

# 溶岩流の流動・停止過程における路床への熱移動量評価に関する実験的研究

群馬工業高等専門学校 学生会員 ○池本 敦哉 学生会員 柳原 駿太 正会員 永野 博之  
 八千代エンジニアリング株式会社 非会員 西尾 陽介 非会員 佐藤 敏明

## 1. はじめに

溶岩流の数値解析では、溶岩表面からの熱放射による冷却のみを考慮したモデル(例えば1)が一般的なようであり、路床への熱移動による冷却を考慮したモデル(例えば2)は少ない。これは、路床への熱移動は溶岩表面からの熱放射と比較して無視しうる<sup>1)</sup>と仮定されているためである。しかしながら、溶岩流の流動・停止過程における路床への熱移動に関する知見は不足しており、不明瞭な部分が多く残されている。永野ら<sup>3)</sup>は、溶岩の流動実験を行い路床温度の時系列変化を調査したが、路床への熱移動量評価までには至っていない。

本研究は、路床への熱移動による溶岩流の温度変化に関する知見を集積するために、小型流路による溶岩の流動実験から路床への熱移動量を推算するとともに、溶岩表面からの熱放射量との比較を試みたものである。

## 2. 実験方法

本研究で用いた溶岩は、東泉沢河道左岸側壁(浅間山周辺)で採取した試料に、既往文献<sup>4)</sup>を参考に重曹とホウ砂を加え、高温加熱することで生成した。加熱前の各重量は、試料 540g、重層 270g、ホウ砂 540g である。

小型流路の模式図を図-1 に示す。既往研究<sup>3)</sup>と同様に、RC製のU字溝(溝幅 18cm, 側壁高 18cm, 長さ 0.6m)を3個連ね、流路長 1.8m, 流路勾配 10°の小型流路を形成した。U字溝には路床として川砂を厚さ 5cm で敷き詰めた。上流端から 20cm 地点に加熱容器を手作業で斜動させて溶岩を供給し、溶岩流を発生させた。

路床温度は T 型熱電対(東京測器研究所製 T-G-0.32)を用いて計測した。T 型熱電対は図-1 に示す地点に設置した。溶岩流の底面温度は K 型熱電対(福電製 K-FFF-1PX1/0.65)を用いて計測した。K 型熱電対は図-1 に示す地点で、测温接点が路床上面に露出するように設置した。また、溶岩流の表面温度は、赤外線サーモグラフィ(FLIR 製 E85, 放射率 0.9)を用いて計測した。流下状況は、流路側方に設置したビデオカメラ 2 台を用いて、上流端から 0~0.6m, 0.6~1.2m の 2 区間で撮影し

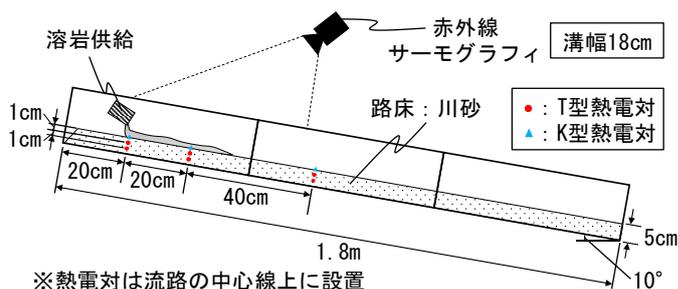


図-1 小型流路の模式図

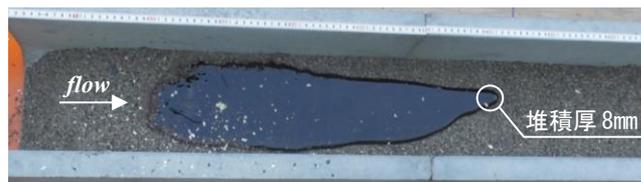


図-2 停止時の溶岩流の様子

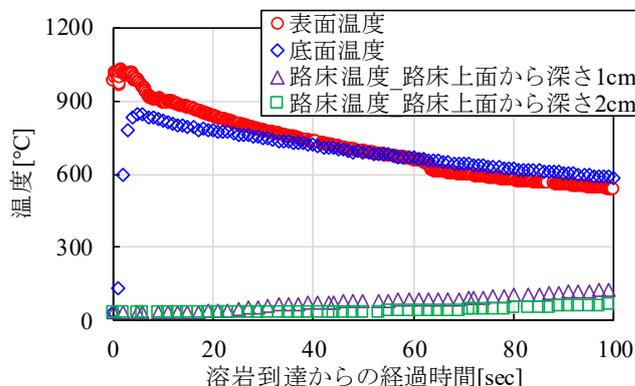


図-3 路床温度と溶岩流の表面・底面温度の時系列変化(上流端から 40cm 地点)

た。実験終了後、固結した溶岩の体積、重量、堆積厚を計測し、体積と重量から密度を算出した。

## 3. 実験結果

実験では、約 5 秒間で 340mL の溶岩を供給した。供給した溶岩の密度は  $2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  であった。溶岩流は流下開始から約 26 秒で停止し、その到達距離は 56.2cm であった。停止時の溶岩流の様子を図-2 に示す。平均堆積厚は 7mm, 溶岩流先端部の堆積厚は 8mm であった。

図-3 に上流端から 40cm 地点での路床温度と溶岩流の表面・底面温度の時系列変化を示す。上流端から 20cm, 80cm 地点の計測結果は、溶岩流停止までに路床温度がほぼ変化しなかったため省略する。上流端から 40cm 地点の路床温度について、流下開始から溶岩流停止まで

の 26 秒間で、路床上面から深さ 1cm では約 10°C 上昇し、路床上面から深さ 2cm ではほぼ変化しなかった。

#### 4. 路床への熱移動量の推定・評価

##### 4.1 推定方法

本研究では、路床温度と既往研究<sup>3)</sup>では計測がなされていない溶岩流底面温度を用いて、路床への熱移動量を推定する。溶岩流停止までに路床温度の変化が見られた上流端から 40cm 地点の路床への熱移動量を推定する。同地点に溶岩が到達した時刻（流下開始から 3 秒後）を基準とし、溶岩到達から経過時間 50 秒までの路床への熱移動量を推定する。

路床への熱移動量 $\Delta Q_B$ は、式(1)の Fourier の式を適用することで推算する。

$$\Delta Q_B = -\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1)$$

ここに、 $\kappa$ : 路床の熱伝導率、 $\partial T/\partial z$ : 溶岩流底面と路床間の温度勾配である。温度勾配 $\partial T/\partial z$ を算出する際に、路床温度の計測値をそのまま用いると、路床の温度分布が無視されることになり、路床への熱移動特性が不明瞭になると考えられる。そこで、**図-4**に示す解析モデルについて、1次元非定常熱伝導方程式を適用して数値計算（陽解法）を行い、路床の温度分布を推定する。**図-4**の路床上面の境界条件である溶岩流底面温度は、**図-5**に示す計測値の 6 次近似式を用いた。熱電対の応答速度の影響を考慮し、溶岩到達から経過時間 0~5 秒の計測値は除外して近似式を作成した。計測値を除外した区間については外挿した。求めた近似式により時間刻み幅ごとに溶岩流底面温度を設定した。

##### 4.2 推定結果および考察

路床初期温度を 35°C で一律に与え、路床の熱拡散率を  $28 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{sec}$ 、空間刻み幅を 0.001m、時間刻み幅を 0.01sec として解析を実施し、路床の温度分布を推定した。路床の熱拡散率は砂（乾燥状態、20°C）の標準値<sup>5)</sup>を参考に決定した。経過時間 50 秒において、路床上面から深さ 1cm 地点の路床温度の計測値は 81°C、推定値は 82°C となり、ほぼ一致する結果となった。

推定した路床温度から温度勾配 $\partial T/\partial z$  ( $z=0.001\text{m}$ ) 求め、式(1)により推算した路床への熱移動量 $\Delta Q_B$ の時系列変化を**図-6**に示す。路床の熱伝導率は砂（乾燥状態、20°C）の標準値<sup>5)</sup>である $\kappa=0.35\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ を用いた。**図-6**には、Stefan-Boltzmann の式より算出した溶岩表面からの熱放射量も併せて示した。なお、溶岩の放射率は 0.9、

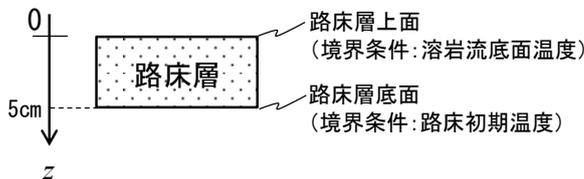


図-4 路床温度の推定に用いる解析モデル

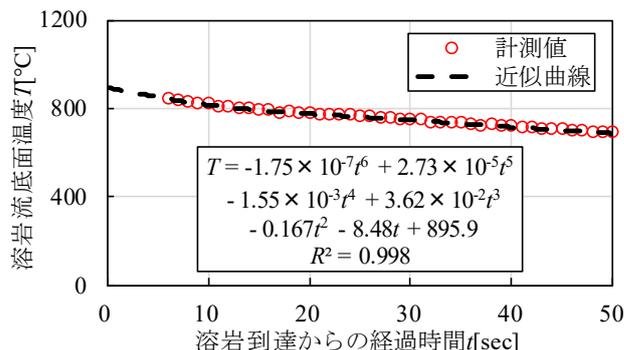


図-5 境界条件である溶岩流底面温度の近似

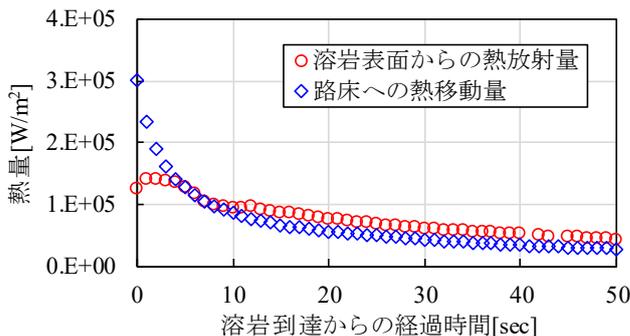


図-6 溶岩表面からの熱放射量と路床への熱移動量の時系列変化

大気温度は 31°C として算出した。経過時間 10 秒までは、路床への熱移動量は溶岩表面からの熱放射量を上回る結果となった。経過時間 10 秒以降は、溶岩表面からの熱放射量は路床への熱移動量を上回る結果となった。これは、溶岩流によって路床温度が上昇し、温度勾配 $\partial T/\partial z$ が小さくなったためである。流下フロント部では、温度勾配 $\partial T/\partial z$ が常に大きいため、路床への熱移動による冷却の影響は後続流よりも大きい。路床への熱移動による溶岩流の温度変化を適切に評価するためには、路床の温度変化を考慮すべきであると考えられる。

#### 5. おわりに

本研究では、溶岩の流動実験を通じて、路床への熱移動量の評価を試みた。今後は、追加実験により路床への熱移動に関するさらなる知見の集積を図る必要がある。

##### 参考文献

- 1) 山下ら(1990): 水工学論文集, 第 34 巻, pp.391-396.
- 2) Hidaka et al. (2005): *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 6, Q07008, doi:10.1029/2004GC000869.
- 3) 永野ら(2019): 平成 31 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.67-68.
- 4) 中野ら(2016): 地学教育, 第 68 巻, 第 3 号, pp.129-143.
- 5) Muroz HP: 熱伝導率の測定, <http://www.muroz.co.jp/thermalscience/thermalconductivity/> (2020.01.15 閲覧).