## 1999 年ベネズエラ国 洪水・土砂災害における土砂流出のシミュレーション

立命館大学大学院 学生員 ○ 伊藤隆郭\* 立命館大学理工学部 正会員 江頭進治\*

1. はじめに 1999年12月中旬に、ベネズエラ国 Vargas 州の海岸山脈(コスタ山脈)のカリブ海側に面する北側斜面 において、山腹崩壊・土石流が多発し、甚大な災害が引き起こされた<sup>1)</sup>. 現地に適したハードおよびソフト対策のため の有効な情報を得ること、および日本における土砂災害に対する有用な情報を得ることを目的として、当該災害を対 象として土砂流出シミュレーションを行うとともに、その結果に基づいて流域の違いに着目した土砂流出について検討 する.

2. **支配方程式および計算条件** 土石流の流動・堆積過程における土砂流出のシミュレーションにおいては,通常, 流れに関する質量・運動量保存則および河床位方程式が用いられる.ここでは,江頭ら<sup>20</sup>のものを適用すると,次式の ようである.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial BM}{\partial x} = \frac{E}{c_*} \quad (1), \quad \frac{\partial \overline{c}h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial \gamma B \overline{c}M}{\partial x} = E \quad (2), \quad \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial \beta \overline{u}M}{\partial x} = gh\sin\theta - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\tau_b}{\rho_m} \quad (3)$$

 $\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{E}{c_* \cos \theta}$  (4) ここに、t:時間、x:流れ方向の座標、B:川幅、M:混合物の単位幅流量、 $\overline{u}$ :断面平

均流速, E:侵食速度,  $\bar{c}$ :砂粒子の断面平均体積濃度,  $c_*$ :静止堆積濃度, g:重力加速度,  $\theta$ :河床勾配,  $\rho_m$ : 混合物の密度, P:全圧力,  $\tau_b$ :河床せん断力,  $z_b$ :河床高さ,  $\gamma$  および $\beta$  はそれぞれ, 粒子濃度の鉛直分布に関 する形状係数および運動量補正係数である. なお, 侵食速度 E, 河床せん断力 $\tau_b$ , 形状係数 $\gamma$  および運動量補正 係数 $\beta$  は, 江頭ら<sup>2</sup>のものが適用されている.

計算の対象流域として Camuri Grande 流域 (43.1 km<sup>2</sup>) および San Julian 流域 (21.9 km<sup>2</sup>)を選ぶ. **表**-1 は, 扇頂部 より上流域における各支渓の流域面積である. **図**-1 は, 河口を原点として描いた各支渓の河道縦断形状の分布で ある. **表**-1 および **図**-1 から, 両流域において地形条件に着目すると, 流域面積には 1.5~2 倍程度, 河床勾配には 1.5 倍程度の違いがある. 次に, 計算条件について示す. 川幅は, 現地踏査に基づいて支渓 T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> および T<sub>3</sub> (San Julian 流域) においては, 河口から 5000mの区間で 40m, 同地点から計算の最上流端までの区間においては, 20mとしている. 同様に, 支渓 T<sub>4</sub>および T<sub>5</sub> (Camuri Grande 流域) においては, 河口から 7000m までを 40m, 同地点から最上流端までのと間においては, 20mとしている. 同様に, 支渓 T<sub>4</sub>および T<sub>5</sub> (Camuri Grande 流域) においては, 河口から 7000m までを 40m, 同地点から最上流端までを 20m としている. 各支渓における計算の最上流端の地点, およびその地点における流域面積は, それ ぞれ次のようである. T<sub>1</sub>:8210m, T<sub>2</sub>:7560m, T<sub>3</sub>:6140m, T<sub>4</sub>:8600m, T<sub>5</sub>:11700m, および T<sub>1</sub>:2.63km<sup>2</sup>, T<sub>2</sub>:1.42km<sup>2</sup>, T<sub>3</sub>:1.43km<sup>2</sup>, T<sub>4</sub>:5.98km<sup>2</sup>, T<sub>5</sub>:0.2km<sup>2</sup>. なお, 各支渓における計算の最上流端位置は, 飽和した非粘着材料が安定し て存在しうる条件を目安にして設定している. 支配方程式に含まれる物理パラメータは, 次のようである. 代表粒径 *d*=20 cm, 砂礫密度  $\sigma$ =2.65 g/cm<sup>3</sup>, 流体相の密度は水に微細砂が含まれていることを考慮して,  $\rho$ =1.33 g/cm<sup>3</sup>, 砂

礫の内部摩擦角 $\phi_s$ =34.0 (deg.),静止堆 積濃度  $c_*$ =0.52 である. 渓床堆積物の厚 さ $D_p$ は,現地踏査によるデータ<sup>1), 2)</sup>を参 考にして, $D_p$ =10.0 m としている. 各支 渓の最上流端からの給水量 $Q_p$ は合理 式を用いて,それぞれ次のように設定して いる. T<sub>1</sub>:21.9 m<sup>3</sup>/s, T<sub>2</sub>:11.8 m<sup>3</sup>/s, T<sub>3</sub>:11.9 m<sup>3</sup>/s, T<sub>4</sub>:49.8 m<sup>3</sup>/s, T<sub>5</sub>:1.9 m<sup>3</sup>/s. なお,降 雨強度 r およびピーク流出係数  $f_p$ は,そ れぞれ 50.0mm/hr および 0.6 としている<sup>2)</sup>. 計算は, Leap-frog 法を用いており,  $\Delta x$ =10 m,  $\Delta t$ =0.025 sec.としている.

<u>3. 扇頂部における流出土砂量</u> 表-2 は, San Julian および Camuri Grande 流域にお いて扇頂部に流出した土砂量を示したもの である. ちなみに, 土砂量は空隙を含めた

表-1 各支渓の扇頂部における流域面積



Key Words : sediment runoff, bed load, debris flow, numerical simulation

\* 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

FAX 077-561-2667

TEL. 077-561-2732

見かけの量である.各支渓における流出 土砂量は、1回の土石流によるものである. ところで、両流域においては崩壊が無数 に発生し、その殆どが流動化しており、そ れらの流下過程において渓床が侵食さ れていることが分かっている.これらによ る土砂流出もかなりの量であることが予測 される.そこで、両流域における土石流移 動経路以外について、1:25000の地形図 を基に1次谷を含む流路の総延長を略 算し、平均川幅を5m、平均侵食深を2m とすることによって、渓床侵食量を求めて いる.ここで、流域における総延長はそれ ぞれ、35 km 程度(San Julian)および、53 km 程度(Camuri Grande)である.さらに、

土砂流出は,土石流ばかりではなく,通常の出水に よってもかなり流出するものと推察される.ここでは, 便宜的に次のように求めている 2).2 日間雨量を 1000 mm として<sup>1)</sup>, 2 日間の平均雨量を見積もり, そ れに基づいて掃流砂として輸送される土砂量も算定 している. 同表によれば, Camuri Grande 流域にお ける土砂量は現地データと酷似しているが, San Julian 流域における土砂量は、現地データの半分程 度である.これについては、支渓において崩土が土 石流化することによって流下した土量や扇頂部に到 達した掃流砂量を詳細に調べることによって検討し なければならない.次に,河床勾配に着目して両流 域の流出土砂量についてみる. 図-2は, 両流域に おいて,扇頂部から上流端位置までの平均河床勾 配と扇頂部における比流出土砂量(流出土砂量/扇 頂部における流域面積 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>)の関係をみたもの である. 両流域の支渓の平均勾配には1.5倍程度の 違いがあり、比流砂量は勾配の大きい流域におい て大きくなっている.このように,扇頂部に流出する 土砂量が河床勾配の影響を受け,土砂流出の地域 性が現れている.

図-3 は、流域面積(km<sup>2</sup>)と比流出土砂量(流出 土砂量/流域面積 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>)の関係を示したものであ る.図には、比較のため日本において発生した土砂 災害のうち、特に顕著な災害であったものも幾つか 示している<sup>3)</sup>.因みに、比流砂量が1.0×10<sup>4</sup>であるこ とは、流域において平均1 cm の侵食があることに相 当している.図によれば、比流砂量が10<sup>4</sup>~10<sup>5</sup>のオ ーダーの範囲に殆どのデータが属している.流域面

表-2 流出土砂量

流域		San Julian			Camuri Grande	
	支渓	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	$T_4$	T <sub>5</sub>
土石流	砂礫 微細砂 計	40000 37500 77500	49600 46200 95800	18600 17500 36100	16000 130000 146000	5850 78000 83900
	小計	209000			230000	
支渓全体の 侵食量		350000			530000	
掃流砂量		56700			619000	
合計		616000			1380000	
現地データ <sup>1)</sup>		1610000			1260000	



積と比流砂量との関係から見れば、ベネズエラ国において発生した土砂災害は、日本において発生した既往の土砂 災害と非常に類似していることが分かる.すなわち、ベネズエラ土砂災害は、日本において今後起きうる土砂災害に 対して、非常に有用な情報を提供していることが分かる.

**4. おわりに** ベネズエラ土砂災害を対象として,土石流に関する土砂流出のシミュレーションを行った.流域面積や 比流出土砂量にに着目すると,日本の土砂災害と非常に類似した特性を有している. 今後,多くの土砂災害に関す るデータを収集し,土砂災害の地域性等について更に検討することによって,現地の土石流に対する有用な情報を 提供していきたい.

**参考文献** 1) ベネズエラ集中豪雨対策砂防専門家チーム第2陣:ベネズエラ共和国バルガス州 San Julian 川および Camuri Chiquito 川土砂災害対策計画報告書, 2000, 6, 2) (社)土木学会・水理委員会:ベネズエラにおける洪水・土砂災害に関す る調査研究-1999年12月災害-, 2001, 1, 3) 武居有恒:砂防学, 1章, 山海堂, 1990.