

融雪型火山泥流発生メカニズムの解明のための融雪実験

三重大学 ○堤大三

1. はじめに

積雪のある火山において噴火が発生した場合、噴石や火砕流、溶岩流等の高温の火山噴出物が山腹斜面上の積雪を融かし、融雪水が斜面の土砂を巻き込みながら流下し、大規模な泥流に発達する場合があります。これは融雪型火山泥流と呼ばれ、下流地域に甚大な被害を及ぼす危険な現象と考えられている。現在、国土交通省によって、国内49火山を対象とした火山噴火緊急減災対策砂防計画が策定され、積雪地域にある火山の多くでは、融雪型火山泥流による被害想定が行われている（例えば、白山火山噴火緊急減災対策砂防計画，2021）。泥流の流下挙動は、既存モデル（例えば宮本ら，1989）によって解析されているが、泥流の入力条件となる融雪速度や土砂供給には単純化された入力ハイドログラフが仮定されている。融雪型火山泥流の推定精度を向上させるためには、実際の融雪プロセスをもとに推定されたハイドログラフを入力値として用いることが望ましい。

2. これまでの実験・推定モデルの変遷

融雪プロセスを明らかにするために、筆者らの研究グループは現地実験を実施し、それをモデル化して融雪水量の推定を行ってきた。それらの実験や推定モデルの変遷を以下に述べる。

初期の実験では、積雪層に70℃程度の熱水を供給する融雪実験を実施したが（堤ら，2011；図-1a），本来の融雪プロセスとは異なり、熱量も十分ではないため、500℃まで加熱した土砂を熱源として供給する実験に移行した（図-1b, c）。その実験結果をもとに、加熱土砂層内の一次元熱伝導解析手法を用いて融雪速度を推定する手法を提案した（村重ら，2015）。さらに推定した融雪水量を入力値として泥流挙動のシミュレーションを行った（宮田ら，2014；山口ら，2019）。しかし、火山噴出物が火砕流の場合、高速で積雪斜面を流下し、積雪と土砂が混合する可能性が高い。また、噴出物が噴石の場合、高速で落下した噴石は積雪層に貫入すると考えられる。このことから、積雪と土砂との混合を想定した融雪実験を行った（図-1d）。また、加熱土砂層内の一次元熱伝導では雪と加熱土砂が混合した状態での熱移動を表現することができないため、土砂粒子単体の熱移動を計算する必要がある。そこで、土砂粒子を球形と仮定して、球面座標系による熱伝導解析を行

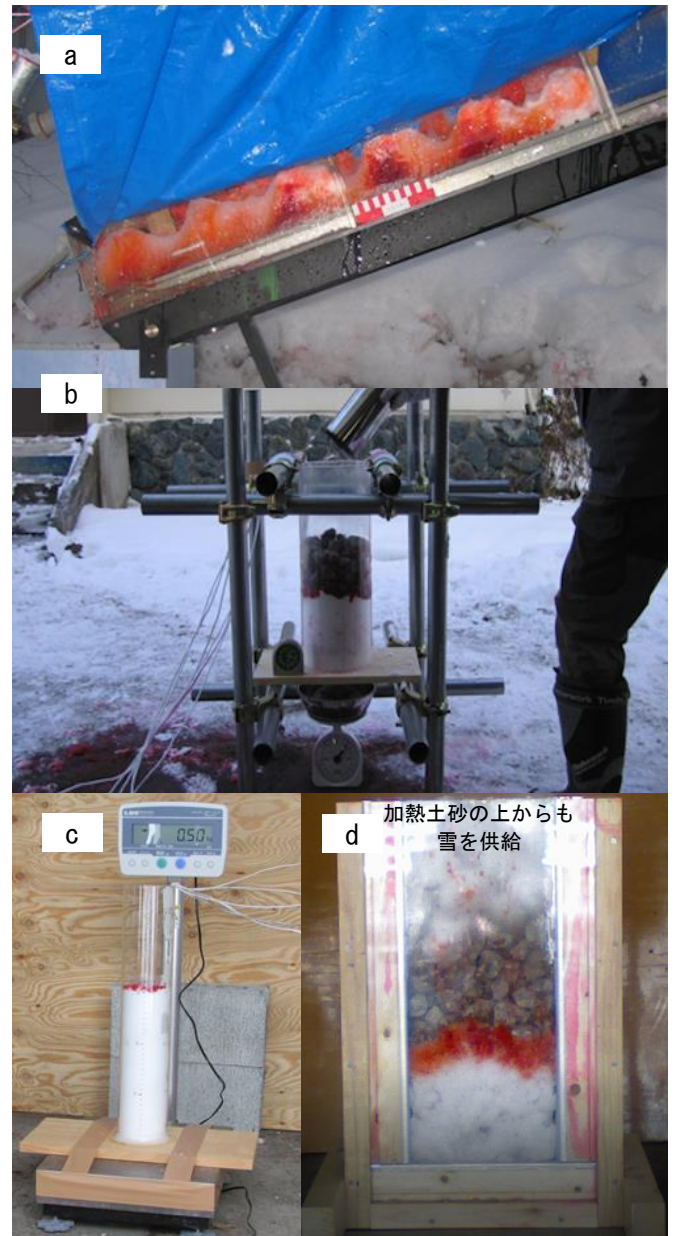


図-1 融雪実験の変遷 (a:熱水供給, b:加熱土砂供給による流量計測, c:加熱土砂供給による飽和帯計測, d:加熱土砂と雪の混合を想定)

って融雪速度を推定した（中里ら，投稿中）。以下に、雪と加熱土砂の混合を想定した実験と解析について詳しく述べる。

3. 積雪と砂礫の混合を想定した融雪実験

実験は、岐阜県高山市にある京都大学防災研究所附属穂高観測所にて、十分に積雪のある冬期に行った。薄い箱型の実験装置（高さ443 mm，幅183 mm，厚さ64 mm）に雪を充填し、別途用意した装置で設定温度（約500℃）まで加熱した

平均粒径の異なる土砂 (Case 1: 12 mm, Case 2: 12 mm, Case 3: 24 mm, Case 4: 48 mm) を実験装置の積雪層の上に供給し, さらにその上から雪 (Case 1: 0 kg, Case 2: 0.61 kg, Case 3: 0.44 kg, Case 4: 0.42 kg) を供給した。なお加熱土砂の上下の雪の量の比率は1:2とした。実験装置の正面からビデオカメラで融雪挙動を撮影し, 映像を解析することで, 融雪量の時間変化 (融雪速度) を計測した。また, 実験装置全体を重量計に乗せた状態で実験を行うことで, 水蒸気として損失する水分量の時間変化も記録した。結果を図-2に示す。投入した加熱土砂が持つ総熱量が全て雪の融解に費やされた場合の総融雪量で融雪水量を除いて標準化した値を縦軸に示している。積雪層の上面に加熱土砂を静置したCase 1ではゆっくりと融雪が進んでいるのに対し, Case 2~4では, 雪玉を供給し, 加熱土砂と上側の雪が密に接触し始めた後, 急激に融雪が進行している。融雪速度 (接線の傾き) は, 土砂の粒径が小さいほど大きいことがわかる。

4. 融雪水量推定モデル

雪と加熱土砂の混合条件での融雪水量を推定するため, 式 (1) に示す球面座標系の熱伝導方程式を用いて, 個々の土砂粒子内部の温度分布変化を求め, 式 (2) の熱流束の式から土砂粒子から積雪層へ供給される熱量を求めた。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial r} \quad (2)$$

ここで, T : 土砂温度[°C], k : 土砂の熱伝導率[W/m/K], c : 土砂比熱[J/kg/K], ρ : 土砂密度[kg/m³], r : 半径座標[m], t : 時間[s], q : 土砂粒子表面での熱流束[W/m²]である。初期条件は $T = T_0$ [°C], 境界条件は $r = D/2$ において $T = T_w$ [°C]とした。ここで, D : 土砂粒径[m]である。粒径は実験で用いたものと同じ3種類とし, 土砂量は1 kgで統一した。結果を図-3に示す。融雪開始時 ($t = 30$ s) と同時に最大の融雪速度を示し, 徐々に低下している。また, 粒径が小さいほど融雪速度が大きいことがわかる。計算結果と実験結果は同じ傾向を示した。

5. おわりに

実験結果と, それをもとにした推定モデルによって, 雪と加熱土砂が混合した場合の融雪速度は積雪層の上に土砂層を設置した場合に比べて非常に大きくなることがわかった。また, その

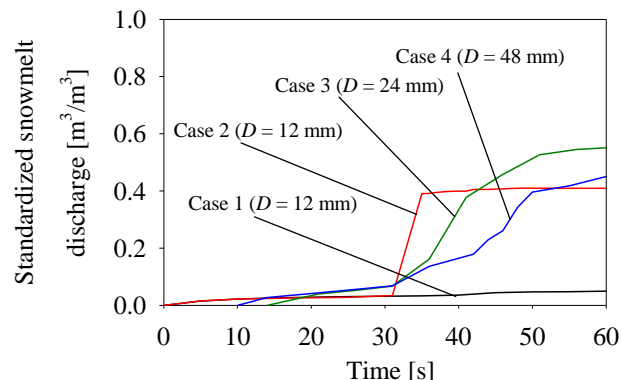


図-2 実験における標準化された融雪水量の時間変化

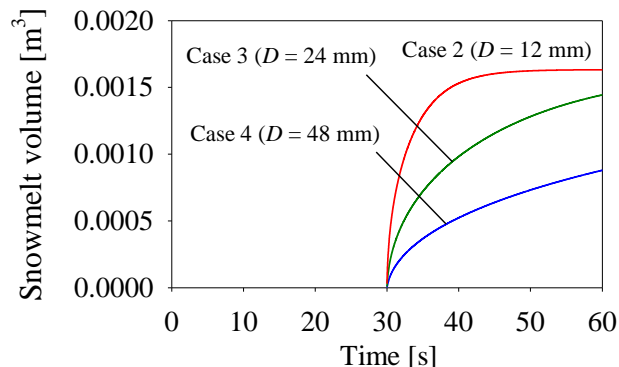


図-3 粒径別の推定融雪水量の経時変化比較

場合, 土砂の粒径が小さいほど融雪速度が大きいことも示された。土砂層全体での熱移動を考える際は, 融雪速度と土砂の粒径は無関係であったが, 土砂と積雪の混合状態では, 融雪速度が土砂粒径に大きく依存することがわかった。これらのことは, 融雪型火山泥流の予測において火山学との連携が必須であることを示している。

参考文献

- 堤大三, 藤田正治, 宮田秀介, 志田正雄, 長野快 (2011) : 噴火による融雪型火山泥流の発生機構に関する基礎的検討, 京都大学防災研究所年報, 54B, p. 593-600
- 中里友輔, 本居絵子, 堤大三: 火山噴出物と積雪の混合状態を考慮した融雪型火山泥流発生過程の実験と解析, 砂防学会誌, 投稿中
- 白山火山噴火緊急減災対策砂防計画検討委員会 (2021) : 白山火山噴火緊急減災対策砂防計画, 国土交通省, 石川県, 岐阜県, 82 pp.
- 宮田秀介, 堤大三, 村重慧輝, 宮本邦明, 藤田正治 (2014) : 泥流発生過程を考慮した融雪型火山泥流の予測, 土木学会論文集B1 (水工学), 70(4), 1949-1954
- 宮本邦明・鈴木宏・山下伸太郎・水山高久 (1989) : 十勝岳大正 15 年 (1926 年) 泥流の再現計算, 水工学論文集, 33, p. 361-366
- 村重慧輝, 堤大三, 宮田秀介, 藤田正治, 酒井英男, 上石勲 (2015) : 火山泥流発生機構解明のための高温砂礫による融雪に関する実験的研究, 砂防学会誌, 67(6), p. 3-10
- 山口翔大, 宮田秀介, 堤大三, 村重慧輝, 藤田正治 (2019) : 数値解析による積雪条件の異なる融雪型火山泥流予測, 砂防学会誌, 71(6), p. 3-13