

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

1. はじめに

溶岩の粘性係数と降伏応力は、溶岩の流動状況を規定する重要なパラメータであり、これらは温度の関数である。そのため、溶岩流の挙動を適切に評価するためには、流下過程における溶岩流温度の適切な評価が重要となる。

溶岩流の解析では、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),2)}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ものは少ない³⁾。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²⁾と仮定されているためと考える。しかしながら、溶岩流の流下過程において、路床温度の時系列変化を調査した事例は見当たらず、実際に路床へどの程度の熱が移動しているのかは不明瞭な部分が多い。

本研究は、溶岩流の挙動を適切に評価することを目的に、小型流路による溶岩の流動実験と1次元モデル⁴⁾による解析を行い、溶岩表面と路床内の温度変化から溶岩流内部の温度変化を推定し、流動特性の評価を試みたものである。

2. 実験方法

本研究で用いた溶岩は、伊豆大島の1986年C火口列周辺で採取した試料に、既往文献⁵⁾を参考に融点降下剤（重曹、ホウ砂）を加え、高温加熱し生成した。加熱前のそれぞれの重量比は、試料540g：重曹270g：ホウ砂540gである。

小型流路の模式図を図-1に示す。鉄筋コンクリート製の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。下流端には石板を設置し、U字溝内に路床として粒径2mm未満の川砂を厚さ5cmで敷き詰めた。上流端から20cm地点に、生成した溶岩を手動で供給し、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型熱電対は上流端から20cm、40cm、80cm、100cm、140cm、160cmに位置するそれぞれの地点で、路床上面から1cm、2cmの深さに設置した。また、放射温度計（A&D製 AD-5634）を用いて、溶岩供給部（手持ち計測）と上流端から90cm地点の表面温度（固定計測）を計測した。放射温

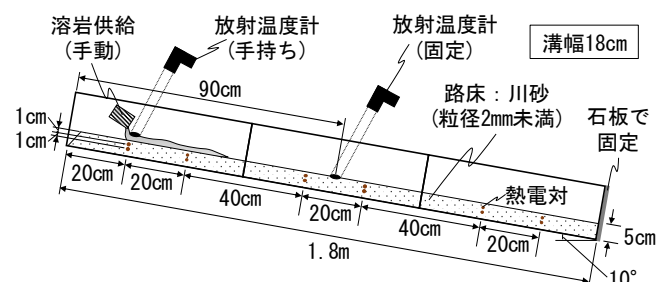


図-1 小型流路の模式図

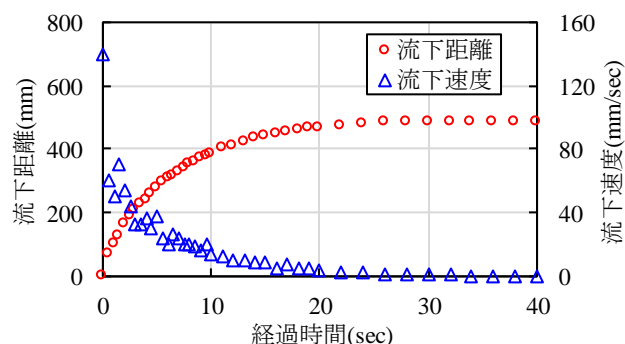


図-2 流下距離と流下速度の時系列変化

度計は放射率0.9で計測し、大気温度も同時に計測した。溶岩流の流下状況は、流路側方に設置したデジタルビデオカメラ2台を用いて、下流端から0～1.2m、0.6～1.8mの2区間で撮影した。流路の側壁上面にはテープ尺が貼られており、撮影動画から流下距離と流下速度の判読が可能である。実験終了後、溶岩の供給量、溶岩の密度、溶岩層厚を計測した。

3. 実験および解析結果

実験後の計測結果より、溶岩の供給量は370mL、溶岩の密度は $2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、溶岩供給部の溶岩層厚は5mm、溶岩流先端部の溶岩層厚は8mmであった。

図-2に流下距離と流下速度の時系列変化を示す。流下距離と流下速度は、溶岩流の流下開始から0～10秒は0.5秒刻み、10～20秒は1秒刻み、20～40秒は2秒刻みで撮影動画より判読した。溶岩流は流下開始から約30秒で停止し、到達距離は487.7mmであった。流下速度は、時間経過とともに指数関数的に低下した。

図-3に路床と表面温度の時系列変化（10秒間隔）を示す。上流端から90cm地点の表面温度および80cm地点より下流の路床温度は、溶岩流が未到達であるため省略した。流下開

始から溶岩停止までの 30 秒間のうちに、溶岩流供給部の表面温度は約 300℃低下した。同時刻間で路床温度については、路床上面から 1cm 地点では 20~30℃上昇し、路床上面から 2cm 地点ではほぼ変化しない結果となった。

柳原ら⁴⁾は、図-4 に示すような解析モデルを用いて、路床への熱移動の有無が、鉛直方向の温度分布と溶岩層平均温度に与える影響について検討している。そこで、溶岩供給部を対象に、彼らの解析モデルを用いて解析を行った。表-1 に解析条件を示す。ここに、溶岩の比熱、放射率、熱伝導率は山下²⁾を参考に、路床の熱拡散率は砂（乾燥状態、20℃）の標準値⁹⁾を参考に決定した。図-5 に経過時間 30 秒における温度分布の解析結果を示す。なお、図-5 は、温度変化が見られた溶岩層表面から 20mm 地点までの結果を示している。路床への熱移動有の場合は、熱移動無の場合に比べ、溶岩層平均温度が約 250℃低い結果となった。溶岩層表面温度（ $x = 0\text{mm}$ ）について、実験値と解析値はほぼ一致した。路床上面から 1cm 地点の路床温度（ $x = 15\text{mm}$ ）について、実験値は解析値より高い結果となった。解析では、層厚が 5mm の薄さであるにも関わらず、溶岩層の温度変化が著しいことが原因と考えられる。これより、溶岩層厚さに関するモデルの適用限界を検証することが必要と考えられる。

本多⁷⁾は、自由表面を持つ溶岩流の降伏応力を、 $f_b = H(\rho g \sin \alpha)$ として求めた。ここに、 f_b は溶岩流の降伏応力、 H は溶岩流停止時の溶岩流厚さ、 ρ は溶岩流の密度、 g は重力加速度、 α は傾斜度である。実験条件および実験結果より、 $H = 8\text{mm}$ （溶岩流先端部の溶岩層厚）、 $\rho = 2.5 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、 $g = 9.8 \text{m/sec}^2$ 、 $\alpha = 10^\circ$ であるため、降伏応力は $f_b = 3.4 \times 10^2 \text{dyn/cm}^2$ と計算される。また、石原ら²⁾は、1951 年伊豆大島溶岩流について、温度と降伏応力の関係式を導いている。彼らの式に、算出した降伏応力を代入して溶岩流温度を求めると 1250℃程度となる。本実験での溶岩流の初期温度は 1081℃であり、上で推算した温度より 200℃近く低い温度でも流動したことが分かる。これは、溶岩生成に融点降下剤を用いたために、流動性が高くなったためと考えられる。

4. おわりに

本研究では、小型流路での溶岩流実験と 1 次元モデルに基づき、溶岩流の温度・流動特性の評価を試みた。今後は、モデルの適用限界の検証と追加実験により、評価精度の向上を図ることが必要と考えられる。

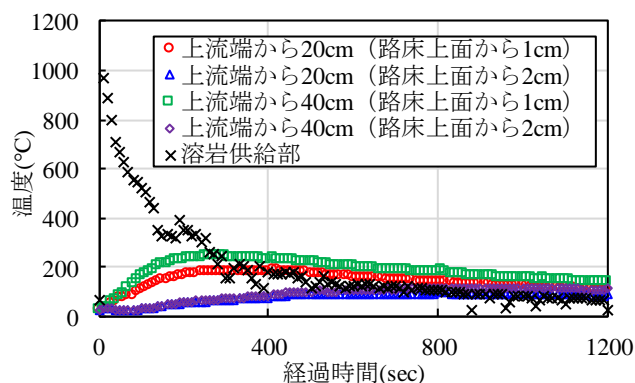


図-3 路床温度と溶岩供給部温度の時系列変化(10 秒間隔)

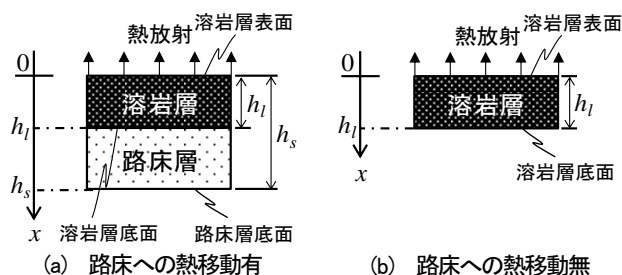


図-4 解析モデル⁴⁾

表-1 解析条件

溶岩層	密度	$2.5 \times 10^3 \text{kg/m}^3$	Stefan-Boltzmann 定数	$5.67 \times 10^{-8} \text{W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$
	比熱 ¹⁾	$840 \text{J/(kg} \cdot \text{K)}$		
	放射率 ¹⁾	0.9		
	熱伝導率 ¹⁾	$1.5 \text{W/(m} \cdot \text{K)}$		
	初期温度	1081℃		
	層厚 h_l	0.005m	大気温度	22℃
路床層	熱拡散率 ⁶⁾	$28 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{sec}$	全層厚 h_s	0.055m
	初期温度	25℃	空間刻み幅	0.001m
	層厚	0.05m	ステップ時間	0.1sec

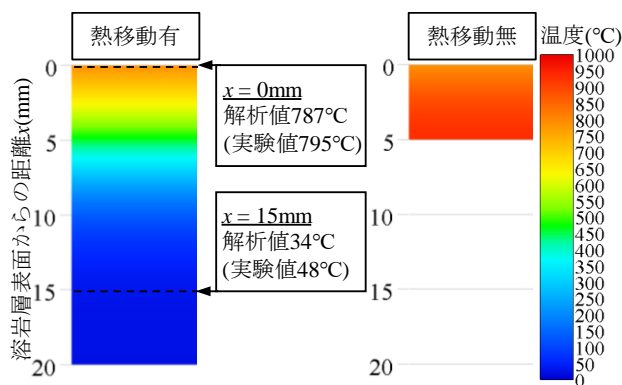


図-5 温度分布の解析結果(経過時間 30 秒)

参考文献

- 1) 石原ら(1988): 火山, 第2集, 伊豆大島噴火特集号, pp.64-76.
- 2) 山下ら(1990): 水工学論文集, 第34巻, pp.391-396.
- 3) Hidaka et al.(2005): *Geochemistry. Geophysics. Geosystems*, 6, Q07008, doi:10.1029/2004GC000869.
- 4) 柳原・永野(2019): 第46回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要, II-65.
- 5) 中野・江口(2016): 地学教育, 第68巻, 第3号, pp.129-143.
- 6) Muroz HP: 熱伝導率の測定, <http://www.muroz.co.jp/thermalscience/thermalconductivity/> (2019年1月15日閲覧).
- 7) 本多力(2018): 日本地球惑星科学連合2018年大会予稿, SVC43-02.