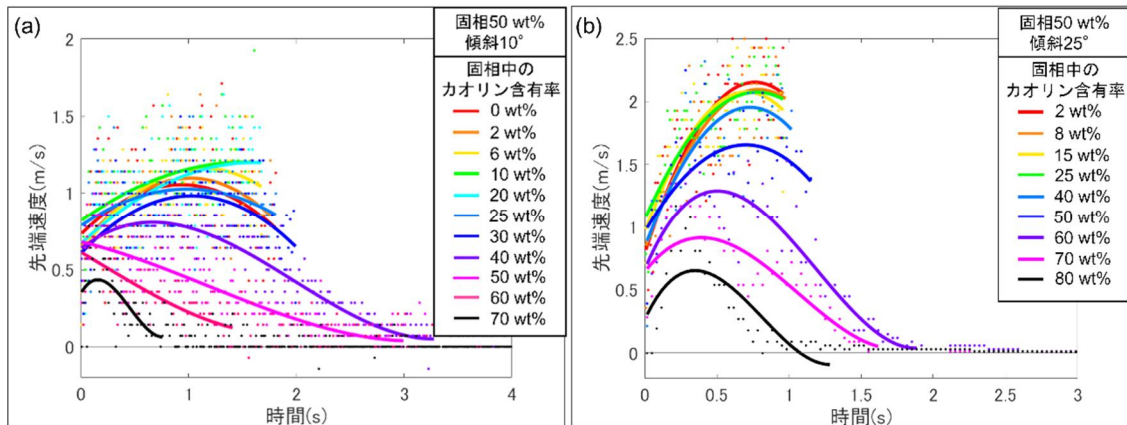


図 6 カオリン含有率を変化させたときの先端速度の変化（固相含有率 50 wt%）。点は生データを示しており、曲線は近似データを示す。色はカオリンの含有率を表している（凡例参照）。（a）傾斜 10°，カオリン含有率 0-30 wt% は 2 次の多項式近似，カオリン含有率は 40-70 wt% は 3 次の多項式近似を用いて近似した。（b）傾斜 25°，カオリン含有率 2-50 wt% は 2 次の多項式近似，カオリン含有率は 60-80 wt% は 3 次の多項式近似を用いて近似した。

固相含有率 50 wt% の場合の先端速度の変化のうち、水路の傾斜が 10° と 25° の場合を図 6 に示す。画像解析から求められた時間ごとのデータはばらつきが大きく傾向が分かりづらいため、データを 2 次または 3 次の多項式でフィッティングしたラインも示した。傾斜が 10° の場合は、まず先端速度は時間とともに増加し、1.5 秒くらいまでに先端速度は最大値に達し、その後は減少する様子が見られた。一方、傾斜が 25° の場合には先端速度が最大値に達する時間が流れ始めから 0.5–1.0 秒にあり、その後速度が減少して 0 に近づく。傾斜が 10° の先端速度のプロファイルは、傾斜が 25° の際のそれを時間軸方向に引き延ばしたような形になる。傾斜が大きい方が、先端速度の最大値がより高くなり、斜面が急になるほど速度が増加する様子が見られた。また、先端速度が最大値を取るカオリン含有率は、傾斜 10° の場合は 10 wt%，傾斜 25° の場合には 2 wt% となっており、先端速度が最大値を取るカオリンの含有率は、傾斜が大きい場合の方が小さくなる。

4 考察

粘土の重量分率を変化させた場合の流動性は、固相中の粘土含有率に対して線形に増加しないことが本研究の実験結果から明らかとなった（図 4，図 5）。よって、ラハール混合物の流動性は、浮力の増加によって比較的大きい粒子が動きやすくなる効果と、粘性の増加によって動きが鈍くなることのバランスによって支配されると考えられる。すなわち、固相中の粘土の重量分率が小さい場合には、粘土が水と混ざること、珪砂以外の流体として振舞う部分の密度が増加し、それによって珪砂粒子が浮力を受けるため珪砂粒子間の距離が開

き、動きやすくなる。しかし、粘土の重量分率がさらに増加すると、粘土分の増加によって液体として振舞う部分の粘性が増加し、流動性が妨げられたと考えられる。

5 結論

水路上を珪砂・粘土・水の混合物を流下させる実験を行い、粘着性・非粘着性ラハールの流動性の変化について調べた。その結果、堆積物中の粘土含有量に基づき定義される粘着性ラハールに近い状態の流れは、粘土を少量 (<10 wt%) 含む場合に、水路を流れる平均速度が（珪砂と水のみの混合物より）大きくなることが明らかとなった。しかしながら、固相中の粘土の重量分率が増加するにしたがって平均速度は単調増加せず、増加後に減少に転ずるという非線形性を示した。この非線形の要因は、液体として振舞う部分（水と粘土の混合物）の浮力と粘性のバランスが考えられる。固相中の粘土含有率が比較的小さい (<10 wt%) 場合には、液体として振舞う部分の浮力が流動性を増し、さらに固相中の粘土含有率が大きい場合には、液体として振舞う部分の粘性が増加するために流動が妨げると考えられる。このように、粘着性の一要因と考えられて来た粘土鉱物の割合により、ラハールの流動性は影響を受けるが、その影響は非線形に現れることが本研究によって明らかになった。

謝辞

本研究は京都大学防災研究所の共同研究としてご支援をいただきました。ここに感謝申し上げます。

引用文献

- Iverson, R. M., Schilling, S. P., Vallance J. W. (1998) Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *GSA Bulletin*, 110 (8): 972–984.
- Iverson et al., 2004, Granular avalanches across irregular three-dimensional terrain: 2. Experimental tests. *J. Geophys. Res.*, 109: F01015.doi:10.1029/2003JF000084
- Logan M., Iverson R. M., (2018) Videos of experiments conducted at the USGS Debris-Flow Flume 1992–2012. *U.S. Geological Survey Open-File Report* 2007–1315, v. 1.4
- Major, J.J., Pierson, T. C., Scott, K. M. (2005) Debris flows at Mount St. Helens, Washington, USA. In M. Jakob and O. Hungr (Eds.), *Debris-flow hazards and Related Phenomena*. (pp. 685–731). Springer Berlin Heidelberg.
- Pitman, E. B. and Le, L. (2005) A two-fluid model for avalanche and debris flows. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci.* 363(1832):1573–601. doi: 10.1098/rsta.2005.1596.
- Scott, K. M., Vallance, J. W., Pringle, P. P. (1995) Sedimentology, behavior, and hazards of debris flows at Mount Rainier, Washington. *U.S. Geological Survey Professional*

Paper, 1547, 56 p.

外村元 (2013) アルゴリズム×プログラム!斜めをまっすぐに! **OpenCV** で試せる認識で欠かせない! 実用画像補正テクニック(第 1 回)対象の向きがわかっているだけで回転するだけ! 基本: 射影変換. インターフェース = **Interface**: コンピュータ・サイエンス&テクノロジー専門誌, 39(12), 143–152.

Vallance, J.W. and Scott, K. M. (1997) The Ocoela Mudflow from Mount Rainier: Sedimentology and hazard implications of a huge clay-rich debris flow. *GSA Bulletin*, 109 (2): 143–163.