

財団法人 砂防・地すべり技術センター 高濱 淳一郎

財団法人 砂防・地すべり技術センター ○中島 達也

1. はじめに

1991年6月3日に長崎県雲仙岳で、火砕流により死者・行方不明42名の惨事が起こった。これを契機に火砕流は、世間一般に広く知られるようになった。しかしながら、当時、火砕流の流動機構や流動モデルについては、ほとんど解明されていなかったのが現状であった。

その後の精力的な研究により火砕流の流動メカニズムが解明されつつある。当財団でも、既に火砕流の流動機構に関する理論的考察を行い、流動モデルと数値シミュレーションプログラムを開発している¹⁾。このモデルは普賢岳におけるハザードマップ作りに用いられその有用性が示された。ここで用いられたモデルは、その当時の要求に答えるべく作成されている。すなわち、火砕流の到達距離、到達時間といった防災上最も重要な項目に主眼が置かれ、それらを支配している火砕流の急勾配斜面での挙動を主として評価するモデルとなっている。この場合、流れは活発で、粒子は流れの中でランダムに運動しており、粒子の衝突により発生する圧力が卓越し、剪断抵抗としては粒子間の固体摩擦が支配しているような流れを想定している。土砂濃度も流れのエネルギー勾配の関数として表される。

一方、勾配が緩くなり、流れが活発でなくなると、粒子は整然と高い濃度を保って運動するようになる。このような流れにおいては、粒子間固体摩擦は、粒子の衝突時の摩擦としてではなく、静的なクーロン摩擦（内部摩擦）としての特性を持つようになる。また、流動を規定している粒子の衝突時の応力も、粒子間の固体摩擦ではなく非弾性的性質が卓越してくるようになる²⁾。そこで、停止直前、あるいは、緩勾配区間における流れの挙動を評価しようとする、このような特性を評価できるシミュレーションモデルを作成しなければならない。特に火砕流下層部に対する火砕流対策はその有効性、効果を考えると、まず堆積領域において実施されることが想定されるが、従来のシミュレーションプログラムではその効果を評価することが困難であった。本モデルの開発により砂防施設の効果の評価への可能性の道が開かれたと考えている。

2. 火砕流の流動モデル

火砕流は、周知の通り上層部と下層部からなる。本研究でも、従来の研究と同様¹⁾火砕流の下層部の流動を対象としている。火砕流の規模としては、溶岩ドームの崩落により生ずるような比較的小規模なものを想定している。粒子の間隙を満たしている空気の効果は、陽には考慮していない。流れのエネルギー散逸構造は、先に述べたとおり静的な内部摩擦と粒子の非弾性衝突によるものとした。

この場合流れの応力は、粒子間の接触に起因する静的な応力と粒子の衝突に起因する動的な応力の和で表示され、

$$P = P_s + P_d \quad \text{..... (1)}$$

$$\tau = \tau_s + \tau_d \quad \text{..... (2)}$$

$$\tau_s = P_s \tan \phi_s \quad \text{..... (3)}$$

$$\tau_d = P_d \tan \phi_d \quad \text{..... (4)}$$

$$P_d = f(c, e) \sigma D^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (5)$$

$$\tan \phi_d = (1 - e^2) / e^2 \quad (6)$$

のように表される²⁾。ここで、 P 、 τ はそれぞれ流れの圧力、剪断応力、 P_s 、 τ_s は、それぞれ粒子の接触に起因する静的な応力、 P_d 、 τ_d は、粒子の衝突に起因する粒子間の動的な圧力及び剪断応力であり、 c は濃度、 e は粒子の反発係数、 σ は粒子密度、 D は粒子径、 ϕ_s は静的内部摩擦角、 ϕ_d は粒子間の動的内部摩擦角である。ここで、系を閉じるためには、濃度の支配則が必要となるが想定している火砕流が密な非弾性衝突の卓越した流れであるため、濃度を一定として取り扱うことができる。 P_s と P_d による応力の分配を(1)式と同様の形式で

$$P = \alpha P + (1 - \alpha) \quad (7)$$

と定義する。ここで、 α は流れの圧力に対する静的圧力の比率係数であり、 αP は P_s 、 $(1 - \alpha) P$ は P_d である。一般に係数 α の値は、0.8 ~ 0.95程度の値をとることがわかっている³⁾。

3. 基礎方程式

鉛直軸を z 軸にとり、これに直行する平面を $x-y$ 平面として、流れの z 方向成分を無視し、 z 方向に積分して平均化すると、質量保存則及び運動方程式はそれぞれ、(8)式及び(9)、(10)式となる。

3. 1 質量保存則

$$\frac{\partial}{\partial t} (c h) + \frac{\partial}{\partial x} (c M) + \frac{\partial}{\partial y} (c N) = 0 \quad (8)$$

ここで、 c : 土砂の濃度 M : x 方向流量フラックス ($M = u_m h$)
 h : 流動深 N : y 方向流量フラックス ($N = v_m h$)

3. 2 運動方程式

x 方向

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial}{\partial x} (u_m M) + \beta \frac{\partial}{\partial y} (v_m M) \\ & = -g h \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{0x}}{\rho_t} \end{aligned} \quad (9)$$

y 方向

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N}{\partial t} + \beta \frac{\partial}{\partial x} (u_m N) + \beta \frac{\partial}{\partial y} (v_m N) \\ & = -g h \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{0y}}{\rho_t} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、

u_m : 平均流速の x 方向成分

v_m : 平均流速の y 方向成分

g : 重力加速度

H : 流動表面標高

β : 運動量補正係数 (=1.25)

ρ_t : 流れのみかけの密度 ($\rho_t = c \sigma$; σ : 粒子密度)

τ_{0x} : x 方向底面剪断応力

τ_{0y} : y 方向底面剪断応力

τ_{0x} 、 τ_{0y} は、粒子の接触による静的な剪断応力 (クーロン摩擦応力) と粒子間の非弾性衝突による動的応力の和によって表されるから、x 方向について示すとそれぞれの分力により (11) 式となる⁴⁾。

$$\begin{aligned} \tau_{0x} = & \tan \phi_s \alpha c \sigma g h \cdot \cos \theta_{MAX} u_m (u_m^2 + v_m^2)^{-1/2} \\ & + \frac{25}{48} \pi \sin^2 \alpha_i (1 - e^2) (c/c_0)^{1/3} D^2 \\ & \cdot u_m (u_m^2 + v_m^2)^{1/2} / h^2 \cdot \rho_t \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

ここで、

α_i : 粒子間衝突の衝突角 (=30度)

c_0 : 粒子が最も密になった場合の土砂体積濃度 (0.7 程度)

3. 3 停止条件

火砕流の停止は、クーロン摩擦応力によって支配されている。クーロン摩擦応力の大きさは、地盤面に働く垂直応力と摩擦係数の積で定義される。その方向は、流れの方向と逆方向となる。流動中は、クーロン摩擦応力を除く合力 (加速度項、圧力項、動的応力項の和) の大きさは、クーロン摩擦応力の大きさを上回っている。逆にいえば、クーロン摩擦応力を下回っているときに流れは停止している。なお、クーロン摩擦応力は、(12) 式で定義される。

$$\tau_s = \rho_t g h \tan \phi_s \cos \theta_{MAX} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 θ_{MAX} は地盤面に垂直な軸と鉛直軸とのなす角で、x 方向、y 方向の斜面勾配が与えられと (13) 式となる。

$$\theta_{MAX} = \tan^{-1} \left(\frac{1}{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2} \right) \dots\dots\dots (13)$$

6. おわりに

実際の火砕流は、その流れの場の条件によって流動を支配しているパラメータが異なっている。したがって、ここで示したようにそれぞれの流れの場に応じたモデルを作成して用いなければならない。しかしながらその一方で、これらのモデルは、理想的な（特徴的な）流れのみを説明するように作られているため、これらの支配している条件が異なる流れの場を通してシミュレーションするモデルは、まだ、検討できないでいる。検討するためには、それぞれの流れの場の特性をより詳細に把握する必要がある。また、これらの流れの遷移について理論的に考察を行う必要がある。現在、（財）砂防・地すべり技術センターでは、昨年度より「砂防シミュレーション研究会」を設置して、これらの問題点を含め、シミュレーションについての検討を行っている。

おわりに、研究会でご指導頂いている鳥取大学宮本邦明助教授他、委員各位に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 宮本邦明、鈴木宏、山下伸太郎：火砕流の流動モデルと流下・堆積範囲の予測に関する研究、水工学論文集、第36巻、1992.2、pp211-216
- 2) 宮本邦明：Newton流体を含む粒子流の流動機構に関する研究、立命館大学学位論文、1985
- 3) 江頭進治、芦田和男、矢島啓、高濱淳一郎：土石流の構成則に関する研究、京都大学防災研究所年報、第32号、B-2、1989、pp487-501
- 4) 寺田秀樹、工藤賢二、下村博之、中村良光、北原一平、中島達也、山口直樹：岩屑流のシミュレーション手法の検討、平成5年度砂防学会研究発表会概要集、1993、pp329-332