

高温土砂による融雪に関する実験的研究

京都大学大学院 ○村重慧輝

京都大学防災研究所 堤大三・宮田秀介・藤田正治

富山大学大学院理工学研究部 酒井英男

防災科学技術研究所雪氷防災研究センター 上石勲

1. はじめに

積雪期に火山の噴火が起こると、火山噴出物が大量の雪を融雪し、その解けた融雪水と火山噴出物とが混ざって泥流が発生することがある。この現象を融雪型火山泥流と呼び、河床を侵食しながら流下し、しばしば巨大化する。通常の土石流に比べ、高速で長距離を流下する傾向があり、大規模な土砂災害を引き起こす場合がある。我が国においては1926年に北海道十勝岳で起こった災害（大正泥流）は特に有名であり、死者数144人にのぼる20世紀国内最大の火山・土砂災害となった。

この泥流災害の軽減には、その流下堆積特性を把握することが不可欠であり、泥流の流下モデルに関する研究は進んでいる。しかしながら、泥流発生プロセスに積雪の融解過程が反映されていないという問題がある。そこで本研究では、融雪型火山泥流発生時における融解過程の解明を目的として、積雪層に高温土砂を供給する実験を行い、実験で得られた結果を用いて泥流発生時の融雪水流出量ハイドログラフの算出法を開発した。

2. 実験手法

透明の円筒形耐熱ガラスカラム（内径19 cm、外径20 cm、高さ50 cm）に雪を充填して積雪層を形成、その上から約500℃に加熱した土砂（平均粒径約5 cm）を約4 kg 供給した（写真1）。

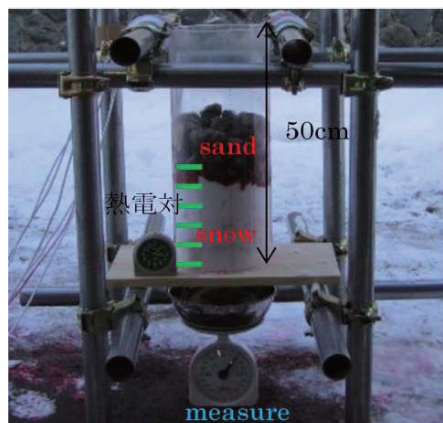


写真1 実験装置

積雪層上層に染料を散布し融雪浸透挙動が観測できる。実験カラム内壁の6ヶ所に熱電対を設置し、積雪層内・土砂層内の温度変化を計測した。実験カラム底面には融雪水が流出するように穴を開けた板を設置し、1分毎に撮影したインターバルカメラの画像から、融雪水流出量を測定した。

積雪密度は約150, 270, 400 kg/m³の3段階、積雪深は20, 30 cmの2段階とし、それらの組み合わせにより6ケースの実験を実施した。

3. 実験結果

実験の代表として、積雪深20 cm、積雪密度390 kg/cm³で行ったケースの結果を示す。

高温土砂供給と同時に積雪層上層部が一部水蒸気化しながら融解を始めた。融雪により生じた融雪水はまず選択的に浸透が起こる水みちを形成して流下し、その後全層にわたる浸透へ移行した。浸透が進み積雪層下部の間隙が浸透水で飽和されると、実験カラム底部より融雪水流出が開始した。時間ごとの積雪層内・土砂層内の温度変化を観測すると、積雪層内は常に0℃以下であり、土砂層底部は約0℃で、上部ほど高温であることが確認された。実験カラム底部からの融雪水流出は土砂供給から8分30秒後に開始し、流出開始直後にピーク流量となり、その後徐々に減少していくという挙動を示した。また、積雪密度が大きくなるにつれて、浸透速度は遅く、ピーク流量は低下し、流量の低減率が小さくなる傾向を示した。

4. 融雪水流出量の算出

図1のように、断面積 A [m²]、積雪密度 ρ_{sn} [kg/m³]、積雪深 D [m]の雪が積雪層上面低下速度 $v(t)$ [m/s]で低下していき、融解した融雪水（密度は ρ_w [kg/m³]）が浸透速度 k [m/s]（時間によらず一定）で浸透しているという簡単なモデルを考える。積雪層は一定の割合 r_{sl} で一部水蒸気化すると考える。また、 $k > v(t)$ であり融雪水は貯留することなく下方へ浸透すると仮定する。すると、融雪水流出量 $Q(t)$ は

$$Q(t') = \frac{(1-r_{sl})\rho_{sn}Av(t)}{\rho_w \left(1 - \frac{v(t)}{k}\right)} \quad (1)$$

となる．ここに、 t' は時刻 t に融雪した水が実験カラム底から流出開始する時刻を示している．

式(1)で示すように、積雪面の低下速度 $v(t)$ を与えれば、融雪水流出量を得ることが出来る．そこで、 $v(t)$ を求めるために、図2のような単純な土砂層と積雪層の温度分布を考える．土砂層内の温度分布は中心部分が $T(t)$ である直線分布とし、積雪層の温度及び積雪層と土砂層の境界部分の温度は常に 0°C とする．土砂層上面からの熱損失、融解熱・昇華熱を考慮して熱収支式を解くと、

$$v(t) = \frac{k_s}{\{E(1-r_{sl}) + Gr_{sl}\}\rho_{sn}L} T(0) \exp\left(-\frac{k_s}{2(1-r_{loss})L^2\phi\rho_{sed}c}t\right) \quad (2)$$

が得られる．ここに、 $v(t)$:積雪層上面低下速度[m/s]、 k_s :土砂の熱伝導率[W/m/k]、 E , G :土砂の融解熱、昇華熱[J/kg]、 r_{sl} :雪の水蒸気化率、 ρ_{sn} , ρ_{sed} :積雪密度、土砂密度[kg/m³]、 L :土砂の中心部から境界部分までの距離[m]、 $T(0)$:土砂の初期温度[$^\circ\text{C}$]、 r_{loss} :大気への熱損失率、 ϕ :土砂充填率、 c :土砂比熱[J/kg/K]である．この式(2)で得られた積雪面の低下速度は実験値と比較すると初期値は大きくずれたものの、その後はよく一致した(図3)．

また、式(1)、(2)及び実験から得られた値 k より求めた融雪水流出量は実験値と比較すると、流下開始直後にピーク流量を迎えその後徐々に減少するという傾向はよく再現されている．(図4)．

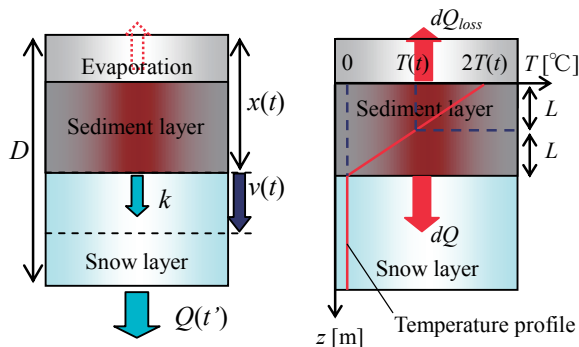


図1 融雪・浸透モデル

図2 熱伝導モデル

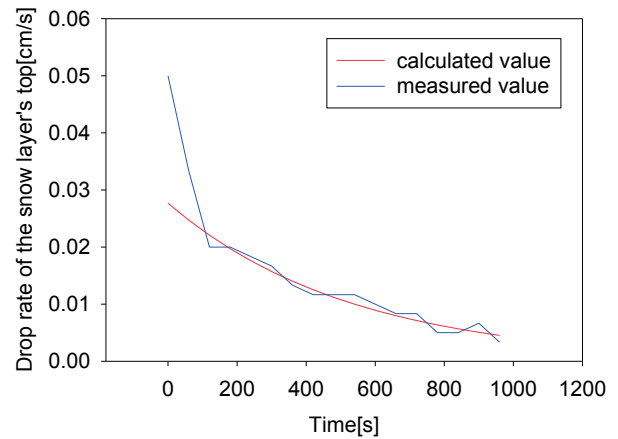


図3 積雪面上層の低下速度比較

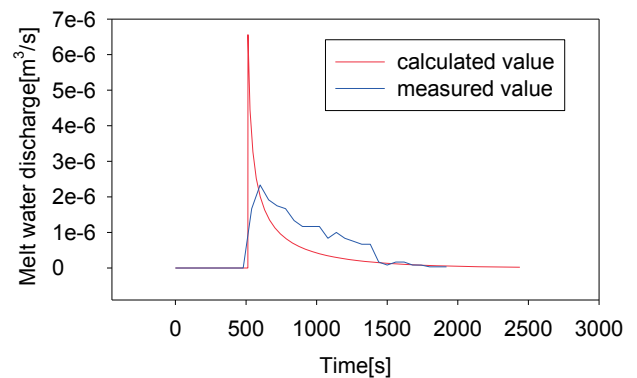


図4 融雪水流出量比較

5. まとめ

本研究において、高温土砂供給による積雪層融解過程が明らかとなり、単純なモデル化によって泥流発生時の融雪水流出量ハイドログラフを推定することが可能となった．ただ、融雪型火山泥流の発生機構に関してはいまだ未解明な部分が多く、本研究で示した単純なモデル化だけでは、実現現象を全て再現できているとは言い難い．今後は、より複雑な過程をモデル化し、更に高精度な融雪水流出量さらには泥流量の推定を行っていく必要がある．

参考文献

- (1) 長野快：融雪型火山泥流発生時における積雪層融解挙動に関する基礎的研究，卒業論文 2011.
- (2) 伊藤ら：融雪型火山泥流の発生メカニズム-十勝岳1926年火山泥流の融雪実験によるアプローチ-,日本火山学会講演予稿集, pp36,2004
- (3) 焼岳火山噴火緊急減災対策砂防計画検討会：平成23年度焼岳火山噴火緊急減災対策砂防計画検討報告書(案)