

## P.14 火山砂防シミュレーション—モデルとその応用範囲—

(財) 砂防・地すべり技術センター ○本田 健

(財) 砂防・地すべり技術センター 黒川興及

(財) 砂防・地すべり技術センター 高濱淳一郎

### 1. はじめに

現在まで(財) 砂防・地すべり技術センターでは火山地域における土砂移動現象に関するシミュレーションプログラムを開発し、砂防計画や施設配置計画・設計および避難・防災計画における有力な手段として使用してきている。シミュレーションの実施にあたっては、流動形態、現象把握、各種パラメータの設定といった適用条件に注意を要し、さらに現状の問題点を踏まえて今後のプログラムの改良、開発を行っていく必要がある。

ここでは、砂防センターで開発した火山砂防関連の各シミュレーションのモデルを紹介し、その特性、課題、及び今後開発すべき項目について述べる。

### 2. 火砕流のモデル<sup>1)</sup>について

火砕流は高温の火山ガスと火山灰、火山岩塊などが一体となって山腹を高速で流下する現象である。一般に火砕流と呼ばれている現象は、噴火形態、噴火規模、噴出物の組成等により、その形態は様々であるが、これらの現象は、基本的には、流れの内部機構と流れを維持させるのに要するエネルギーの供給のされ方の違いによって分類することができる。

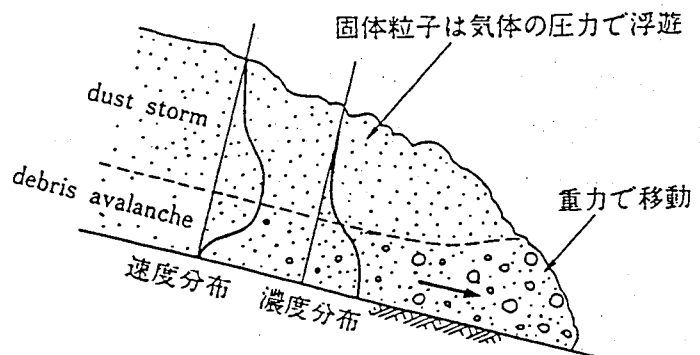


図-1 火砕流の模式図

流れの内部機構については、固体粒子のみからなる流れ(固相流、いわゆる粒子流)、気体と固体粒子とからなる流れ(固・気混相流)に分けられ、それはさらに層流と乱流とに分けられる。ただし、一般には、固相流であれば、流れは層流として取り扱われることが多く、固・気混相流では乱流として取り扱われることが多い。エネルギーの供給のされ方については、いずれの場合も重力の存在が流れを維持しているものの、直接の要因としては、重力そのもの場合(位置エネルギーの勾配)と圧力勾配の場合の2通りに分けることができる。無論、個々の火砕流が、ここで分類したいずれかの類型にあてはまるということではなく、いくつかの現象の組み合わせとして理解されるべきであろう。また、火砕物からの気体の放出、あるいは侵食に伴う水の蒸発、気体の膨張による気体相の内部わきだしに起因する深さ方向の圧力勾配の生成も流動機構を説明するうえで無視しえない要因の一つといえる。

シミュレーションでは流れを維持している主な要因が重力である場合、すなわち急勾配斜面を想定している。これは、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をおき、急勾配斜面での挙動を評価することを主たる目的としていることを意味する。

急勾配斜面で重力が卓越する場合、火砕流は図-1に示すような構造をしていると考えられる。すなわち、流れの底部での粗い粒子からなる重力流動層(下層)と、その上部の微細粒子と気体とによって構成され

ている固・気混相流（上層）からなる。上層に含まれる微細粒子は下層の表面と上層の気体との間のせん断により生じた気体の乱れによって浮遊させられており、上層の運動は下層の流動に支配されている。

以上から、下層は火砕流の本体といえるものであって、その挙動を知ることは火砕流のメカニズムを知る上で最も基本的な事項である。そこで、シミュレーションでは下層のみを対象としたモデルを用いている。急勾配斜面の場合、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、流動を規定しているせん断抵抗としては粒子間摩擦が支配しているような流れとなる。そして、せん断力、圧力とも速度勾配の2乗に比例する濃度の関数となり、土砂濃度は流れのエネルギー勾配の関数として表される<sup>2)</sup>。この場合、火砕流の下層の流下堆積範囲は粒子濃度に規定される。粒子濃度は勾配の変化に影響され、勾配が粒子間の摩擦係数の約1/2より小さくなる地点で堆積が急速に生じる<sup>3)</sup>。

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、粒子間の固体摩擦は、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<sup>4)</sup>。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するには、新たなシミュレーションモデルが必要であり、現在検討中である<sup>5)</sup>。

### 3. 溶岩流のモデル<sup>6)</sup>について

火口から噴出した溶岩流は、温度が低くなるにつれて溶岩流の厚みが増加し、流加速度が減少し停止する。溶岩が温度の低下とともに停止することは、せん断降伏応力を有する流体であると同時に、せん断降伏応力が温度に強く依存することを示している。また、溶岩の厚みが増大し、速度が減少するのは、溶岩の流動性も温度に強く依存することを示している。さらに、溶岩の流動性は溶解ガスの量と岩質の結晶度にも依存し、しかも流れの内部構造の変化からせん断応力とひずみ速度の関係は一義的には決まらず、いわゆるヒステリシスを有することも指摘されている。

このように、溶岩流のレオロジー特性は多くの要因に支配され複雑な性状を有しているが、溶岩流を記述するための最も単純なレオロジーモデルとしてせん断降伏応力と塑性粘度を持つビンガム流体モデルを用いている。モデルではせん断降伏力、塑性粘度とも温度の関数として表される。また、それらのレオロジー定数の温度依存性は温度の指数関数で与えられ、溶岩の温度が下がるとせん断抵抗が増加する。流動中の溶岩の温度変化は大気中への熱放射（ステファン・ボルツマンの放射冷却）を仮定した熱収支則より計算している。

対象とする溶岩流のプラグフローが発達しにくく、流動化している溶岩の部分で有効に熱が交換されれば、溶岩の冷却がステファン・ボルツマンの放射冷却に従うため、本モデルの妥当性が得られる。一方、プラグフローが発達し、厚いプラグに阻まれて冷却がプラグの中の熱伝導に支配されるような場合は、計算における溶岩の冷却の進行が過度になるため、計算による到達距離が過小になる傾向を持つ。このような場合は、溶岩の温度が保存されるとして計算を行うなどの方法が考えられるが、溶岩の冷却過程を考慮したシミュレーションモデルの開発も課題として挙げられる。

### 4. 泥流のモデル<sup>7)</sup>について

火山泥流には、火山噴火そのものが誘因となって発生する泥流と火山噴出物の堆積物が降雨等の他の誘因で発生する泥流とに分けることができる。前者には噴火・爆発時の山体崩壊あるいは火砕流に河川等から大量の水が供給されることにより泥流化する場合、火口湖の決壊あるいは湖水のオーバーフローによる急激な給水で火山噴出物と混合し、さらにその堆積層が侵食されることにより泥流化する場合、高温の火

山噴出物が積雪・氷河を融解して泥流となる場合がある。後者の場合、主に降雨による泥流と、火砕流等の堆積層（特に天然ダム）の流動化（天然ダムの決壊）による泥流とに分けられる。両者の規模については過去の実績から火山噴火に伴い発生した場合の泥流の規模が降雨等の誘因で発生した場合に比べてはるかに大きいことがわかっている。

これらの火山泥流は、固体粒子である土砂を高濃度を含み、土砂（固相）と水（液相）が一体となって流下する現象という共通の特徴を持っており、そういう点から固・液混相流としての取り扱いが可能である。高濃度固・液混相流としての火山泥流は、条件によって図-2のようなレオロジー的な性質を示す。

降雨により発生する泥流程度の流れの規模であると、流動は①に示すダイラタント流体としての挙動を示すことが多く、まれに泥流の規模が小さく微細粒子を多く含むような場合は②に示すビンガム流体の挙動を示す。なお、①は次章で説明する土石流のモデルが対象としている現象である。一方、火山の噴火に伴い

#### ○流量が少ない場合

- ① 礫の含有率が大きく礫の運動に着目すると層流である流れ  
(せん断降伏値をもつダイラタント流体)
- ② 礫の含有率が小さく泥水のような流れ  
(ビンガム流体)

#### ○流量が多い場合

- ③ 乱流

図-2 火山泥流のレオロジー

発生するような泥流では、その規模が大きくマニング則が現象をよく説明し、図中の③に示す乱流として性質をもっているようである。砂防センターにおける泥流のシミュレーションはこの③に示す乱流を対象として作成されたものであり、マニング則を用いてモデル化している。火山泥流のシミュレーションを実施するにあたっては対象とする現象が図中のどのタイプに相当するかをあらかじめ検討する必要がある。

また、流れがビンガム流体の挙動を示すような場合については、前章で説明したビンガム流体モデルである溶岩流のシミュレーションプログラムを適用することによる現象の説明が可能である。

### 5. 土石流のモデル<sup>2)</sup>について

モデルでは土石流を固体粒子と水からなる固液混相流とみなし、礫の含有率が大きく、礫の運動に着目すると層流であるような流れ（すなわち図-2の①を対象）として定義している。この場合、せん断力は降伏応力と粒径、速度勾配の2乗に比例するせん断力によって与えられる。前者は粒子間摩擦に起因するせん断力で、後者は粒子の非弾性衝突、及び間隙流体の乱れに起因するせん断力である。

図-3に示す砂礫移動層と水流層からなる流れ、いわゆる集合流動、掃流砂と呼ばれる流れについても、砂

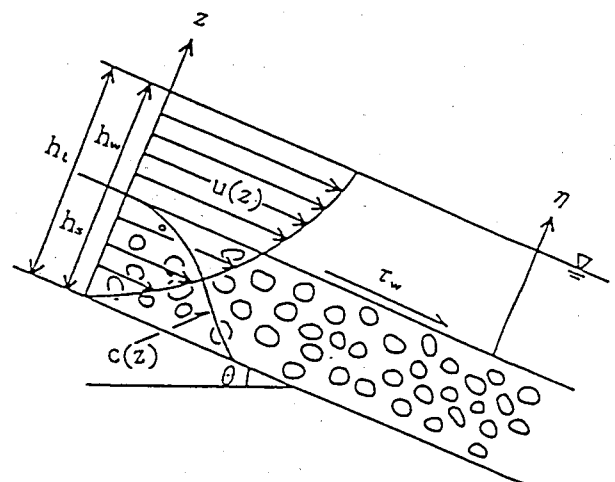


図-3 本モデルにおける土石流の模式図

礫層については土石流と本質的に変わらないものと考え、土石流と同じ構成則を用いている。水流層についてはプラントルの運動量輸送理論に従うものとして抵抗則を与えている。この場合、全流動深に対する砂礫層の比は河床面における外力と降伏応力の釣り合いによって規定され、勾配の関数として与えられ

る。砂礫層の体積濃度は砂礫の停止堆積濃度の1/2で与えており、砂礫層と水流層とのinterfaceが水面まで達した状態（いわゆる土石流状態）では河床面における外力と降伏応力との釣り合いから濃度が規定される。以上のようにこのモデルは、土石流から掃流砂までを力学的に統一した形で連続的に評価しており、図-3は本モデルにおける土石流の模式図と言えよう。本モデルにおける流砂量は「速度×砂礫の体積濃度」の積分値として理論的に与えられ、流砂量関数としてみた場合、水路実験と比較して概ね適合している。また、堆積範囲についても実用上の精度は得られているようである。しかしながら、砂礫移動層と水流層との境界近傍の乱れの評価に研究の余地が残されており、このため、水路実験と比較すると緩勾配（約3度以下）で抵抗が過大となり、堆積域での流下時間が過大になる傾向がある。現在、この点に関して検討を行っているところである。

## 6. おわりに

火山砂防関連の各シミュレーションについてそのモデルの説明を行い、その特性、課題、及び今後開発すべき項目について述べた。現在、モデルそのものに改良の余地が残されている一方、これまでの2次元の計算例で、シミュレーションにおける流下速度が計算メッシュの取り方によっては実績に比べやや遅いという現象がみられた。この点については現在、差分の取り方を変えることで流下速度の改善を検討しているところである<sup>9)</sup>。また、これらの課題の他にシミュレーション実施にあたっての入力条件の設定方法（規模、ハイドログラフ等）についても検討していく必要がある。

このように、火山砂防関連のシミュレーションは様々な課題を抱えている。（財）砂防・地すべり技術センターでは「砂防シミュレーション研究会」を設けて、これらの技術開発に昨年度より着手した。

おわりに研究会でご指導いただ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、pp. 211-216、1992. 2
- 2) 金谷健一：粒状体の流動の基礎理論（第2報、発達した流れ）、日本機化学会論文集（B編）、45巻、392号、pp. 515-522、1979
- 3) 山田孝、宮本邦明、水山高久：“火砕流の流動メカニズムとシミュレーション”新砂防Vol. 44、No. 3(176)、pp. 20-27、1991
- 4) 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
- 5) 中島達也、高濱淳一郎：“乾燥粒子流の数値シミュレーション”、平成7年度砂防学会研究発表会概要集
- 6) 山下伸太郎、宮本邦明、大原正則、緒統英章、水山高久：“溶岩流の数値シミュレーション”、第34回水理講演会論文集、pp. 391 - 396、1990
- 7) 宮本邦明、鈴木宏、山下伸太郎、水山高久：十勝岳大正15年（1926年）泥流の再現計算、第33回水理講演会論文集、pp. 361-365、1989
- 8) 高濱淳一郎、宮本邦明：急勾配水路における高濃度流れの抵抗則と流砂量について、平成4年度砂防学会研究発表会概要集pp. 66-69
- 9) 小野寺勝、高濱淳一郎：“泥流シミュレーションの適用法に関する研究”、平成7年度砂防学会研究発表会概要集