

## 35 雲仙岳で発生した火砕流の堆積実態とシミュレーション計算との比較

建設省土木研究所 ○山田 孝、石川芳治、矢島重美  
（株）八千代エンジニアリング 井戸清雄

### 1. はじめに

火砕流による災害を防止するための対策及びハート対策の検討資料として、火砕流の流下・堆積区域を高い精度で予測できる災害予想区域図を作成することが極めて重要である。

火砕流に関するハートマップについては、インドネシア、フィリピン、中南米諸国等において、過去の噴火活動の実績に基づき経験的に描かれたおおまかなものが存在するが、雲仙岳やピナトボ火山のように火山地域では噴火にともなって時々刻々と土砂の生産・流下・堆積場の地形が大幅に変化する。そのため、このような時間的な地形変化の概念を含まないハートマップでは必ずしも十分に対応できない場合がある。

緊急かつ効果的な火砕流対策の検討や適切な警戒避難を行ううえでは、火山地域における地形変化に基づいて火砕流の流下・堆積プロセスや流下時間、堆積深等を表わすことができる精度の高い災害予想区域図が不可欠である。このような災害予想区域図の作成には、力学モデルに基づいた火砕流の流下・堆積シミュレーション手法が重要となるが、その適用手法は火砕流の特徴により異なるものと考えられる。

本調査では、1991年6月3日、6月8日に雲仙岳水無川流域に大きな被害をもたらした火砕流について、航空写真測量から把握した土砂の堆積実態と平成2年度に開発した火砕流のシミュレーション計算手法に基づいて再現された堆積範囲、堆積量との比較を行い、現段階におけるシミュレーション計算手法の適用手法について検討した。なお、ここでいう火砕流とは粒子流としての挙動を示す本体部を意味する。

### 2. 1991年6月3日、6月8日に発生した火砕流の堆積実態

1991年5月26日、6月3日、6月8日の火砕流発生後の5月28日、6月4日、6月16日に撮影した空中写真を用いて、その流下・堆積範囲を把握するとともに水無川流域の火砕流堆積地区を川沿いに100m間隔で空中横断測量を行い、各縦横断線毎に横断図を作成して各撮影期間毎の土砂堆積量を求めた。

6月3日の火砕流は、火口から約3.6km程流下しているのに対し、6月8日の火砕流はより規模が大きく水無川流路工を土砂で埋塞し、火口より約5.5km下流の国道57号付近まで達した。6月3日及び6月8日の火砕流の堆積土砂量は各々250万 $m^3$ 、350万 $m^3$ と推定される<sup>1)</sup>。

6月3日、6月8日の火砕流の堆積範囲ならびに代表的な箇所での横断図を図-1に示す。火口より約1.5km下流のところでは、主として6月3日の火砕流によって最大30mほど谷が埋没しているが、火口より約3.3km下流の堆積物先端付近では土砂堆積厚5mと比較的薄い。それに対して6月8日の火砕流では、火口より約1.5km下流のところでは約10mとそれほど厚くはないが、火口より3.3km下流では約20m~30m程堆積している。

このようなことから、6月3日の火砕流は上流域(火口から約1.5km)での堆積傾向が強く、6月8日の火砕流は中流域(火口から2.0~3.5km)での堆積傾向が強いことがわかる。

### 3. シミュレーション計算方法

火砕流の本体部のシミュレーション計算手法については、既に平成2年度の砂防学会において山下、宮本、水山らが発表したものと同じ手法を用いているので、ここでは具体的な説明は省略する。基本的な考え

方は下記のとおりである。

火砕流の本体部を構成する溶岩塊等の固体粒子は、雲仙岳で夜間に撮影された火砕流のVTRや写真からもわかるように、流れの中で互いに衝突しながら流下していく(図-2)。固体粒子の衝突によって圧力を生じるとともに粒子間の固体摩擦、粒子の非弾性的な性質によりせん断力を生じる。圧力とせん断力は流れの強さの関数として表現され、圧力が流れの強さにより変化するため粒子濃度も流れの状態により変化し、流れ全体としては圧縮性を示す。したがって、現象を記述するための基礎方程式として①質量保存則、②運動量保存則、③状態方程式、④エネルギー保存則が必要となるが、これらの方程式は解析的に解くことができない。そこで、火砕流の流れを非圧縮性と仮定して、支配方程式を流れの体積に関する保存則と粒子に対する保存則とに分けて考える。ついで、非圧縮流体としての流れの体積(空間)の保存則、その空間に占める粒子の濃度に関する方程式、および空間と粒子からなる流れに関する運動方程式に書き換え、スタガードスキームを用いた差分法に基づいて数値計算を行う。

#### 4. シミュレーション計算による雲仙普賢岳の火砕流の再現

##### 4.1 計算条件

シミュレーション計算に用いた範囲は、水無川の河口から本川沿いに地獄跡火口までの区間(3.5km×8.3km)であり、この区間を国土地理院が被災後に作成した地形図をもとに、50×50mにメッシュ分割してデータ化した。シミュレーション計算は、流下土砂量、流量、流砂量、粒子の固体摩擦係数、代表粒径、流量波形をパラメータとし、12ケースを行った。

流下土砂量については、これまでの調査<sup>1)</sup>から6月3日の火砕流が約250万 $\text{m}^3$ 、6月8日の火砕流が約350万 $\text{m}^3$ と解析されているが、5月28日から6月3日までの土砂量を6月3日火砕流、6月4日から6月16日までの土砂量を6月8日火砕流とした方が航空写真から解析した実際の堆積土砂量の分布と比較できるので、8ケースについては各々3,500万 $\text{m}^3$ 、4,200万 $\text{m}^3$ の土砂を対象とした。流砂量は、ケース1~4について火砕流の継続時間を10分、堆積土砂濃度を0.6とすると、6月3日の火砕流が2,500 $\text{m}^3/\text{sec}$ 、6月8日の火砕流が3,500 $\text{m}^3/\text{sec}$ となる。流量は、火砕流発生時の土砂濃度を40%とすると各々6,250、8,750 $\text{m}^3/\text{sec}$ となる。土砂量を変えたケース5~12についても、このようにして算出された流量、流砂量を用いた。粒子の固体摩擦係数 $\mu$ は、これまで他の火山において計算された事例( $\mu=0.2\sim 0.5$ 程度)を参考にして、0.36、0.30、0.20の3種類とした。また、運動方程式の抵抗項に含まれる代表粒径は、10cmと5cmの2種類とした。さらに、流量波形については土砂量を固定し、継続時間を変化させることにより2種類のパルスを与えた。変化させたパラメータを表1に示す。

##### 4.2 計算結果と考察

###### ① 代表粒径

代表粒径を10cmから5cmに変えても堆積範囲や土砂量分布はさほど変わらないため、粒径がこれらに及ぼす影響は小さいものと思われる。

###### ② 固体摩擦係数

6月3日の火砕流について $\mu=0.20$ を用いると土砂堆積範囲はほぼ実績と一致する(図-3)。但し、 $\mu=0.20$ の場合、上流部での堆積量は実績よりもかなり少なく、下流部では実績の8倍近く土砂が堆積する結果となった(図-4)。 $\mu$ が0.36の場合は、堆積土砂量の分布は比較の実績とあうが、0.30にすると下流により多く流出する傾向がある。

6月8日の火砕流について、 $\mu=0.36$ を用いると実績よりも流下距離が短めとなり、 $\mu$ が $0.30, 0.20$ の場合において主要な堆積域は実績とほぼ一致する(図-5)。堆積土砂量の分布については、 $\mu=0.36$ の場合、上流域にかなり堆積する。 $\mu=0.30$ の場合、中流域での堆積傾向が強くなり、 $\mu=0.20$ とすると下流域にほとんどの土砂が堆積する結果となる(図-6)。

このようなことから、堆積範囲については $\mu$ を $0.3\sim 0.2$ 程度とすれば、雲仙岳の火砕流の場合、比較の実績に近くなることがわかる。

### ③ 流量 (流砂量)

土砂量を変えずに流量(流砂量)を2倍にしても堆積範囲ならびに堆積土砂量分布に関してほとんど大差がないため、流出土砂量の総量が同じであれば堆積範囲や土砂量分布に流量、流砂量が及ぼす影響はそれほど大きくないことがわかる。

## 5. まとめ

以上の結果から、火砕流の堆積範囲、堆積土砂量の分布等に影響を与えるパラメータとして今回検討したもののなかで、最も影響度が大きいものは粒子間の固体摩擦係数( $\mu$ )ということになる。

火砕流の堆積範囲の近似度では $\mu=0.20$ の場合が最も良好であったが、堆積土砂量の分布という面では下流部への土砂流出量が実績値より大きく、 $\mu=0.36$ の場合の方が近い値を示した。ちなみに6月3日の火砕流では $\mu=0.5$ 、6月8日の火砕流では $\mu=0.25$ とすると、堆積土砂量の分布が実績に最も近くなる。

固体摩擦係数は、土砂量、構成材料、温度、流量、土砂濃度等の条件によって変化すると考えられるため、今後、固体摩擦係数を一定値でなくそれらの関数として表わす必要があるだろう。但し、堆積範囲については固体摩擦係数 $\mu$ を適当に選ぶことによって、かなりの精度で予測することができる。この場合は、過去のいくつかの堆積事例から固体摩擦係数 $\mu$ を逆算して求め、 $\mu$ のとりうる領域を決めて数値シミュレーション計算を行うことになる。堆積事例が多い場合は、統計的手法により $\mu$ の値の領域をよりよく決めることができるものと思われる。

## 6. おわりに

これまで雲仙岳で発生した代表的な火砕流である6月3日ならびに6月8日のものについて、既に関連した火砕流本体部のシミュレーション手法を用いて実績と計算結果との比較を行った結果、粒子間の固体摩擦係数が最も堆積範囲等に影響を及ぼす因子であることがわかった。しかしながら、堆積範囲を再現できても堆積量の分布は必ずしも合わないため、今後は固体摩擦係数を変数としてとり扱うモデルを開発していくことが必要となる。また、火砕流熱風部の力学モデルを作成し、流下堆積範囲等を精度良くシミュレートできる手法の開発も重要である。

## 参考文献

- 1)池谷浩・石川芳治(1991)：平成3年雲仙岳で発生した火砕流,土石流災害,砂防学会誌「新砂防」, Vol.44, No.2, pp46-56

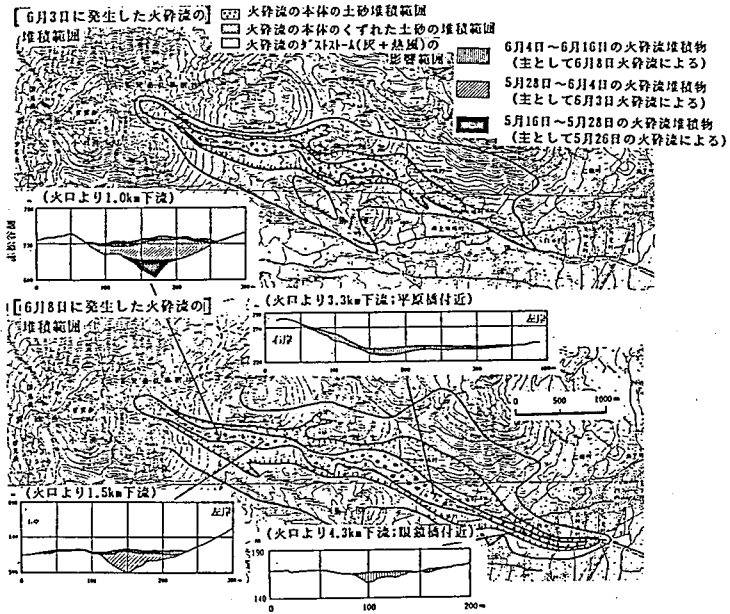


図-1 6月3日・6月8日の火砕流堆積範囲 代表的な個所での横断面

表-1 変化させたパラメータ

項目	用いた値
代表粒径	5 cm 10 cm
固体摩擦係数	0.20 0.30 0.36
流量 (流砂量)	6月3日 ① 6250m <sup>3</sup> /sec (2500m <sup>3</sup> /sec) ② 12500m <sup>3</sup> /sec (5000m <sup>3</sup> /sec)
	6月8日 ① 8750m <sup>3</sup> /sec (3500m <sup>3</sup> /sec) ② 17500m <sup>3</sup> /sec (7000m <sup>3</sup> /sec)

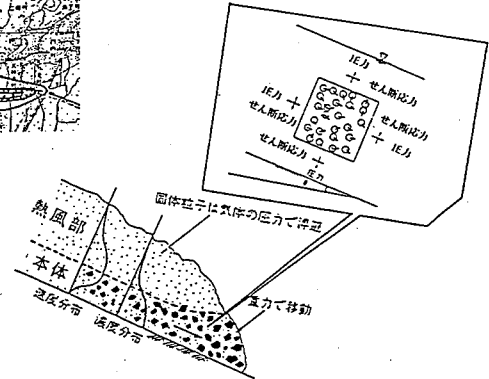


図-2 火砕流の流動モデル

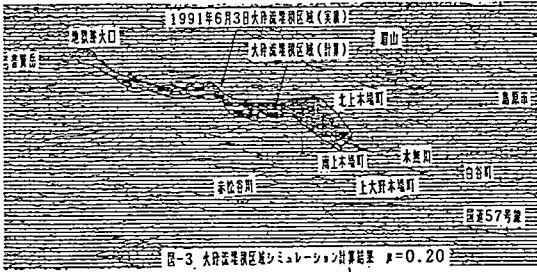


図-3 大砕流堆積区域シミュレーション計算結果  $\mu=0.20$

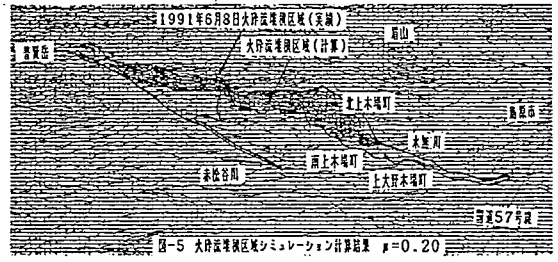


図-4 大砕流堆積区域シミュレーション計算結果  $\mu=0.20$

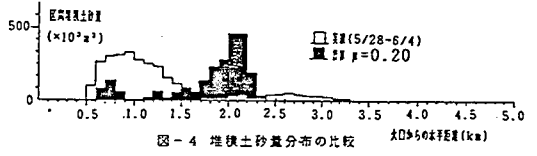


図-5 堆積土砂量分布の比較

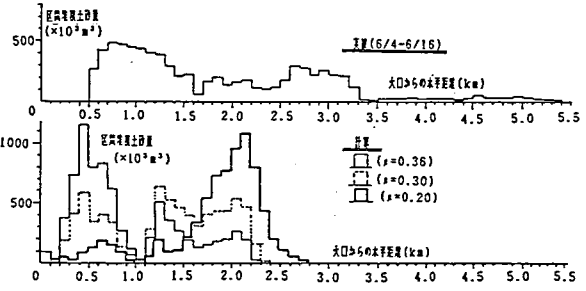


図-6 堆積土砂量分布の比較