

路床への熱移動を考慮した1次元溶岩流解析モデルの提案と妥当性の検証について

群馬工業高等専門学校 ○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

溶岩流の解析モデルの多くは、流れを Bingham 流体と仮定しており^{例(1), 2)}、流動を規定するパラメータである粘性係数と降伏応力は溶岩流温度から評価される。そのため、溶岩流の挙動を適切に表現するには、冷却に伴う溶岩流の温度変化を適切に評価することが必要となる。解析における溶岩流の冷却は、溶岩表面からの熱放射のみを考慮したモデル^{例(1), 2)}が一般的なようであり、路床への熱移動を考慮したモデル^{例(3)}は少ない。これは、路床への熱移動は無視しうほど小さい²⁾と仮定されているためである。しかしながら、著者らが行った溶岩の流動実験⁴⁾によれば、路床への熱移動を考慮するとともに、既往研究では着目されていない路床の温度変化も考慮する必要があることが示唆されている。

そこで本研究では、路床への熱移動および路床の温度変化を考慮した1次元溶岩流解析モデルを構築するとともに、流動実験⁴⁾に基づきその妥当性を検証した。

2. 解析モデルの概要

本研究では、溶岩流を層流の Bingham 流体として取り扱い、流れを長方形断面の1次元浅水流モデルで表現する。基礎式に、以下の連続式と運動方程式を用いる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} \quad (2)$$

ここに、 $M = uh$ 、 u : x 方向の平均流速、 h : 流動深、 $H = h + z_b$ 、 z_b : 流動層底面の地盤標高、 τ_x : Bingham 流体の抵抗力、 g : 重力加速度、 ρ : 密度、 t : 時間である。Bingham 流体の抵抗力 τ_x は、山下ら²⁾を参考にして、溶岩流の粘性係数 μ と降伏応力 τ_y の関係式で評価した。粘性係数 μ と降伏応力 τ_y は、石原ら¹⁾と同様に、式(3)により求める。

$$\log(\mu \text{ or } \tau_y) = A + BT \quad (3)$$

ここに、 A 、 B : 定数、 T : 溶岩流温度である。

溶岩流の熱量変化について、時刻 $t + \Delta t$ の溶岩流の熱量 $Q(t + \Delta t)$ は、時刻 t の熱量を $Q(t)$ とすると式(4)になる。

$$Q(t + \Delta t) = Q(t) + \Delta Q_m - \Delta Q_s - \Delta Q_b \quad (4)$$

ここに、 ΔQ_m : 溶岩の流入・流出による熱量変化、 ΔQ_s :

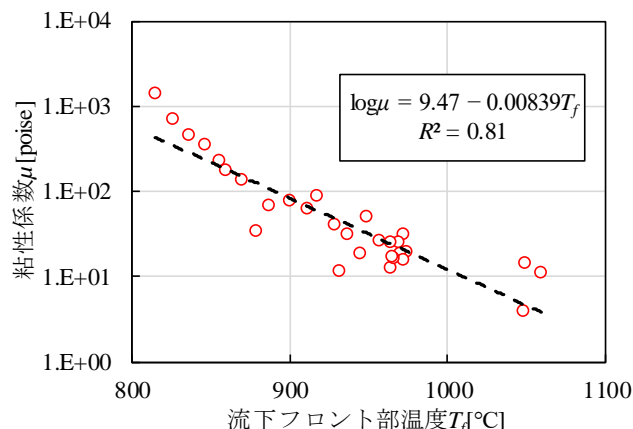


図-1 流下フロント部温度と推定した粘性係数の関係

溶岩表面からの熱放射による熱量変化、 ΔQ_b : 路床への熱移動による熱量変化である。 ΔQ_m の算出方法は、石原ら¹⁾が詳しいので省略する。 ΔQ_s は Stefan-Boltzmann の式を適用して算出する。溶岩流の表面温度について、本研究ではプラグ層が発達していない溶岩流を対象とするため、表面温度と内部温度は同一と仮定する。 ΔQ_b は溶岩流底面と路床間に Fourier の式を適用して算出する。溶岩流の底面温度は、内部温度と同一と仮定する。路床の温度変化は、路床内における側方への熱移動を無視し、1次元非常熱伝導方程式を鉛直方向に適用することで算出する。境界条件として、路床上面には溶岩流底面温度を、路床層底面には路床初期温度を設定する。以上の熱量変化より、溶岩流の温度変化を算出する。

溶岩流の停止条件は山下ら²⁾を参考に、 $\tau < \tau_y$ とした。

3. 流動実験に基づく解析条件

著者らによる流動実験⁴⁾に基づき、解析条件を検討する。温度 T と粘性係数 μ の関係式の定数 A および B は、図-1に示す流下フロント部温度 T_f と流動実験における流下速度より推定した粘性係数 μ の指数近似式の定数を用いた。粘性係数の推定には、式(5)のプラグ層を無視した平均流速 v と粘性係数 μ の関係⁵⁾を用いた。

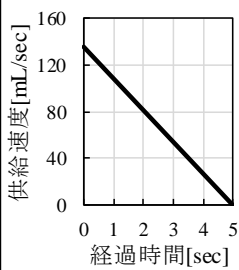
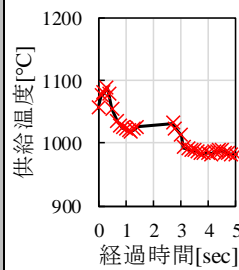
$$v = \frac{\rho g h^2 \sin \alpha}{3\mu} \quad (5)$$

ここに、 ρ : 溶岩の密度、 g : 重力加速度、 α : 傾斜角、 h : 流動深である。平均流速 v には、流動実験における流

キーワード 溶岩流, 数値解析, 路床, 熱移動, 流動実験

連絡先 〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町 580 群馬工業高等専門学校 TEL: 027-254-9000 E-mail: hr-nagano@cvt.gunma-ct.ac.jp

表-1 解析条件

溶岩			
温度 T -粘性係数 μ	$\log\mu = 9.47 - 0.00839T$	温度 T -降伏応力 τ_y	$\log\tau_y = 9.63 - 0.0089T$
供給速度		供給温度	
比熱, 放射率	840J/(kg · K), 0.9	密度	$2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
路床			
層厚	0.05m	熱拡散率	$28 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{sec}$
熱伝導率	$0.35 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	初期温度	35°C
大気温度		31°C	
Stefan-Boltzmann定数		$5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	
空間刻み幅		流体部: 0.01m, 路床部: 0.001m	
時間刻み幅		$1 \times 10^{-5} \text{ sec}$	

下速度を代入した。また、流動実験では流動深を計測していないため、平均堆積厚を流動深として代用した。

温度 T と降伏応力 τ_y の関係式の定数 B は、温度変化による降伏応力の増減割合は岩質に寄らず一定という石原ら¹⁾の仮定に基づき、1951年伊豆大島溶岩流の $B = -0.0089$ を用いた。定数 A は、本多⁶⁾を参考に求めた溶岩流停止時の降伏応力とそのときの流下フロント部温度を式(3)に代入することで求めた。

流路幅として平均堆積幅を用い、溶岩の供給速度は線形的に減少すると仮定した。溶岩の供給温度は溶岩供給部の表面温度の計測値を用い、線形補間することで時間刻み幅ごとに設定した。溶岩の比熱と放射率は石原ら¹⁾を参考に、路床の熱拡散率と熱伝導率は砂(乾燥状態, 20°C)の標準値⁷⁾を参考に決定した。その他の諸量は、流動実験の計測結果に基づき設定した。以上の解析条件を整理したものを表-1に示す。計算スケールが小さいことに起因する数値計算上の過剰な温度変化を防止するため、流動深が1mm以下の場合には溶岩表面からの熱放射と路床への熱移動は発生しないものとした。比較のため、路床への熱移動を考慮しない条件でも解析を行った。

4. 解析結果および考察

図-2 に流下距離の時系列変化を、図-3 に流下速度の時系列変化を示す。流下フロント部は、流動深が1mm以上となる部分で判断した。図-2 と図-3 には、実験結果も併記した。路床への熱移動を考慮した解析モデル

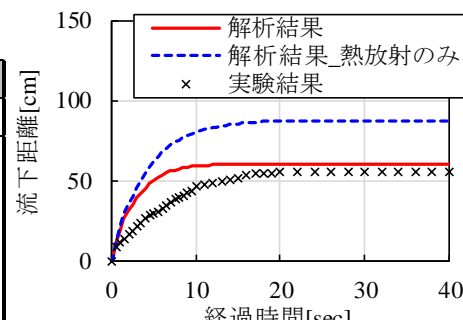


図-2 流下距離の時系列変化

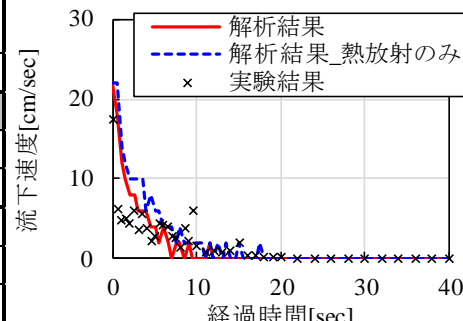


図-3 流下速度の時系列変化

の方が、実際の到達距離を良好に再現できることが分かった。路床への熱移動を考慮した場合の解析結果と実験結果を比較すると、解析結果の方が流下の進行が早くなっている。これは、流路幅として平均堆積幅を用いたことにより、平均堆積幅よりも流動幅が大きい流下開始直後では、流量フラックスが実際よりも大きく計算されたことが原因と考えられる。今後は、側岸等で横断方向への流動を拘束した流動実験を行い、流下過程を含めた1次元溶岩流解析モデルの妥当性を検証する必要があると考えられる。

5. おわりに

本研究では、路床への熱移動および路床の温度変化を考慮した1次元溶岩流解析モデルを構築し、流動実験に適用した。その結果、路床への熱移動による溶岩流の温度変化を考慮したモデルでは、考慮しないモデルよりも、溶岩流の到達距離の適合が良好な結果となった。今後は、横断方向への熱移動を考慮した解析モデルを開発し、実験結果と比較することで、評価精度の向上を図ることが必要と考えられる。

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): *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 6, Q07008, doi:10.1029/2004GC000869.
- 4) 池本ら(2020): 第47回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, 投稿中.
- 5) 砂防・地すべり技術センター(2000): 研究報告, 第1号, pp.94-110.
- 6) 本多力(2018): 日本地球惑星科学連合2018年大会予稿, SVC43-02.
- 7) Muroz HP: 熱伝導率の測定, <http://www.muroz.co.jp/thermalscience/thermalconductivity/> (2020.01.15 閲覧).