

蒸発熱発生を考慮した火砕物による融雪量シミュレーション

土木研究所（現 国土技術政策総合研究所）○泉山 寛明  
 京都大学防災研究所 堤 大三  
 土木研究所 野池 耕平, 藤村 直樹, 水野 秀明

1. はじめに

積雪期に火山が噴火すると融雪型火山泥流が発生し、広範囲に氾濫する。ハード・ソフト対策を検討するにあたり氾濫範囲を適切に推定する必要があるが、数値計算を行う際、初期条件と境界条件の設定が困難である。

村重ら<sup>1)</sup>は高温砂礫と積雪との間における熱交換過程および融雪水の浸透過程を実験的に調べ、その結果からハイドログラフを推定する手法を提案している。一方、阿部ら<sup>2)</sup>の実験では水蒸気の発生が明瞭に見られ、火砕物の持つ熱エネルギーが水蒸気発生に多く費やされている可能性がある。そこで本研究では水蒸気発生に伴う熱エネルギーを定量的に評価し、実質的に融雪に費やされるエネルギー割合を明らかにすることを最終的な目的とした。そこでまず、Hertz-Knudsen 方程式<sup>3)</sup>を用いて蒸発熱を算出し、融雪量を推定した。また、村重ら<sup>1)</sup>と同様の実験を行い、両者を比較して蒸発熱推定方法の妥当性について考察した。

2. 研究方法

2.1 融雪実験

まず、底面に止水板を固定した円筒容器（耐熱ガラス製、内径 95 mm、高さ 0.5 m）を、はかりの上に置いた。温度の鉛直分布から積雪面の位置を知るため、円筒容器の内壁に熱電対（クロメル - アルメル）を容器底面から 0, 10, 20, 30, 40 cm の位置に設置した。そこに高さ約 30 cm の積雪層を形成し、上面に染料を散布して融雪水の挙動が分かるようにした。積雪層の上に高さ約 20 cm の高温砂礫層を作り、積雪層および砂礫層の温度を 10 秒間隔で計測した。なお、砂礫は粒径 2~3 cm 程度であり、ストーブで加熱した。

実験条件を表-1 に示す。容器に投入した雪は式(1)に示す濡れ密度 $\rho_{wet}$  の値が 3 パターンとなるようにした。

$$\rho_{wet} = (m_i + m_w) / V \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $m_i$ : 氷の質量,  $m_w$ : 間隙水の質量,  $V$ : 雪の体

積である。乾き密度 $\rho_{dry}$  は式(2)で定義される。

$$\rho_{dry} = m_i / V \dots\dots\dots (2)$$

表-1 に示す $\rho_{dry}$  は雪の含水率が残留含水率 (7 %) <sup>4)</sup> に等しいと仮定して算出したものである。砂礫の上端温度  $T_u$ , 下端温度  $T_b$  は異なる温度となっているが、ストーブに近い下層ほど加熱されていることが原因である。

2.2 熱伝導解析

解析は砂礫層を対象として行い、砂礫層下端からの熱エネルギーフラックス  $F_{bend}$  を求めた。そして、 $F_{bend}$  から融雪水の蒸発に伴う熱エネルギーフラックス  $F_{eva}$  を差し引いた残りが融雪に費やされるとして単位時間あたりの融雪量 $\Delta H_{sn}$ を式(3)から推定することとした。

$$\Delta H_{sn} = \frac{F_{bend} - F_{eva}}{\rho_{dry} E} \dots\dots\dots (3)$$

ここに  $E$ : 融解エンタルピーである。熱伝導方程式を式(4)に示す。本研究では式(4)を有限体積法により解いた。

$$\rho_G c_G \frac{\partial T_G}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\lambda_G}{r} \frac{\partial T_G}{\partial \theta} \right) + \lambda_G \frac{\partial^2 T_G}{\partial z^2} \dots\dots\dots (4)$$

ここに  $\rho_G, c_G, T_G, \lambda_G$ : 砂礫層の密度, 比熱, 温度, 熱伝導係数,  $r$ : 動径,  $\theta$ : 動径の基準線からの角度,  $z$ : 鉛直座標である。 $F_{bend}$  は式(5)から、 $F_{eva}$  は Hertz-Knudsen 方程式から得られる水蒸気の質量フラックスに<sup>3)</sup>、昇華エンタルピー $G$  を乗じた式(6)から求めた。

$$F_{bend} = \lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial z} \Big|_{z=L} \dots\dots\dots (5)$$

$$F_{eva} = G \sqrt{\frac{M}{2\pi R}} \left( \eta_{eva} \frac{P_{sat}}{\sqrt{T_i}} - \eta_{con} \frac{P_{air}}{\sqrt{T_{air}}} \right) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $M$ : 水分子 1 モルあたりの質量,  $R$ : 気体定数,  $\eta_{eva}$ : 水蒸気化率,  $\eta_{con}$ : 液化率,  $P_{sat}$ : 飽和水蒸気圧,  $P_{air}$ : 水蒸気圧,  $T_i$ : 融雪水の温度,  $T_{air}$ : 気温である。初期条件として砂礫層上端, 下端の温度をそれぞれ  $T_u, T_b$  とし、砂礫層内の温度は  $T_u, T_b$  を基に線型補間して与えた。境界条件として砂礫層の上端は気温 (0 °C), 下端は積雪上端面の温度 (0 °C) を与えた。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 融雪実験

図-1 に各ケースにおける積雪層表面の位置の時系列変化を示す。なお、砂礫層を投入した瞬間を実験開始時刻 (0 秒) として整理している。また、Case 1 および Case 2 では融雪水の水面と積雪面がほぼ一致した時点で実験を終了し、Case 3 では積雪面の低下が見られなくなった時点で実験終了とした。Case 1, Case 2 では実験開始から終了まで全体的に一定の低下速度であった。Case 3 では実験開始から数秒は積雪面の低下速度が小さいが、その後は低下速度が上昇し、実験開始から 160 秒の時点から徐々に速度が低下していった。

#### 3.2 熱伝導解析

図-1 に積雪面の時系列変化を解析した結果を示す。結果は蒸発による熱エネルギー損失を考慮しない場合と考慮した場合とで分けて表示している。Case 1 での解析結果 (図-1 (a)) を見ると、蒸発によるエネルギー損失の有無に関わらずどちらも実験と概ね同様の变化傾向を示した。実験終了時の積雪面位置は下端から 3 cm であったが、蒸発によるエネルギー損失を考慮しない解析では 1.9 cm, 考慮した解析では 5.8 cm であり、考慮しない場合の方がやや実際に近い結果となった。

Case 2, Case 3 の解析結果を見ると (図-1 (b), (c)), 蒸発によるエネルギー損失を考慮する方が実際に近い結果となった。Case 2 では実験終了時の積雪面の位置は 4 cm であるが、蒸発によるエネルギー損失を考慮しない解析では 0.7 cm, 考慮した解析では 4.5 cm であった。Case 3 では実験終了時の積雪面の位置は 10 cm, 蒸発によるエネルギー損失を考慮しない解析では 2.9 cm, 考慮した解析では 7.4 cm である。

以上より、蒸発による熱エネルギーの損失を考慮する方が実際の挙動を再現できる可能性が高い。Case 1 では蒸発による熱エネルギー損失の推定値がやや過大であったと考えられるが、蒸発量を正確に計測できていないことから断言はできない。

#### 4. おわりに

本研究で用いた解析手法により現象をよく再現できる可能性が示唆された。解析手法の妥当性についてさらに検討を進める予定である。

表-1 実験条件

	Case 1	Case 2	Case 3
$\rho_{wet}$ [ kg / m <sup>3</sup> ]	202.2	188.1	295.4
$\rho_{dry}$ [ kg / m <sup>3</sup> ]	142.2	126.9	243.2
$T_u$ [ °C ]	407.1	442.8	465.9
$T_b$ [ °C ]	632.3	820.0	788.4

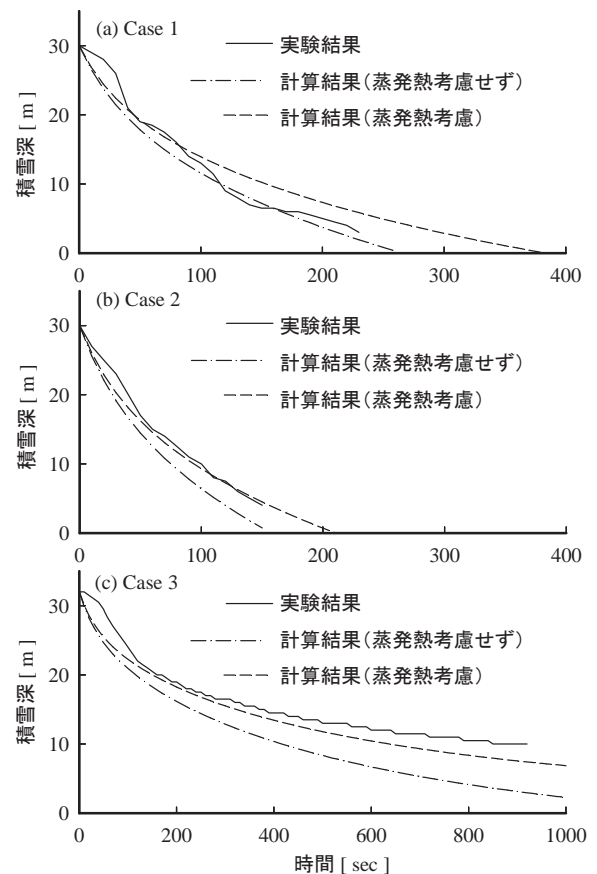


図-1 積雪深の時系列変化の実験結果と計算結果

#### 謝辞

本研究の一部は河川砂防技術開発公募 地域課題分野 (砂防) (代表: 堤大三) の助成を受けて実施した。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 村重ら (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, Vol. 67, No. 6
- 2) 阿部ら (2013) : 融雪型火山泥流の発生規模予測に関する実験的研究, 平成 25 年度砂防学会研究発表会概要集
- 3) Jones, F. E. (1992) : Evaporation of water, Lewis Publishers
- 4) Colbeck, S. C. (1974) : The capillary effects on water percolation in homogeneous snow, Journal of Glaciology, Vol. 13, No. 67