

10 溶岩流の数値シミュレーション

—ビンガム流体モデルを用いた氾濫シミュレーションの応用—

アジア航測株式会社 ○北原 一平、中島 達也

建設省土木研究所 水山 高久、栗原 淳一

はじめに

わが国には約70の活火山が存在している。近年、これらの活火山のうち、三宅島（1983年）や伊豆大島（1986年）において火山噴火に伴う溶岩流が発生し、大きな社会問題を引き起こしている。しかしながら、今まで溶岩流に対する本格的な対策はなされておらず、その対策計画を立案することは急務である。本研究はその一環として、溶岩流の堆積範囲の予測手法を開発することを目的に行ったものである。溶岩流の数値計算手法としては既に石原ら¹⁾が幾つかの溶岩流を対象にBingham 流動の定常流の流量式²⁾と質量保存則を用いた計算手法を提案しているが、本研究の特徴は次のとおりである。

①土石流の氾濫シミュレーションモデル³⁾をベースにして、不定流の運動方程式にBingham 流動の抵抗則を応用した。

②これと不定流の連続式を連立させて、差分法（リープフロッグ法）により逐次計算を行った。

1. 研究対象事例

わが国において近年発生し、比較的観測資料が得られている三宅島（1983年）と伊豆大島（1986年）の溶岩流の中から保全対象の有無、検証データの有無等の点を考慮し、三宅島Ⅰ・Ⅱと伊豆大島B-1及びCの溶岩流をシミュレーションの対象とした。

2. シミュレーション手法

2. 1 基礎方程式

(1) 運動方程式：溶岩流を流体とみなし、運動方程式としては、2次元の不定流方程式を用いた。

$$x \text{ 方向: } \frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial (Mu)}{\partial x} + \beta \frac{\partial (Mv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{Fx}{\rho}$$

$$y \text{ 方向: } \frac{\partial N}{\partial t} + \beta \frac{\partial (Nu)}{\partial x} + \beta \frac{\partial (Nv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{Fy}{\rho}$$

ここに、M、N：x，y 方向の単位幅流量、u，v：x，y 方向の平均流速、H：流動深（水深＋河床高）

ρ ：溶岩流の密度、Fx，Fy：x，y 方向の摩擦抵抗抗力

摩擦抵抗抗力としては次式で定義される抵抗則を用いた。

$$Fx = \frac{1}{2} f_x \rho u \sqrt{u^2 + v^2}, \quad Fy = \frac{1}{2} f_y \rho v \sqrt{u^2 + v^2}$$

ただし、 f_x ， f_y はBingham 流動の摩擦係数⁴⁾として次式により与えられる。

$$f_x = \frac{\left(\frac{\tau_x - \tau_y}{\tau_x} \right)^4}{\left(1 + \frac{3}{2} \frac{\tau_y}{\tau_x - \tau_y} \right)^3} \cdot \frac{\rho q}{\eta}, \quad f_y = \frac{\left(\frac{\tau_y - \tau_x}{\tau_y} \right)^4}{\left(1 + \frac{3}{2} \frac{\tau_x}{\tau_y - \tau_x} \right)^3} \cdot \frac{\rho q}{\eta}$$

ここに、 τ_y ：降伏応力、 τ_x ， τ_y ：x，y 方向の作用応力、q：単位幅当りの流量

(2) 連続式：流体の連続式を用いた。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

2. 2 温度

溶岩の温度については石原らと同様の手法を用いた。

(1) 熱量保存則：

$$Q_{i,j} = Q_{ix,i,j} + Q_{iy,i,j} - Q_{ix,i+1,j} + Q_{iy,i,j+1}$$

ここに、 $Q_{ix,i,j}$ 、 $Q_{iy,i,j}$ は、それぞれ隣接するメッシュ $(i-1,j)$ 及び $(i,j-1)$ からの単位時間における溶岩の流入（または流出）による熱量の増加量

(2) 溶岩の冷却：溶岩の冷却は、主に表面からの熱放射によるものとする。時間 Δt の間に熱放射によって減少する熱量 $Q_{s,i,j}$ は Stefan-Boltzmann の式を用いた。

$$Q_{s,i,j} = \epsilon \sigma T_{s,i,j}^4 \Delta t \Delta x \Delta y$$

ここに、 ϵ ：溶岩の放射率、 σ ：Stefan-Boltzmann 定数、 $T_{s,i,j}$ ：溶岩流の表面温度、 Δx 、 Δy ： x 方向、 y 方向のメッシュ幅、 Δt ：計算の刻み時間

表面と内部の温度の関係は次のように設定した。

$$T_{s,i,j} = T_{i,j} \quad (T_{i,j} \geq 1303K)$$

$$T_{s,i,j} = T_{i,j} - 300K \quad (T_{i,j} < 1303K)$$

(3) 溶岩の温度：溶岩の熱量の変化は次式による。

$$Q_{i,j}(t + \Delta t) = Q_{i,j}(t) + Q_{i,j} - Q_{s,i,j}$$

また、メッシュ (i,j) における溶岩の平均温度 $T_{m,i,j}$ は、

$$T_{m,i,j} = Q_{i,j}(t + \Delta t) / (\rho c h_{i,j} \Delta x \Delta y)$$

ここに、 c ：比熱

2. 3 粘性係数

伊豆大島、エトナ山（イタリア）およびアレナル（コスタリカ）において測定された温度と粘性係数のデータの最小自乗法によって引いた線を用いた。（図 1）

2. 4 降伏応力

HULME⁵⁾ は Bingham 流動の速度式から降伏応力を流速、厚さ、地面の傾斜角および粘性係数で表した。石原ら¹⁾はこの方法を用い、HINAKAHI⁶⁾の実測した伊豆大島の溶岩流の値から温度と降伏応力の関係を図 2 のように表している。本研究ではこの関係式を用いた。なお図 2 には PINKERTON⁷⁾によるエトナ山のデータも示す。

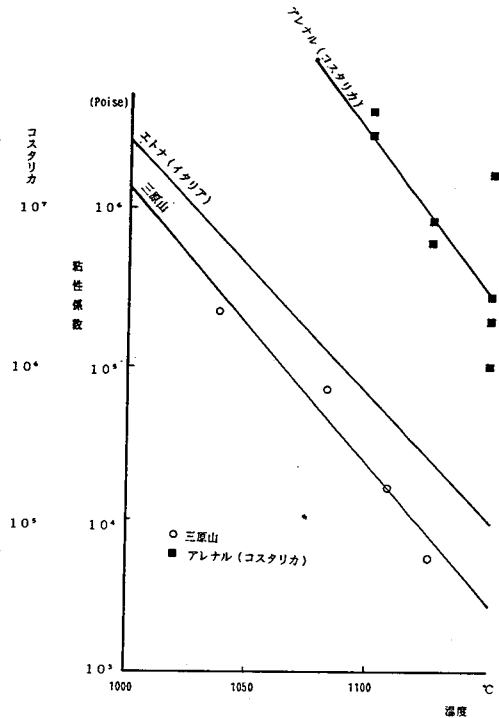


図 1 温度と粘性の関係

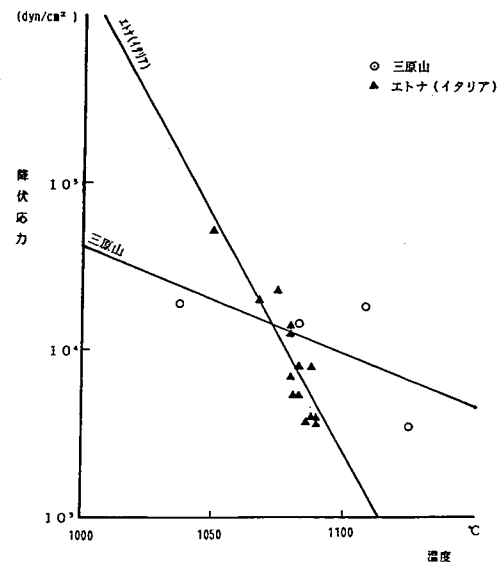


図 2 温度と降伏応力の関係

2. 5 移動限界厚

溶岩流は一応流体とみなすことができるが、粘性が強いので、水などと異なり平な所でもかなりの流動厚をもつ。そのため、流体の連続式を用いて流動厚を決める場合、最低の流動厚を決める必要がある。これを移動限界厚と呼ぶ。今回は実際の溶岩の堆積厚をめやすとして、計算による到達時間と到達距離が実績とある程度合うような移動限界厚を試行

錯誤によって設定した。

2. 6 計算条件

表1に計算条件を示す。

表1 計算条件一覧表

	大島B-1	大島C	三宅島I, II
噴出体積	別に記載		
流量	別に記載		
継続時間	5時間	1時間	3時間
溶岩の初期温度	1100℃	1100℃	1120℃
溶岩の密度	2.5		
放射率	0.9		
比熱	840 [KJ/(ton・k)]		
重力	9.8m/s		
Stefan-Boltzmann's Constant	5.6×10^{-11} [KJ/(S・m ² ・K ⁴)]		
温度と粘性の関係式	$\log_{10} \eta = 24.61 - 0.0181 (T-273) [\text{poise}]$		
温度と降伏応力の関係式	$\log_{10} Sy = 13.67 - 0.0089 (T-273) (\text{dyn/cm}^2)$		
刻み時間	3秒, 1秒	1秒	3秒

3. 計算結果と今後の課題

3ケースの溶岩流についてシミュレーション計算を行った。

図3に伊豆大島Cの溶岩

流の、図4に三宅島I・IIの

溶岩流の計算結果と実績の堆積範囲の比較を示す。以下に3ケースの結果のまとめを述べる

①計算による溶岩流の堆積範囲は、実際の溶岩流と同様にほとんどが地形条件を反映している。

②計算による溶岩流の到達距離と到達時間は、温度-粘性係数の関係、温度-降伏応力の関係が同じ条件であれば、移動限界厚と単位時間の流入量に強く影響される。溶岩流の移動は基本的に温度-粘性係数、温度-降伏応力の関係に規定されるが、単位時間の流入量が多いと比熱が大きくなるため温度の低下する割合が小さくなり、その結果、到達距離が大きくなる。また、流入量等他の条件を変えない場合、移動限界厚を大きくすると、各メッシュからは、その中に存在する溶岩流の量が移動限界厚以上にならないと隣のメッシュへ移動しないため、到達時間は大きくなり、その間の温度低下も大きく、したがって到達距離は小さくなる。

③今回のシミュレーション計算では3ケースとも移動限界厚以外の条件は一定にし、移動限界厚のみを変えて計算と実績の到達距離を合うように試行錯誤を行ったが、各ケースともだいたい計算と実績を合わせることができた。設定した移動限界厚は実績の堆積厚に対して割合は異なるものの、相対的な厚さの傾向は表れている

④今後の課題としては温度-粘性、温度-降伏応力の関係、移動限界厚、噴出量等溶岩流に関する基本的なデータを集める必要がある。また、移動限界厚 h_{cr} の設定方法についてはビンガム流動の最小厚を与える式

$h_{cr} = \tau_y / \rho g \sin A$ を用いることを検討する。

参考文献

- 1) 石原和弘、井口正人、加茂幸介(1988): 数値計算による1986年伊豆大島溶岩流の再現、火山、第2集、特集号伊豆大島火山1986年噴火、P64-76
- 2) DRAGONI, M., BONAFADE, H., BOSCHI, E. (1986): Downslope flow model of a Bingham liquid: implications for lava flows, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 30, P305-325
- 3) 下東久巳、水山高久、井戸清雄(1985): 土石流氾濫シミュレーション、昭和60年度砂防学会研究発表会概要集、P92-95

- 4) 芦田和男、山野邦明、神田昌幸(1986) : 高濃度流れに関する研究(2)、京都大学防災研究所年報、第29号B-2、P361-375
- 5) HULME.G(1974) : The Interpretation of Lava Flow Morphology, Geophys.J.R.astr.Soc.39, P361-383
- 6) HINAKAHI TAKESHI(1951) : On the Temperature and Viscosity of the Fresh Lava Extruded in the 1951 Oh-shima Eruption、東京大学地震研究所彙報、Vol.29、P487-493
- 7) PINKERTON.H, SPARKS.R.S.J(1978) : Field measurements of the rheology of lava, Nature(London), VOL.276, No.5686, P383-385

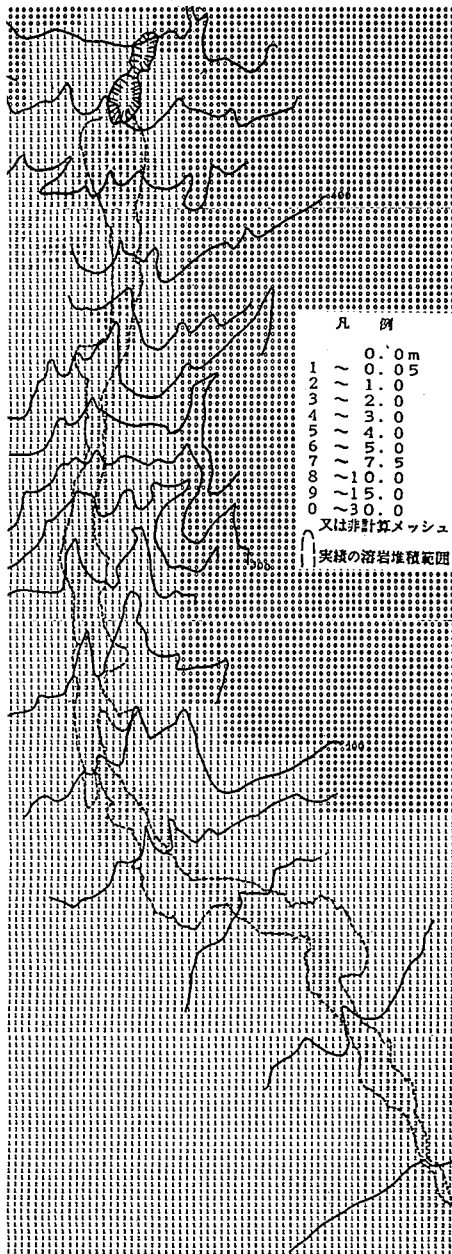


図3 シミュレーション結果(伊豆大島C)

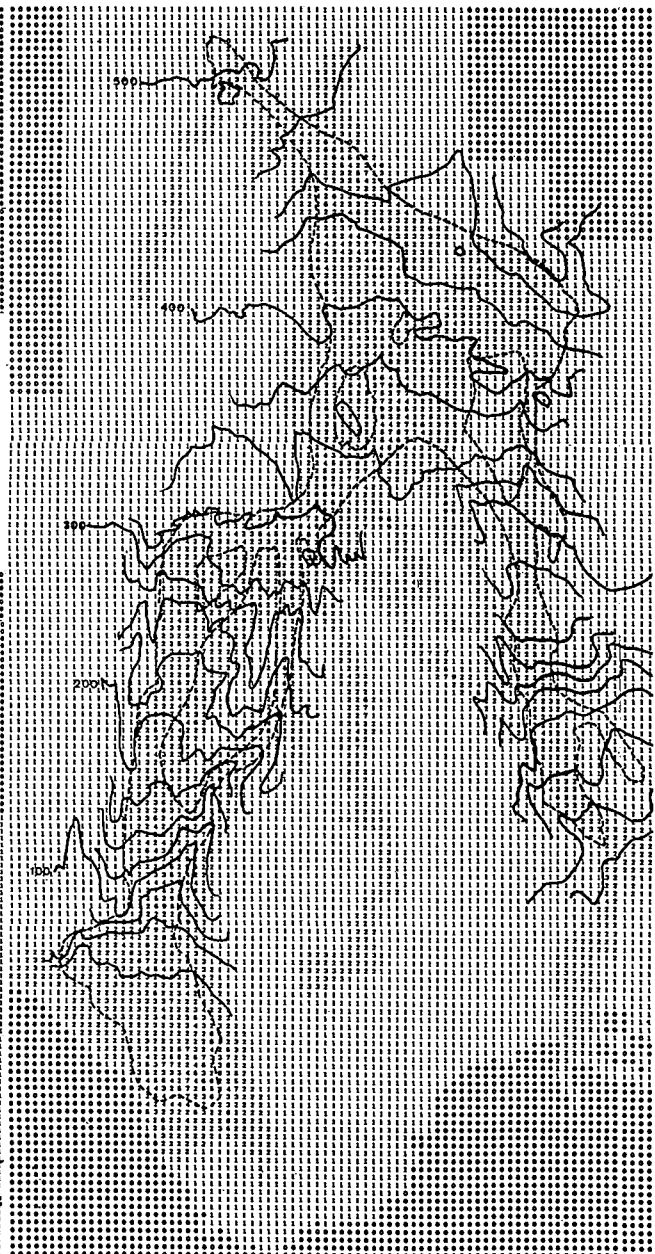


図4 シミュレーション結果(三宅島I・II)