

溶岩流の冷却モデルに関する基礎的研究

住鉱コンサルタント株式会社 ○山下 伸太郎
筑波大学大学院 生命環境科学研究科 宮本 邦明

1. はじめに

既往研究による溶岩流の数値シミュレーションでは、多くの場合、流れは Bingham 流体として取り扱われている。Bingham 流体は流れの上層に速度勾配が一定のプラグ層をもつ流れであり、その特性を表す粘性係数と降伏せん断応力は温度関数であるため、溶岩流の流下状況をよりの確に把握するためには溶岩の温度変化を考慮した計算モデルが必要となる。

石原ら¹⁾は、1986年の伊豆大島の溶岩流について、溶岩表面からの熱放射による冷却を考慮し、溶岩流の平均温度を熱量保存則にもとづいて計算した。そして、溶岩の粘性係数と降伏せん断応力の温度関数をもとに、流れを等流とした二次元数値シミュレーションを行っている。また、山下ら²⁾は石原らの冷却モデルを用いて、二次元浅水流モデルを基本とした溶岩流シミュレーションモデルの検討を行っているが、この冷却モデルでは、溶岩流の鉛直温度分布を考慮していないため、溶岩流表面からの熱放出量を支配している表面温度と内部温度が同一となっており、実際より冷却が早く進むという指摘がある³⁾。これは、実際にはプラグ層内には温度勾配が形成されてプラグ層下部の溶岩流の温度よりも表面温度が低くなり、溶岩流表面からの熱放出量が減少して、流れ全体の冷却が抑制されるためと考えられる。この効果を表現するため Miyamoto and Sasaki⁴⁾は表面からの熱放射量に乗ずる冷却効率パラメータを提案しているが、冷却率パラメータのもつ物理的な意味が不明確である他、再現計算など溶岩流の流下実態との比較によりその数値を決定する必要があるといった実用面での課題もある。

上述したような、従来の冷却モデルの課題を解決するためには、プラグ層内部に生ずる温度勾配を考慮してプラグ層下の温度を評価できるモデルが必要と考える。そこで、本研究では、熱伝導方程式をもとにプラグ層の鉛直方向の温度分布を計算し、既往の冷却モデルとの比較を行うことにより、プラグ層内の温度勾配を考慮した場合の溶岩流の冷却特性について基礎的な検討を行った。

2. 溶岩流プラグ層の温度分布の計算方法

プラグ層内の温度分布は、側方と路床からの熱輸送はゼロとして、図-1に示すような全層厚 h_t の上層に厚さ h_y のプラグ層を持つ溶岩流の鉛直方向の温度分布を(1)式の一次元熱伝導方程式により計算した。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\kappa}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \dots\dots\dots (1)$$

差分法により(1)式を解くと、時間 $t=(n+1)\Delta t$ 、溶岩流表面からの位置 $i\Delta z$ における溶岩温度は次式で表される。

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \Delta t \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta z^2} \frac{\kappa}{\rho c} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 κ : 熱伝導率(J/m/s/K)、 ρ : 溶岩密度(kg/m³)、 c : 比熱(J/kg/K)、 Δz : z 方向の計算間隔、 Δt : 計算の刻み時間である。

いま、プラグ層の最上層では(3)式の Stefan-Boltzmann 式で計算される熱放射量 Q_s に対応した温度勾配が生じているとすると、 $z=0$ での境界条件は式(4)のとおりとなる。

$$Q_s(t) = \varepsilon \sigma (T_s(t)^4 - T_a^4) \dots\dots\dots (3)$$

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0}^{t=t+\Delta t} = Q_s \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 T_s : 溶岩流の表面温度(K)、 T_a : 大気温度(K)、 ε : 溶岩の放射率、 σ : Stefan-Boltzmann定数である。

一方、下層からプラグ層へは、境界 $z=h_y$ での温度勾配に応じた熱移動量 Q_p があるとして、下層の温度 T_b を(5)式により計算した。そして、これを熱伝導計算における $z=h_y$ での境界条件とした。なお、簡単のため、下

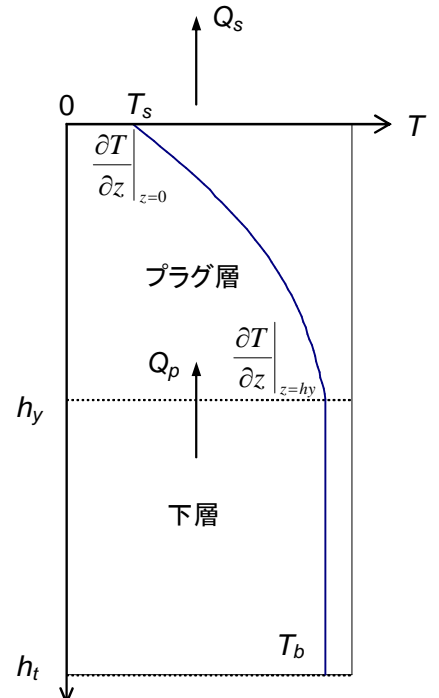


図-1 プラグ層内の熱移動の模式図

層の温度低下によるプラグ層厚の増大は生じないとした。

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=h_y} = Q_p, \quad \frac{\partial T_b}{\partial t} = -\frac{Q_p}{c\rho(h_t - h_p)} \quad \dots\dots (5)$$

$$T_{z=h_y}^{n+1} = T_b \quad \dots\dots\dots (6)$$

3. 計算結果

計算定数は、伊豆大島の溶岩流シミュレーションで用いられた値を基本に、 $\rho=2,500(\text{kg/m}^3)$, $c=840(\text{J/kg/K})$, $\varepsilon=0.9$, $\sigma=5.67 \times 10^{-8}(\text{J/s/m}^2/\text{K}^4)$ とした。また、熱伝導率は $\kappa=1.5(\text{J/m/s/K})$, 溶岩の初期温度及び大気温度をそれぞれ $T_b=T_s=1,100(^{\circ}\text{C})$, $T_a=20(^{\circ}\text{C})$ とし、 $\Delta t=1(\text{s})$, $\Delta z=0.01(\text{m})$ で計算を行った。

図-2には、全層厚1m, プラグ層厚0.5mとした場合の、計算によるプラグ層内における温度分布の時間変化を示している。時間の経過にしたがって、表層から下層へ向かって徐々に冷却が進行しているが、表層と比較して下層との境界(0.5m)での温度低下は非常に小さい。24時間後の温度は、表層で約240°Cと900°C近く温度が低下しているのに対し、下層境界の温度は約1,040°Cで60°C程度しか低下していない。

図-3には、 h_y を0.3m, 0.5m, 0.7mと変化させた場合の、下層の温度の時間変化を示している。図中には、 $h_y=0\text{m}$ つまり、表面温度と内部温度とを同一としている既往の冷却モデルに相当する計算結果も示している。

プラグ層の厚さの違いによる下層の温度変化は比較的小さく、24時間後で見ると $h_y=0.3\text{m}$ と0.7mの差は120°C程度である。一方 $h_y=0\text{m}$ では、5時間程度で温度低下が急速に進み、24時間後には約230°Cとなり、プラグ層が存在する場合と比較して明らかに早く冷却が進んでいることがわかる。

4. おわりに

熱伝導方程式をもとにプラグ層の鉛直方向の温度分布と下層の冷却過程について検討した結果、プラグ層の存在により下層部の温度低下が大きく抑制されていること、また、内部温度を一定としている既往の冷却モデルでは、プラグ層の温度分布を考慮した場合と比較して冷却の進行がかなり早く進むことが確認できた。今後は、これまでの二次元浅水流モデルを基本に、プラグ層の温度勾配の形成を考慮した冷却モデルとそれを組み込んだ溶岩流シミュレーションモデルを作成し、その適用性について検討を進める予定である。

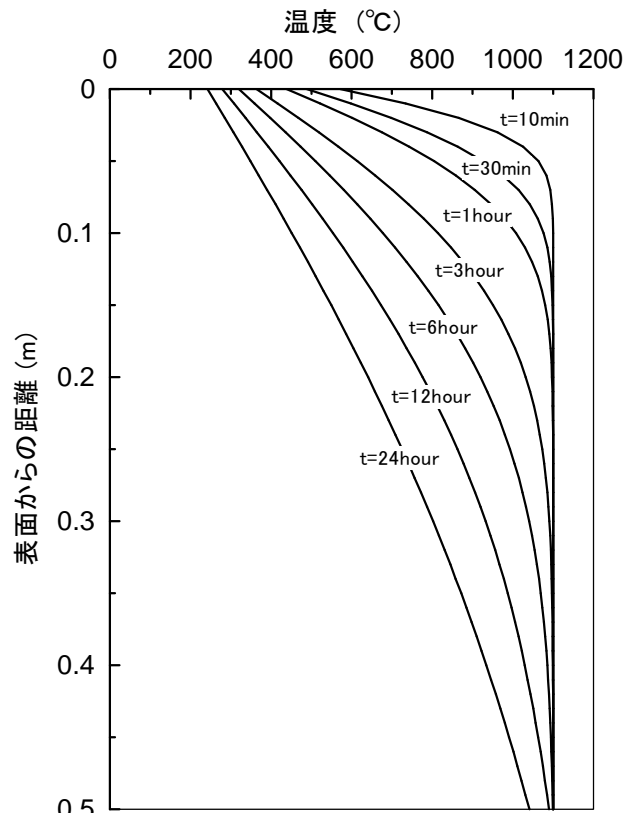


図-2 プラグ層内の温度分布

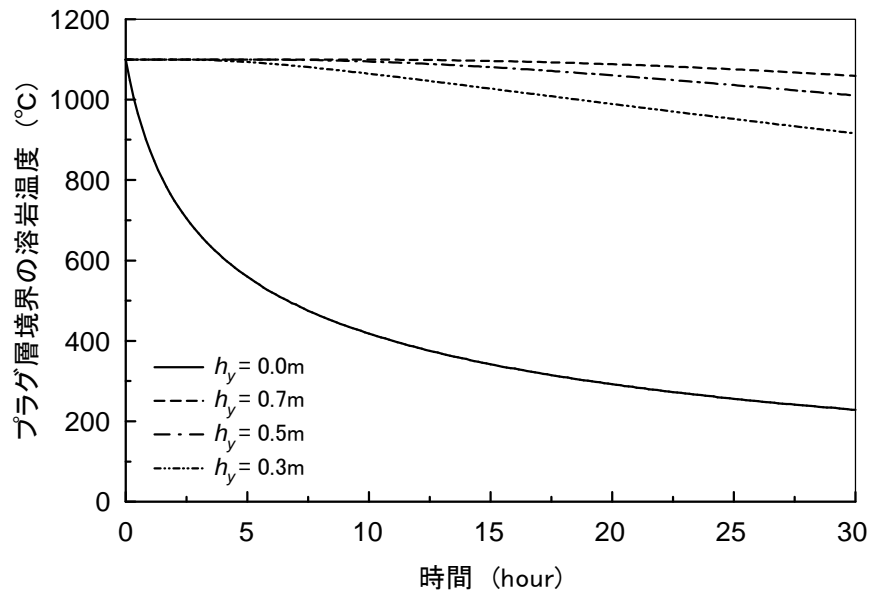


図-3 下層温度の時間変化

参考文献

- 1) 石原他: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,1988,pp.64-76.
- 2) 山下他:溶岩流の数値シミュレーション,水工学論文集,第34巻,1990,pp.391-396.
- 3) 大原他:桜島の溶岩流,平成2年度砂防学会研究発表会概要集,P.296-299,1990
- 4) Miyamoto and Sasaki:Numerical simulations of flood basalt lava flows, journal of geophysical research,vol.103,No.B11,p.27,489-27,502,1998.