

DTM を用いた火碎流 シミュレーションの開発

1994年 10月
APA No. 59-10
日本測量調査技術協会

竹内仁
佐竹次郎

1. はじめに

火碎流は、雲仙普賢岳で頻繁に発生し、人的被害が生じるに至って重要な火山災害として注目されるようになった。火碎流による災害としては、山林の焼失、田畠の埋没、家屋の破壊などがあげられる。しかし、火碎流の特徴として高温かつ高速な流れであるために十分な観測がなされず、現在でも決定的な物理モデルは提案されていない。したがって、火碎流の流下メカニズム解明する上でも、火碎流の流下シミュレーションは重要な研究手段であると言える。

また、火碎流の流下危険区域の予測を行うことは、火碎流による災害を軽減する上で非常に重要なことである。シミュレーションはこの目的にも大いに役立つことが期待できる。

火碎流のうち、土砂や軽石等から形成されるその本体部は、地形の低所へと流下するなど、その流走方向は地形によって決定される傾向にある。したがって、火碎流のシミュレーションにあたっては、対象地域のDTMが必要となってくる。本研究では、DTMを用いた火碎流の流下シミュレーションの開発および火碎流到達危険度図の作成を行った。

2. 火碎流シミュレーション

(1) 火碎流モデル

火碎流は、その規模や発生形態に関して、様々なモデルが考案されている。噴煙柱が倒壊して発生するもの、火口から火碎物が溢れ出ることによって発生するものの、溶岩ドームが崩落することにより発生するもの等である。

コンピューターによる火碎流の到達危険区域の予測シミュレーションとしては、従来は質点力学を用いたエナジーライン (Energy Line) モデルや、エナジー

コーン (Energy Cone) モデルによるものが主流であった。これらのモデルは火碎流の到達距離が、火碎物の総噴出量を与えることにより、地形との関係から容易に求めることができるという利点がある。しかし、この手法によって求めることができるのは、火碎流の最大到達範囲であり、流下方向（例えばどの谷に流下していくか）については詳しい予測はできない。また、このモデルは火碎流の発生形態で言えば噴煙柱が崩壊して発生する火碎流の予測に適していると言える。

災害予測に際しては、より現実に近いシミュレーションが必要である。ここでは、宝田ほか (1993) や、McEwen and Malin (1989) などがシミュレーションに用いたビンガムフロー モデルを用いて火碎流の流下シミュレーションを行った。ビンガムフロー モデルでは、火碎流を粘性流体 (ビンガム流体) として扱う。

ビンガム流体は、流動により生じる剪断抵抗が、降伏応力による抵抗、粘性による抵抗、乱流状態の流れが底面から受ける抵抗から構成されていると考えられる流体である。図1に示す模式図のようにビンガム流体は、降伏強度を上回る剪断応力がかかっているために変形が生じている下部境界層、および降伏強度に至らない剪断応力しか加わっていないために変形は生じていない上部プラグ部分から形成されていると考える。

(2) 基本式

シミュレーションに用いる基礎方程式は、流れの連続式および運動方程式である。これらの二次元差分式を使って計算を実行する。

連続式

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = Q \quad (2.1)$$

ここで、D : 火碎流の流動厚

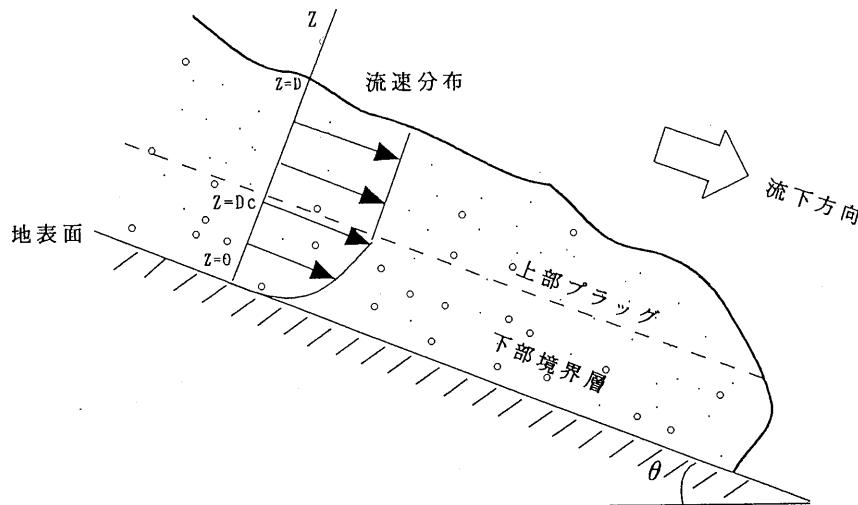


図1 ピンガム流体の模式図

M : x 方向の線流量

N : y 方向の線流量

t : 時間

Q : 火砕物の供給量

運動方程式

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho g \sin \theta - \frac{\tau}{(D-z)} \quad (2.2)$$

ここで、u : 位置 z における火砕流の流速

g : 重力加速度

θ : 地表面の傾斜角

τ : 位置 z における剪断応力

ρ : 火砕流の密度

連続式は、ある領域に注目したときに、その領域に入りする流量の収支が火砕流の厚さの変動に寄与することを示す。また、運動方程式は流体に作用する力（重力および摩擦力）によって、流体の運動が変化することを示す。ここでピンガム流体の抵抗則

$$\tau = \tau_0 + \eta \frac{du}{dz} + \frac{1}{2} C_g \rho u_m^2 \quad (2.3)$$

を適用する。

ここで、τ₀ : 降伏応力

η : 粘性係数

Cg : 地面に対する抗力係数

um : 火砕流の平均流速

(2.2)式において

$$\frac{du}{dt} = 0 \quad (2.4)$$

と仮定して、(1.2)式を τ について解けば、

$$\tau = \rho g (D-z) \sin \theta \quad (2.5)$$

剪断応力が降伏応力とつりあう位置を z=Dc とすれば、(2.5)式より

$$\tau_0 = \tau|_{z=D_c} = \rho g (D-D_c) \sin \theta \quad (2.6)$$

したがって、

$$D_c = D - \frac{\tau_0}{\rho g \sin \theta} \quad (2.7)$$

(2.3)式、(2.5)式、(2.6)式より

$$\frac{du}{dz} = \frac{1}{\eta} \rho g (D_c - z) \sin \theta - \frac{1}{2\eta} C_g \rho u_m^2 \quad (2.8)$$

これを z で積分して

$$u(z) = \frac{1}{\eta} \rho g (D_c z - \frac{1}{2} z^2) \sin \theta - \frac{1}{2\eta} C_g \rho u_m^2 z \quad (2.9)$$

(2.9)式を z 方向に積分して線流量を求める

$$M = \int_0^{D_c} u(z) dz + u_p (D - D_c)$$

$$= \frac{1}{3\eta} \rho g \sin \theta D_c^3 - \frac{1}{4\eta} C_g \rho u_m^2 D_c^2 + u_p (D - D_c) \quad (2.10)$$

ただし、u_p : プラグ内の流速 (=一定)

プラグ内の流速は、(2.9)式により求められ、

$$u_p = u(D_c) = \frac{1}{2\eta} \rho g D_c^2 \sin \theta - \frac{1}{2\eta} C_g \rho u_m^2 D_c \quad (2.11)$$

(2.1)(2.7)(2.10)(2.11)を用いて逐次計算を実行していく。

(3) 標高データ

使用した DTM は、浅間山周辺地域の東西約14 km、南北約21 km のメッシュ間隔100 m のデータである。

(4) 入力データ

シミュレーション実行時に与えなければならないパラメータを以下に示す。

- 1) 流出総量
- 2) 流出継続時間（あるいは流出レート）
- 3) 降伏強度
- 4) 粘性係数
- 5) 地面に対する抗力係数
- 6) 火碎流の密度

ここでは1783年の浅間山天明噴火の際に流出した吾妻火碎流規模のものを考える。荒牧（1967）による、吾妻火碎流の体積0.1 km³を流出総量とする。また、山田ほか（1991）が、吾妻火碎流のシミュレーションに用いた火碎流の流出レートとほぼ同じ20,000 m³/秒を流出レートとする。そのほか、(3)～(6)については、宝田ほか（1993）の用いた値を使用する。表1にまとめる。

表1 入力データの値

流出総量	0.1 km ³
流出レート	20,000m ³ 毎秒
降伏強度	850パスカル
粘性係数	90パスカル秒
抗力係数	0.01
火碎流密度	1300kg/m ³

(5) 結果

数値計算によって得られた火碎流の到達時間を図2に示す。傾斜の急な山頂付近で非常に流速が大きく、最初の5分で約4 km 流下すると予測された。一方、勾配が緩やかな山麓では、火碎流はほとんど流動できず、その末端部が谷状地形に沿ってわずかに流下するのみである。いずれにしても民家まで到達するのには、數十分という時間を要するが、別荘地を考えれば火碎流の発生から数分で到達する可能性もあり、適切な事前予測と早めの避難が重要になってくると考えられる。

3. 火碎流到達危険度図の作成

(1) 流体の到達危険度

火碎流流下を予測するためには上述のように複雑なシミュレーションを行う必要がある。そのため、火碎流の到達危険度の分布を簡易に予測することは困難である。そこで、火碎流の到達危険度の分布に近似的な数量を計算する方法を下記に記述する。これは、ある流体が重力によって加速運動し、粘性抵抗によって減速するという単純な流れを考えたときの、その到達危険度を計算する方法である。ここでは流体の体積やその他の抵抗や熱エネルギーなどは無視している。なお、火碎流の運動は、粘性抵抗によってのみ減速を支配されるものではなく、体積、熱エネルギーと運動エネルギーの変換など様々な条件のもとで行われているものなので、ここで示した方法はあくまでも火碎流到達の危険度の分布に簡易的な近似を示す方法であることに留意されたい。

斜面を流下する流体について初速0としたときの単純なエネルギー保存則を考えると以下のようになる。

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 + avt + bv^2t + c \quad (3.1)$$

m : 流体の質量

g : 重力加速度

h : 出発点から計算地点までの標高差

v : 計算地点での流速

\bar{v} : 出発点から計算地点までの平均流速

t : 出発点から計算地点までの所要時間

a : 粘性抵抗に関する係数

b : 乱流抵抗に関する係数

c : その他の抵抗

(3.1)式では左辺が位置エネルギーを、右辺の初項が運動エネルギー、その他の項が抵抗による損失エネルギーを表す。ここで、乱流抵抗とcを無視し、流体が停止する（速度v=0）地点の式をたてると(3.2)式となる。

$$mgh = avt \quad (3.2)$$

ところで vt は流体が出発点から計算地点までたどってきたみのり1を表すので、以下のように書き換えられる。

$$\frac{h}{l} = \frac{a}{mg} = \text{const} \quad (3.3)$$

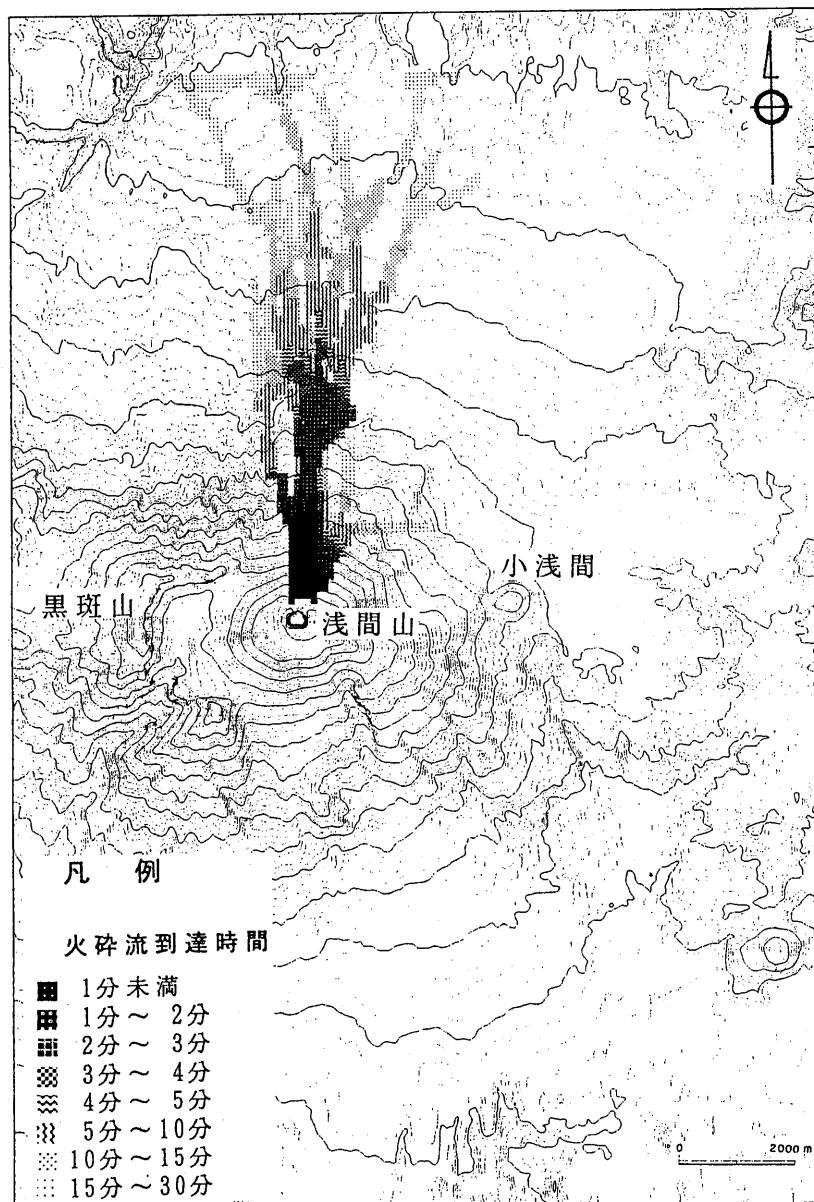


図2 浅間山地域における火碎流シミュレーションの実行結果

以上から、最大流下方向にたどったときの流体の到達危険度は、流体の出発点から計算地点までの比高 h とみちのり l の比に支配されると考える。

(2) 流下方向

以上は最大流下方向にたどったときの流体の到達危険度を簡易的に表現する方法であったが、最大流下方向がどのような向きになるのかを計算する必要がある。斜面にいくつかの区間を設け、それらを流体が通

過するたびに順番に 1、2、3、…と番号をふる。それらの斜面上の各区間の比高、みちのりをそれぞれ (h_1, l_1) 、 (h_2, l_2) 、 (h_3, l_3) 、とする。出発点から n 番目の区間を通過する流体の速度 v は(3.1)式から粘性抵抗以外の減速項を無視し、

$$mg \sum_{i=1}^{n-1} h_i = \frac{1}{2} mv^2 + a \sum_{i=1}^{n-1} l_i \quad (3.4)$$

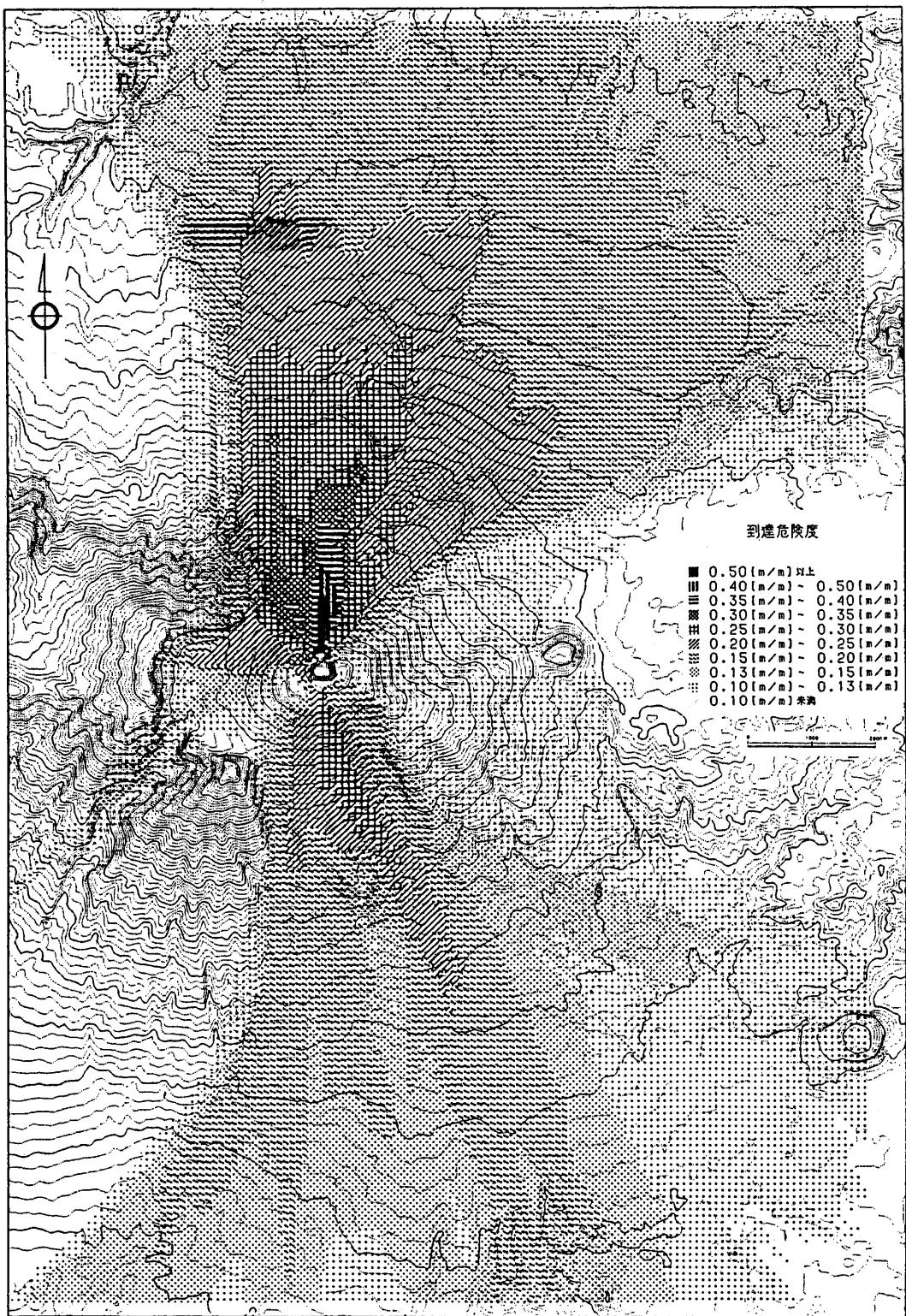


図3 浅間山地域の火碎流到達危険度図

$$v = \sqrt{2 \left\{ g \sum_{i=1}^{n-1} h_i - a \sum_{i=1}^{n-1} l_i / m \right\}} \quad (3.5)$$

となる。n番目の区間で加速される速度は、n番目の区間で最大傾斜方向とそれまでの流下方向とのなす角θとすると

$$\text{今までの流下方向に } \sqrt{2 \left\{ gh_n - al_n / m \right\} \cos \theta} \quad (3.6)$$

$$\text{それと直交する方向に } \sqrt{2 \left\{ gh_n - al_n / m \right\} \sin \theta} \quad (3.7)$$

の成分を持つこととなる。これにより、n番目の区間をすぎると最大流下方向はそれまでよりも以下の角度φだけずれることとなる。

$$\cotan \phi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} h_i - \frac{a}{mg} \sum_{i=1}^{n-1} l_i}{h_n - \frac{a}{mg} l_n}} \cdot \frac{1}{\sin \theta} + \cotan \theta \quad (3.9)$$

ここで、a/mg が未知数であるが、

$$\frac{a}{mg} = k \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n-1} h_i}{\sum_{i=1}^{n-1} l_i} \quad (3.10) \quad (k: \text{定数}, 0 < k < 1)$$

として、kの値を任意に設定し、φを求め、最大流下方向を決定する。なお、a/mg は本来 const であるべきだが、ここでは計算簡略化だけを主目的とし、そうしていない。

(3) 危険度の計算

上記の最大流下方向の決定と、比高とみちのりの比から最大流下方向へたどった危険度を計算する。最大流下方向以外の方向へは、最大流下方向とのなす角δを用いて、最大流下方向への危険度の $\cos^2 \delta$ 倍したものを当てる事とする。以上の考えを基本として、粘性抵抗にのみ減速を依存する斜面を流下する流体の到達危険度を求める。ただし、標高のメッシュデータを用いて計算する場合、メッシュの配列方向が角度計算などで影響を及ぼすので、なんらかの工夫をする必要がある。

(4) 危険度評価結果

浅間山の100m間隔格子の標高メッシュデータを用いて粘性抵抗にのみ減速を依存する斜面を流下する流体の到達危険度を計算した結果を図3に示す。

4. DTM とシミュレーション

これまで、火碎流の流下シミュレーションおよび火碎流到達危険度予測図の作成に際しての DTM の使用例を述べてきた。もちろん、火山災害予測という観

表2 シミュレーションの種類とメッシュの大きさ

火碎流 (エナジーコン)	25m
(2次元差分)	50~200m
津波	500m
泥流	100~250m
溶岩流	10~50m
土石流	25~50m

点からすれば火碎流にとどまらず、溶岩流、土石流、降下火碎物、噴出岩塊、噴火に伴う津波などもその影響を予測していくなければならない。地形の影響をあまり受けない降下火碎物を除けば、これらのシミュレーションの開発や応用には DTM の整備が不可欠であると言える。

現在、国土庁では全国13火山について火山噴火災害危険区域予測図の作成を進めているが、予測対象とする現象について多かれ少なかれ数値シミュレーションによる危険区域の検討が課題となっている。したがって、今後新しい火山ハザードマップを作成していく上で、火山地域での DTM の整備が必要である。

一方、雲仙岳を始め全国主要火山における DTM の整備が進められ、10m メッシュデータが作成され始めている。このような精密なデータは、より厳密な予測作業に活かされるべきであり、シミュレーション技術にもこの精度に見合った進歩・向上が望まれる。

最後に、現時点での火山災害のシミュレーションにどの程度のメッシュデータを用いているかを表2に示す。

(国際航業株式会社)