

立命館大学理工学部 学生員 ○今田 勝昭
立命館大学理工学部 正会員 江頭 進治
立命館大学大学院 学生員 伊藤 隆郭

1.はじめに 1999年12月中旬に、ベネズエラ北部カリブ海沿岸部において、集中豪雨があり、洪水氾濫・斜面崩壊・土石流や土砂流等が発生し、死者・行方不明者数3万～5万と推定される災害となった^{1,2)}。この集中豪雨による扇状地への土砂流出量は非常に大きく、これは有効な土砂災害対策を推進する上において、土砂流出の解明及びそれに対する基礎的研究が重要であることを示唆するものである。本研究では、現地に適した土砂災害対策のための有効な情報を得ることを目的として、ベネズエラ災害を対象として数値シミュレーションを行い、その結果に基づいて流域の特性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 土石流の発生・流下・堆積を含む土砂流出のシミュレーションは、一般の流れに関する質量保存則、運動量保存則および河床位方程式を用いて行われる。ここでは、山地域から扇頂部までの区間を対象とすると、支配方程式は一次元のもので十分である。これに江頭ら³⁾のものを適用すると、次式のように表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial v h B}{\partial x} = \frac{E}{c_s} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial \beta v}{\partial x} = g \sin \theta_x - \frac{1}{\rho_m} \frac{1}{h} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{v E}{c_s h} - \frac{\tau_b}{\rho_m h} \quad (3)$$

$$\frac{\partial c h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial \gamma c v h B}{\partial x} = \dot{E} \quad (2)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = - \frac{E}{c_s \cos \theta_x} \quad (4)$$

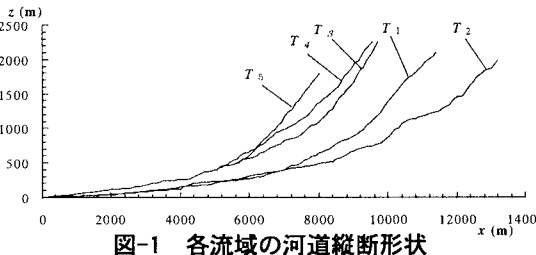
ここに、 t は時間、 x は流れ方向の座標、 h は水深、 B は河幅、 v は断面平均流速、 E は侵食速度であり、これが負の場合には堆積を示す。 c は流れの断面平均土砂体積濃度、 c_s は土砂の静止体積濃度、 θ_x は河床勾配、 g は重力加速度、 ρ_m は混合物の密度、 P は全圧力、 τ_b は河床せん断力、 z_b は河床高、 β は運動量補正係数、 γ は土砂濃度の鉛直分布に関する形状係数である。なお、侵食速度と河床せん断力については江頭らの式^{1,3)}を用いる。

3.計算条件 計算の対象流域として Camuri Grande 流域(T_1 、 T_2)および San Julian 流域(T_3 、 T_4 、 T_5)を選ぶ。なお、扇頂部における各支溪の流域面積は表-1 のようであり、2つの流域において流域面積の違いが大きい。

図-1 は、河口を原点として描いた各支溪の河道縦断形状の分布である。河幅は、現地踏査に基づいて支溪 T_1 、 T_2 においては、河口から 7000m の区間で 40m、同地点から計算の最上流端間での区間においては、20m としている。同様に支溪 T_3 、 T_4 、および T_5 においては、河口から 5000m までを 40m、5000m から最上流端までを 20m としている。各支溪における計算の最上流端は、河口からそれぞれ次のような地点としている。 T_1 :8600m、 T_2 :11700m、 T_3 :8210m、 T_4 :7560m、 T_5 :6140m。また、最上流端の流域面積はそれぞれ次のようである。 T_1 :5.98km²、 T_2 :0.2km²、 T_3 :2.63km²、 T_4 :1.42km²、 T_5 :1.43km²である。なお、各支溪における計算の最上流端は、飽和した非粘性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パラメータは、次のように設定している。代表粒径 $d=20$ cm、土砂の密度 $\sigma=2.65$ g/cm³、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/cm³、内部摩擦角 $\phi_s=34.0^\circ$ 、静止堆積濃度 $c_s=0.52$ としている。溪床堆積物の厚さは、現地踏査によ

表-1 流域面積

支溪	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
流域面積(km ²)	21.9	18.8	7.0	5.0	2.6



るデータを考慮にして、侵食可能深 $D_p=10\text{m}$ としている。最後に、最上流端からの供給水量は、合理式を用いて、各支溪においてそれぞれ次のように定めている。 $T_1:Q_{in}=49.8\text{m}^3/\text{s}$ 、 $T_2:Q_{in}=1.9\text{m}^3/\text{s}$ 、 $T_3:Q_{in}=21.9\text{m}^3/\text{s}$ 、 $T_4:Q_{in}=11.8\text{m}^3/\text{s}$ 、 $T_5:Q_{in}=11.9\text{m}^3/\text{s}$ 。なお、降雨強度については、現地データ²⁾を参考として $r=50\text{mm/hr}$ としている。

計算は leap-frog 法を用いており、 $\Delta t=0.05\text{sec}$ 、 $\Delta x=5\text{m}$ として、計算時間は 1000sec である。

4.扇状地における土砂流出 表-2はCamuri GrandeおよびSan Julian 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、土砂量は空隙を除いた絶対量である。同表において、各支溪における流出土砂量は、1回の土石流によるものである。また、両流域においては、崩壊が無数に発生した後、流動化しており、それらが流下過程において溪床が侵食されたことが分かっている。そこで、これらの支溪の土石流による流出土砂量は大きいものと予想されるため、次のように概算した。地形図を用いて Camuri Grande(T_1 、 T_2)における土石流の移動経路以外の1次谷を含む総延長は53km程度、同じく San Julian 流域(T_3 、 T_4 、 T_5)においては、35km程度である。これと平均河幅を5m、平均侵食深を2mとすることによって求めた。さらに、土砂流出は、土石流ばかりで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ので、2日間雨量1000mmとして、掃流砂量を算定した。これらの3つの計算による土砂流出量の総計と、現地データ²⁾を比較すると両者は概ね同程度の流出土砂量であることが分かる。

次に、各々の流域における流出土砂量の特性についてみる。

図-2は、横軸に平均河床勾配、縦軸に土砂量を流域面積で除したものをとり、計算結果をプロットしてある。なお、流域面積は表-1を用いている。これによれば、勾配が急になると流出土砂量が増大している。さらに、Camuri Grande および San Julian 流域における土砂流出の地域性の違いが現れている。

図-3および図-4は、先に示した計算条件のうち、全区間において河幅を20m、40mの一定値として計算した扇頂部における各流域の流砂量の時間変化である。これによると、どの流域も河幅を2倍にすると流出土砂量も2倍程度になっている。この結果は、河幅も流出土砂量に大きく依存することを示しており、詳細な現地データの収集を行わなければならないことを示唆している。

5.おわりに 実流域に発生した土石流を対象として、土砂流出のシミュレーションを行った。扇頂部における流出土砂量は勾配といった地形特性および溪床堆積物の量に依存する。これは、現地データを得る際には留意しなければならないことを示している。また、流出土砂量の流域における違いが認められた。これについては、他の流域のデータを収集して更に検討していきたい。

参考文献 1) (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年1月 2) 日本土木学会調査団：1999年 Venezuela 国の洪水・土砂災害調査研究報告書、2000年4月 3) 江頭ら：姫川支川蒲原沢土石流シミュレーション、水工学論文集、第42巻、pp919-924、1998。

表-2 流出土砂量(m^3)

流域	Camuri Grande		San Julian		
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
支溪					
砂礫	8480	4480	20800	25800	9670
微細砂	15520	9860	19500	24000	9100
小計	24000	14340	40300	49800	18770
支溪全体の侵食量	530000		350000		
掃流砂量	240000		140000		
総計	808340		598870		
現地データ	660000		840000		

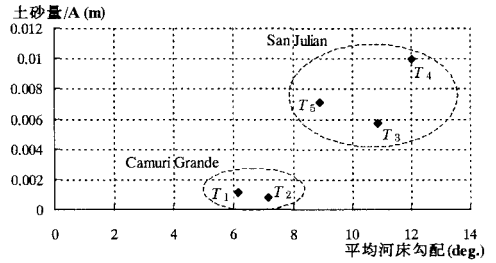


図-2 平均河床勾配が土砂量に及ぼす影響

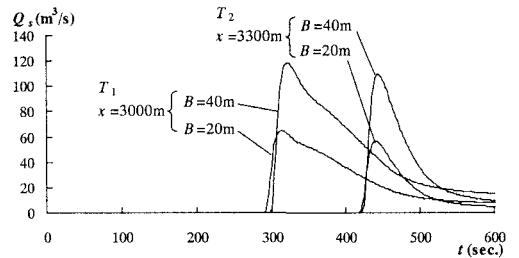


図-3 流出土砂量に及ぼす河幅の影響

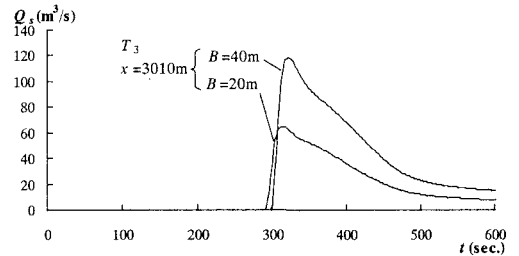


図-4 流出土砂量に及ぼす河幅の影響