

鳥取大学工学部 道上 正規  
 鳥取大学地域共同研究センター 宮本 邦明  
 鳥取大学大学院 ○福住 真仁  
 (財) 砂防・地すべり技術センター 瀬尾 克美  
 (財) 砂防・地すべり技術センター 嶋 大尚

1. はじめに

1792 年長崎県島原半島の眉山崩壊に伴い発生した『島原大変肥後迷惑』と呼ばれている災害について、従来より多くの研究が行われている。特に“津波”を研究の対象としているものが多く、一連の災害の初期段階を支配している眉山崩壊そのものについて行われた研究はほとんどない。本研究は、これまであまり積極的に取り上げられてこなかった“眉山崩壊”に焦点を当てて、その崩壊土塊の運動過程について昨年度の一次元計算<sup>1)</sup>を二次元に拡張して行ったものである。

2. 2次元支配方程式

崩壊し滑動する土塊は、形状は変化するもののその体積は保存される。したがって、その運動は侵食も堆積もしない固定床上の流れとして表現することができる。このとき 2 次元支配方程式は表 1 のように示される。式中の  $\bar{\tau}_0 = (\tau_{0x}, \tau_{0y})$  は、江頭・宮本<sup>2)</sup>の構成則に従うと、流速の関数で表される動的応力  $\bar{\tau}_{0d}$  と流速には関係ない静的応力  $\bar{\tau}_{0s}$  の和で表される。

$\bar{\tau}_{0s}$  は土塊が運動中か停止中かでその評価が表 2 に示すように異なる。差分はリープフロッグ法を用いているが、一般に崩壊土塊の運動の停止は刻み時間  $\Delta t$  内に生じるため、運動が停止するときは、静的応力の評価式を刻み時間  $\Delta t$  内で変える必要がある。そのため、運動の停止を判断する停止条件を導入しなければならない。運動方程式を時間差分すると

$$\vec{M}^{n+1} = \vec{M}^n - [(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{M}^n + gh\nabla H + \bar{\tau}_{0d}]\Delta t - \bar{\tau}_{0s}\Delta t$$

となる。運動が停止する場合、それは刻み時間  $\Delta t$  の間に生じるため、

$$\vec{M}'|\Delta t' = [\vec{M}^n - (\vec{u} \cdot \nabla)\vec{M}^n + gh\nabla H + \bar{\tau}_{0d}]\Delta t' - \bar{\tau}_{0s}\Delta t'$$

$$\equiv \vec{M}'(\Delta t') - \bar{\tau}_{0s}\Delta t' = \vec{0} \quad (\text{ただし } 0 < \Delta t' < \Delta t) \quad \text{となる}$$

$\Delta t'$  が存在する。そこで近似として、 $|\vec{M}'(\Delta t')| - |\bar{\tau}_{0s}\Delta t'| = \vec{0}$  の実根  $\Delta t'$  が  $0 < \Delta t' < \Delta t$  にあることを停止条件として用いる。

3. 眉山崩壊の 2 次元数値シミュレーション

表 2 の  $\alpha$  は  $\sigma/\rho = 2.5$  程度の固相に砂礫を用いた通常の固液混相流では  $\alpha \approx 0.9$  であることが分かっている<sup>2)</sup>。そこで、まず  $\alpha = 0.9$  として、内部摩擦角  $\phi = 30^\circ \sim 35^\circ$ 、粒径  $d = 0.5 \sim 5\text{m}$ 、流体の密度  $\rho = 1.0 \sim 1.68$ 、砂礫の密度  $\sigma = 2.5 \sim 2.7$ 、粒子濃度  $c = 0.4 \sim 0.6$  の範囲で計算を行いこれらのパラメーターの違いによる土塊の最終の堆積形状の違いにつ

表 1 2次元支配方程式

運動方程式 (運動量保存則)	
x 方向の運動方程式	$\frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial uM}{\partial x} + \beta \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{0x}}{\rho_T}$
y 方向の運動方程式	$\frac{\partial N}{\partial t} + \beta \frac{\partial uN}{\partial x} + \beta \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{0y}}{\rho_T}$
連続式 (質量保存則) $\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$	
ここに、 $M = uh$ 、 $N = vh$ 、 $H = h + z_b$ 、 $u$ 、 $v$ : x 及び y 方向の平均流速、 $h$ : 流動深、 $\tau_{0x}$ 、 $\tau_{0y}$ : x 及び y 方向の抵抗力、 $g$ : 重力加速度、 $\beta$ : 運動量補正係数、 $\rho_T$ : 流動層全体の密度である。 $\rho_T$ : 流動層全体の密度、(乾燥時 $\rho_T = c\sigma$ 、飽和時 $\rho_T = c\sigma + (1-c)\rho$ )、 $c$ : 砂礫移動層の土砂濃度、 $\rho$ : 間隙流体の密度である。	

表 2 運動状態による固体摩擦力の変化

	$\bar{\tau}_{0s}$
流動中	作用方向は流れの方向とは逆方向 $ \bar{\tau}_{0s}  = \alpha(\sigma - \rho)cgh \cos \theta \tan \phi$
停止中	静的なつり合いを保つ $\bar{\tau}_{0s} = -\rho_T gh \nabla H - \beta \rho_T (\vec{u} \cdot \nabla)\vec{M}$ $ \bar{\tau}_{0s(\text{max})}  = (\sigma - \rho)cgh \cos \theta \tan \phi_s$

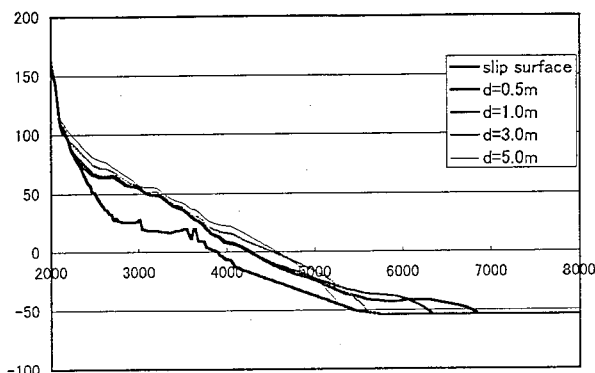


図1 粒径別断面図

いて検討した。内部摩擦角  $\phi=30^\circ$ 、流体の密度  $\rho=1.68(\text{g/cm}^3)$ 、砂礫の密度  $\sigma=2.5(\text{g/cm}^3)$ 、粒子濃度  $c=0.4$  として粒径を変化させた場合の断面を図1に示す。粒径が小さくなるほど土塊に厚みがなくなり、それに伴って到達距離も伸びることが示されている。また、粒径を一定として各物性値を変化させた場合は、 $\phi$ が小さいほど、 $\rho$ が大きくなるほど、 $c$ が小さいほど、到達距離は大きくなり堆積範囲が広がる傾向にある。図2は、その一例として  $\rho$ を変化させた場合の計算結果の比較を示している。 $\rho$ 以外の条件は、 $d=3.0\text{ m}$ 、 $\phi$ 、 $\sigma$ 、 $c$ は図1と同一である。なお土塊が海域へ突入するときの速度はいずれのケースの30~70m/sec程度で $d$ 、 $\phi$ 、 $\sigma$ 、 $c$ が小さいほど、 $\rho$ が大きいくほどその速度は大きくなる。

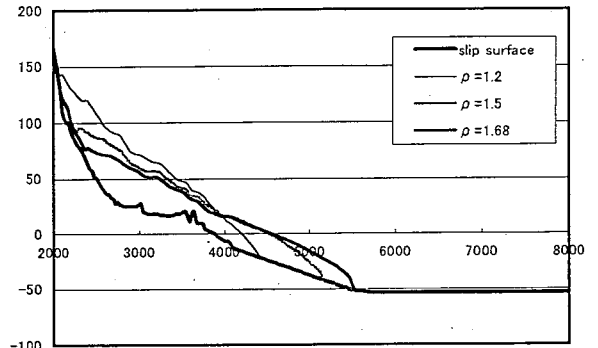


図2 流体の密度別断面図

#### 4. 現在の地形との比較・検討

$\alpha=0.9$ とした計算では、陸地部分に多くの土塊が残り、現在の地形のと大きく異なる形状となった。Hsü<sup>3)</sup>が示したように、崩壊の規模が大きくなると摩擦係数が小さくなることが知られているが、眉山の場合も現状に近い計算結果を得るためには $\tau_0$ を小さくする必要がある。そこで $\alpha$ を変えて計算を行った。計算条件は図1、2の $d=3.0\text{ m}$ のケースと同じである。図3、4は $\alpha$ を0.18とした場合の結果を $\alpha=0.9$ の場合と比較して示している。 $\alpha$ を通常の1/5程度まで小さくすると、現在の地形とほぼ一致する。さらに、図3中の破線内の堆積土砂量が1.3億 $\text{m}^3$ となり、海域での推定堆積土砂量(1.5億 $\text{m}^3$ )ともほぼ一致する。

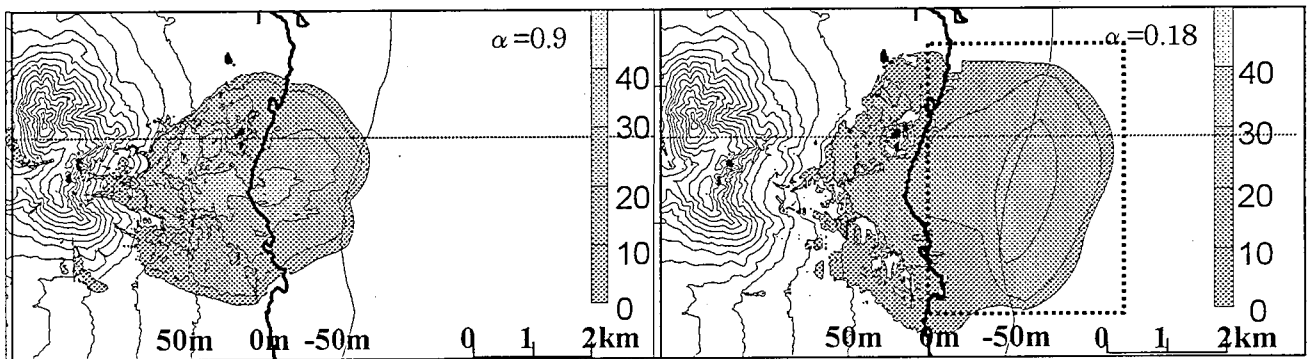


図3 最終堆積形状

#### 5. おわりに

本研究は、眉山崩壊の2次元数値解析を行ったものである。土塊の停止堆積勾配、堆積厚と、土塊の物性( $\phi, \sigma, \rho, d, c$ )との関係を明らかにした。また、眉山崩壊土塊の停止堆積を再現するには、静的応力(固体摩擦)を通常の1/5程度まで小さく見積もる必要があることを示した。なお、本研究の一部は、文部省科学研究費の補助を受け行われたものである。計算にあたっては、一部、鳥取大学地域共同研究センターの設備を利用した。記して感謝の意を表したい。

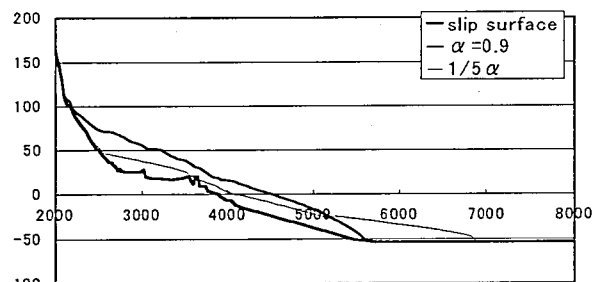


図4 最終堆積形状

#### 参考文献

- 1)道上正規、宮本邦明、檜谷治、植村慎(1998)：1792年眉山崩壊時の土塊の運動と津波形成の数値シミュレーション、土木学会中国支部第研究発表会発表概要集, vol. 50, pp.149-150
- 2)江頭進治、宮本邦明、伊藤隆郭(1997)：掃流砂量に関する力学的解釈、水工学論文集, vol. 41, pp.789-800
- 3)Hsü K.J.(1975): Catastrophic debris streams (Sturzstroms) generated by rockfalls, Geo. Soc. Of America Bull., vol.86, pp129-140