

路床への熱移動の有無による溶岩の温度変化に関する研究

群馬工業高等専門学校 学生会員 ○柳原 駿太
群馬工業高等専門学校 正会員 永野 博之

1. はじめに

溶岩流の数値シミュレーションモデルの多くは、ビンガム流体として取り扱っており(例えば¹⁾、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る。溶岩の粘性係数および降伏応力は温度の関数であるため²⁾、溶岩流の挙動を適切に評価するためには、溶岩の冷却を適切に評価する冷却モデルが必要となる。

冷却モデルについて、石原ら¹⁾は、溶岩表面からの熱放射による冷却を基本とし、溶岩内部の温度分布は均一としたモデルを提案している。山下ら²⁾は、プラグ層の存在による溶岩の冷却抑制を表現するために、プラグ層内部で温度勾配を考慮したモデルを提案している。これらの冷却モデルは、いずれも溶岩表面からの熱放射による冷却のみを考慮しており、路床への熱移動による冷却は考慮されていない。

本研究は、溶岩流温度の適切な評価を目的として、路床への熱移動の考慮の有無が、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たものである。

2. 解析モデルおよび計算条件

2.1 熱放射のみを考慮したモデル (Model-1)

図-1(a)に示すような Model-1 における溶岩層(層厚 h_l)の x 軸方向の温度分布は、側方と路床への熱移動を無視し、式(1)の1次元非定常熱伝導方程式について、陽解法により数値計算を行った。

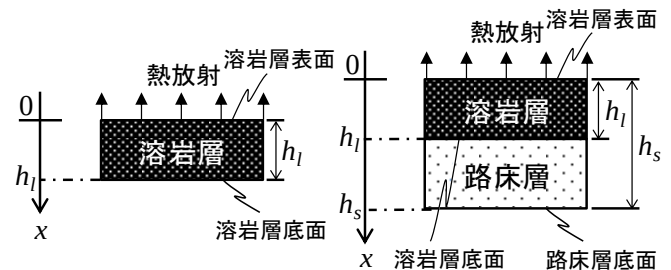
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (1)$$

ここに、 T : 温度、 t : 時間、 α : 熱拡散率(温度伝導率)、 x : 溶岩層表面からの距離である。また、熱拡散率 α は式(2)によって定義される。

$$\alpha = \frac{\kappa}{\rho c} \quad (2)$$

ここに、 κ : 熱伝導率、 ρ : 密度、 c : 比熱である。

Model-1の溶岩層表面($x=0$)では、熱放射が発生しているものとする。このとき、時間 Δt の間に熱放射により減少する熱量 $\Delta Q_s(t+\Delta t)$ は、Stefan-Boltzmannの式に



(a) Model-1 (b) Model-2
図-1 解析モデル

より、式(3)のようになる。

$$\Delta Q_s(t+\Delta t) = \varepsilon \sigma (T_s(t)^4 - T_a^4) \Delta t \quad (3)$$

ここに、 ε : 溶岩の放射率、 σ : Stefan-Boltzmann 定数、 $T_s(t)$: 溶岩の表面温度、 T_a : 大気温度である。また、時間 Δt の間での溶岩層表面($x=0$)の温度変化 $\Delta T_s(t+\Delta t)$ は、式(4)に示すようになる。

$$\Delta T_s(t+\Delta t) = \frac{\Delta Q_s(t+\Delta t)}{\rho_l c_l h_l} \quad (4)$$

ここに、 ρ_l : 溶岩の密度、 c_l : 溶岩の比熱、 h_l : 溶岩層厚である。溶岩層底面($x=h_l$)については、路床への熱移動を無視するため、境界条件として断熱条件($\partial T/\partial x=0$)を設定した。

2.2 路床への熱移動を加えたモデル (Model-2)

図-1(b)に示すような Model-2 における溶岩・路床層(溶岩層厚 h_l 、全層厚 h_s)の x 軸方向の温度分布は、側方への熱移動を無視し、Model-1と同様に式(1)を適用して計算した。熱拡散率 α は、溶岩層($0 \leq x \leq h_l$)と路床層($h_l < x \leq h_s$)とでそれぞれ設定した。

Model-2の溶岩層表面($x=0$)では、Model-1と同様に、熱放射が発生しているものとする。このとき、式(3)、式(4)を用いて溶岩層表面($x=0$)の温度変化 $\Delta T_s(t+\Delta t)$ を計算した。路床層底面($x=h_s$)については、路床層の初期温度を境界条件として与えた。

2.3 計算条件

解析に用いる諸量は、山下ら²⁾を参考に、溶岩の密度 $\rho_l=2500\text{kg/m}^3$ 、溶岩の比熱 $c_l=840\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$ 、溶岩の放射率 $\varepsilon=0.9$ 、Stefan-Boltzmann 定数 $\sigma=5.67 \times 10^{-8}\text{W/(m}^2\cdot\text{K}^4)$ 、溶岩の熱伝導率 $\kappa=1.5\text{W/(m}\cdot\text{K)}$ とした。また、路床の熱

キーワード 溶岩, 冷却, 路床, 熱移動, 熱伝導方程式

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

拡散率は、砂（乾燥状態，20℃）の標準値³⁾である $\alpha_s = 28 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$ を用いた。なお、溶岩層の熱拡散率は式(2)で与えられる。以上の諸量を用いて、溶岩層の初期温度を 1300℃、路床層の初期温度を 20℃で一律に与え、大気温度を 20℃として、 $h_l = 0.5\text{m}$ 、 $h_s = 1.5\text{m}$ 、空間刻み幅 $\Delta x = 0.01\text{m}$ 、ステップ時間 $\Delta t = 0.01\text{s}$ で計算を行った。

3. 解析結果

図-2 に Model-1 の温度分布の時系列変化を、図-3 に Model-2 の温度分布の時系列変化を示す。Model-1 では、経過時間 6hr において、溶岩層底面の温度はほとんど変化しない結果となった。一方、Model-2 では、経過時間 6hr において、溶岩層底面の温度は約 770℃低下した。また、路床層の温度は、経過時間 6hr で溶岩層表面から約 0.8m（溶岩層底面から約 0.3m）の地点まで温度変化が見られた。

Model-1、Model-2 における溶岩層平均温度の時系列変化を図-4 に示す。なお、図-4 には、石原ら¹⁾の冷却モデルによる溶岩の温度変化も併せて示した。石原ら¹⁾の冷却モデルは、式(3)、式(4)に示すような溶岩表面からの熱放射による冷却を基本に、式(5)で表面温度の補正を行っている。この補正は、固体の団塊によって溶岩流が被覆されることによる冷却効果の低下を表している。

$$\left. \begin{array}{ll} T \geq 1303\text{K} : & T_s = T \\ T < 1303\text{K} : & T_s = T - 300 \end{array} \right\} \quad (5)$$

図-4 より、路床への熱移動を考慮した Model-2 の方が、Model-1 よりも早く冷却が進むことが分かる。経過時間 6hr における Model-1 と Model-2 との温度差は約 215℃となった。また、石原ら¹⁾の冷却モデルと比較すると、Model-1 と Model-2 ともに冷却の進行が遅い結果となった。これは、石原ら¹⁾の冷却モデルが、溶岩表面の温度変化により溶岩の冷却を評価しているのに対し、Model-1 と Model-2 は溶岩層内部の温度を考慮したうえで冷却を評価しているためである。

4. おわりに

本研究では、路床への熱移動を考慮した溶岩の冷却に関する解析を行い、その影響について検討した。今後は、溶岩の冷却に関する実験を行い、その結果と本解析結果を比較検証する必要がある。

参考文献

1) 石原和弘，井口正人，加茂幸介：数値計算による 1986 年伊豆大島溶岩流の再現，火山，第 2 集，伊豆大島噴火特集号，pp.64-76，1988。

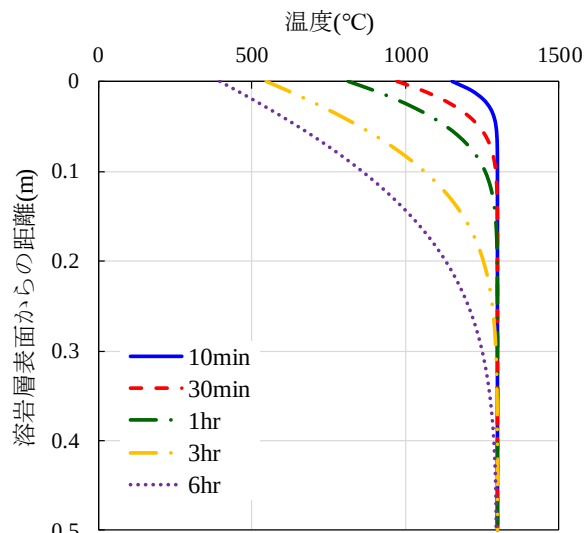


図-2 温度分布の時系列変化 (Model-1)

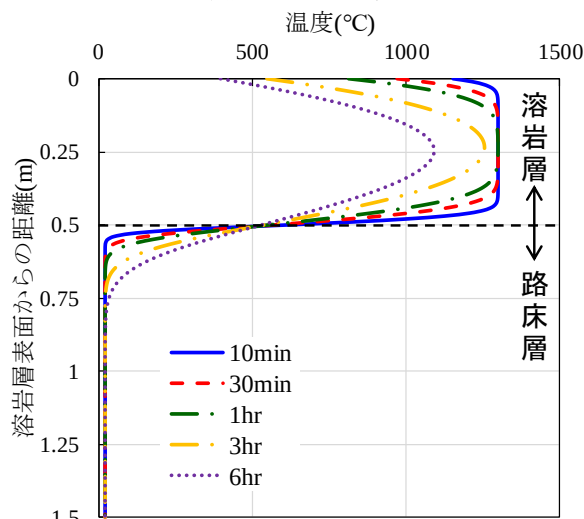


図-3 温度分布の時系列変化 (Model-2)

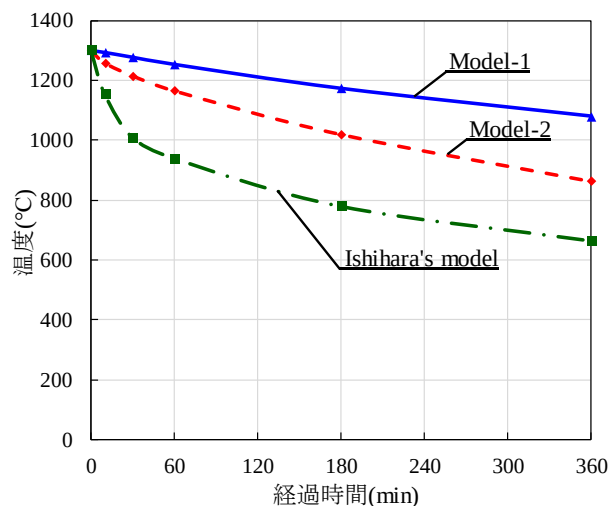


図-4 溶岩層平均温度の時系列変化

- 2) 山下伸太郎，宮本邦明：溶岩流のプラグ層が冷却に与える影響に関する基礎的研究，土木学会第 64 回年次学術講演会概要集，pp.361-362，2009。
- 3) 日射計のミュールッツ HP：熱伝導率の測定，<http://www.muroz.co.jp/thermalscience/thermalconductivity/> (2019 年 1 月 15 日閲覧)。