

京都大学防災研究所 ○諏訪 浩

京都大学理学研究科 真中 朋久

焼岳上々堀沢に発生した4つの土石流の流動に関する観測値を、河川の平均流速を推定するための Manning の式とダイラタント流体モデルにもとづく高橋の土石流の流速式<sup>1)</sup>に用いて、それぞれの式の適合性を検討した。土石流の流速の推定に関しては筆者らが Manning 式ほか2つの流速式を用いて検討を加えたことがある<sup>2)</sup>ほか、水山らによる実測土石流の流動深と流速の関係の検討<sup>3)</sup>や、Hungriらによる土石流の流動深と流速の関係の検討<sup>4)</sup>がある。これらの報告においては Manning 式や高橋式などの適合性が検討されているが、流動に関するパラメータには一定の値を用いた計算がなされている。しかし、実際の土石流においては流動土石の粒度偏析<sup>5)</sup>のために図1の例に示すような石礫濃度と粒径の経時変化が生じているから、これらのパラメータを一定にしてとり扱うことには問題がある。

1. 使用データ 以下でとり上げる4つの土石流を DF830905 (1983年9月5日に発生)、DF850721 (1985年7月21日に発生の第一波)、DF850911-1 (1985年9月11日発生の第一波)、DF850911-2 (1985年9月11日発生の第二波)のように略記する。このうち、DF850721に関しては、粒径が10cm以上の石礫についての粒度特性値と石礫濃度の詳細な経時変化を得たので(図1参照)、これらの値を高橋式を検討するところで用いる。なお、土石流の流動断面積を流動幅で割った値を平均流動深とし、これらを図1と図2に示す。

2. Manningの流速式の適用 自然河川の平均流速の推定に用いられる Manning の式

$$U = \frac{1}{n} I^{1/2} R^{2/3} \quad (1)$$

を用いて土石流の平均流速を計算し、実測データと比較して図3に示す。ここに、U:平均流速(m/sec)、n:Manningの粗度係数(m<sup>1/3</sup>sec<sup>-1</sup>)、I:流路勾配、R:径深(m)である。計算では径深Rの代わりに便宜的に平均流動深hを用いた。Uの実測値には、ダイラタント流体モデルと同じレベルで数値を比較するために、表面流速の観測値を3/5倍してある。nの値は本来流路の粗度条件によって異なるが、水以外の流れに(1)式を拡大適用する場合には、流動材料の違いによってnの値を大きく変えなければならないと考えられる。図1に示すDF850721の流動深の観測値と(1)式を用いた計算結果を図3に示す。図3Aでは先頭部においてh<sub>max</sub>の出現するところ(矢印で示す)で流速値が一致するようにnを0.206m<sup>-1/3</sup>sec という大きな値に定め、B図では流れの後続部でhがほぼh<sub>max</sub>/2になるところ(矢印で示す)で流速が一致するように定めたn=0.088m<sup>-1/3</sup>secを用いたが、いずれも一部区間でしか観測値と一致させられないことが分かる。

3. ダイラタント流体モデルの適合性 Bagnoldが粒子流について明らかにした分散圧力による流れの

抵抗と、流れ自体の重力の流路斜面方向成分とが釣り合う定常条件下で、高橋が導いた<sup>1)</sup>平均流速の式は、  

$$U = \frac{2}{5d} \left[ \frac{g \sin \theta}{a \sin \alpha} \left\{ Cd + (1 - Cd) \frac{\rho}{\sigma} \right\} \right]^{1/2} \left\{ \left( \frac{C_*}{Cd} \right)^{1/3} - 1 \right\} h^{3/2} \quad (2)$$
 と表される。ここに、U:平均流速、g:重力加速度、θ:流路傾斜角、α:定数、α:粒子の内部摩擦角に相当する角、d:粒子の粒径、Cd:粒子の体積濃度、C\*:粒子の最密充填体積濃度、σ:粒子の密度、ρ:水の密度、h:流動深である。実際の土石流は先頭部が盛り上がっていて流速も大きく変化しているので、厳密には(2)式で土石流の流速を説明することは出来ない。しかし、観測点付近において土石流の各部分が

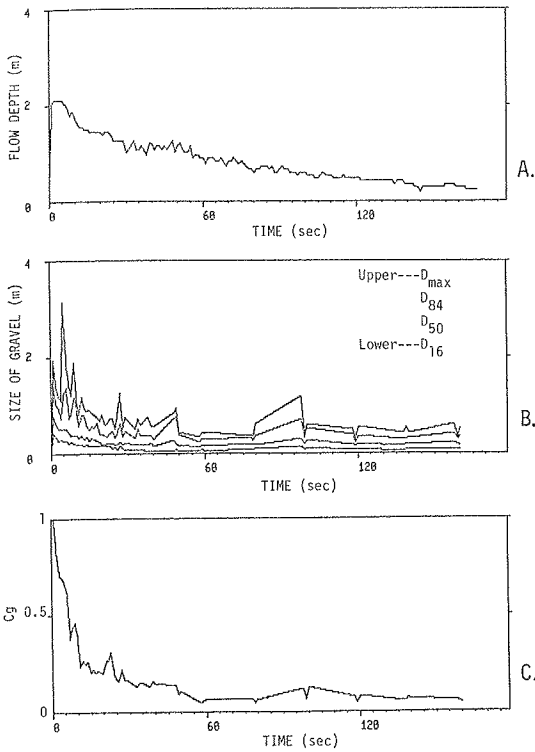


図1 DF850721 の実測値。 A: 平均流動深、  
B: 粒径 1.0 cm 以上の石礫の粒度特性値、  
C: 粒径 1.0 cm 以上の石礫の濃度  $C_g$

時間軸の原点は土石流先端の通過時刻を示す。

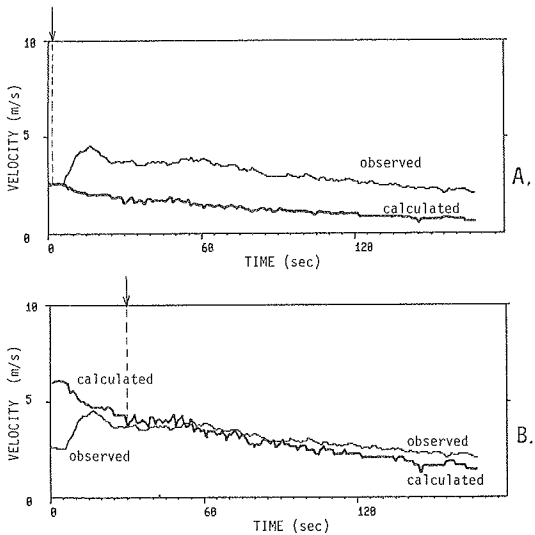


図3 DF850721 の流速の Manning の式による  
計算値と、実測値の比較

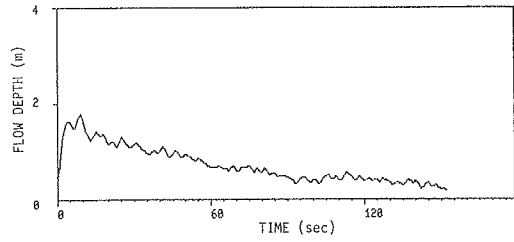


図2-1 DF830905 の平均流動深 (実測値)

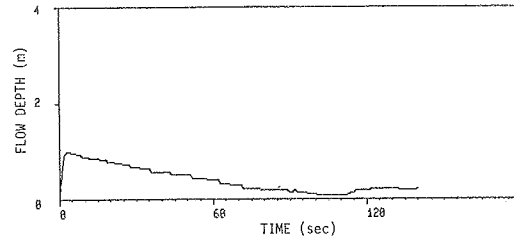


図2-2 DF850911-1 の平均流動深 (実測値)

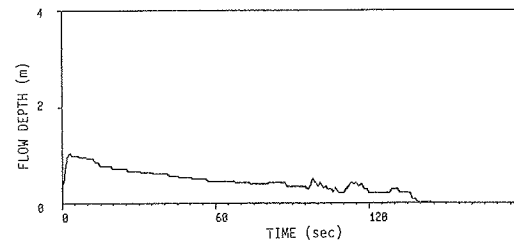


図2-3 DF850911-2 の平均流動深 (実測値)

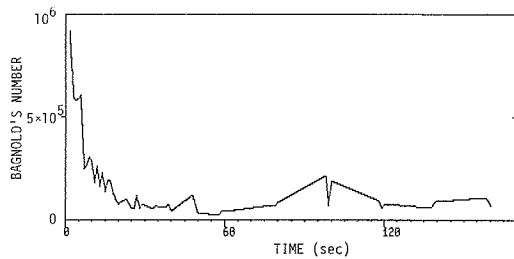


図4 DF850721 の Bagnold's Number  $N$  の値。

$C_d = C_g$  (実測値)、 $C_* = 0.7$ 、 $d = D_{50}$  (中央粒径、実測値)、 $\sigma = 2.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $\mu = 0.1 \text{ P}$  (ポアズ) とした。 $du/dy$  に (表面流速) / (流動深) を用いたので、図は流れの深さ方向についての平均的な  $N$  の値を示す。

定常に近い状態で流動していると見なして、(2)式を用いて第一近似的に流速を計算することは可能である。

ただし(2)式の適用には、粒子相互の衝突による運動量の交換が応力の主因となることが前提になっており、

$$N \equiv \frac{\lambda^{1/2} \sigma d^2}{\mu} \cdot \frac{d u}{d y} \quad (3)$$

なるBagnold's Numberが450以上の値をとることに相当する<sup>5)</sup>。ここに、 $\lambda = \{ (C_g / C_d)^{1/3} - 1 \}^{-1}$ 、

$\mu$ : 液体の粘性係数 ( $g \cdot cm^{-1} \cdot sec^{-1}$ )、 $\sigma$ : 粒子の密度 ( $g \cdot cm^{-3}$ )、 $d$ : 粒子の粒径 (cm)、

$d u / d y$ : 速度勾配 ( $sec^{-1}$ ) である。図4にDF850721についてのNの値の経時変化を示す。図4では、

$N = 450$ の閾値は時間軸と区別できないほど小さい。すなわち、上々堀沢の土石流については、(3)式の各パラメーターのオーダーが変わるようなことはないから、いずれもダイラタント流体モデルが当てはまる。

4. 高橋の式による計算(定数項の決定) 流速以外の実測データを用い、(2)式によってDF850721の

平均流速を計算する。ここで(2)式を次のように書き直す。

$$U = \beta \cdot \sin^{1/2} \theta \{ C_d (\sigma - \rho) + \rho \}^{1/2} \left\{ \left( \frac{C_g}{C_d} \right)^{1/3} - 1 \right\} \frac{h^{3/2}}{d} \quad (4)$$

ここに $\beta$ は  $(2/5) \{ g / (a \sigma \sin \alpha) \}^{1/2}$  ( $cm^2 sec^{-1} gr^{-1/2}$ ) なる定数である。図5は、 $C_d$ と $d$ に

実測値の $C_g$ と $D_{50}$ とを用いて(4)式から計算した結果を示す。定数 $\beta$ の値は図5Aでは流動深 $h$ が最大となるごく先端部(矢印で示す)で、B図では後続部において $h = h_{max} / 2$ となるところで計算値が実測値と一致するように決めた。A図では後続部の流速が異常に大きくて全く合わない。B図においても後続部になお過大な計算値が現れる。この原因は、写真による解析法<sup>5)</sup>の制約のため、 $C_g$ の値が土石流の先端部を除き過小評価されていることにある。そこで、以下では $C_d = 0.4 C_g + 0.3$ かつ $C_d \leq 0.6$ とした。

5. 流動深 $h$ による中央粒径 $D_{50}$ と石礫濃度 $C_g$ の表現 DF850721の実測値について、 $D_{50}$ と $h$ および $C_g$

と $h$ の関係をプロットして図6と図7に示す。これらの関係を回帰式を用いて表現し、規模の異なる土石流に共通の式とするため、 $h$ を個別の最大流動深 $h_{max}$ で規格化した $h^*$  ( $= h / h_{max}$ )を用いた。 $D_{50}$  (m)

については、土石流の最大流動深に比例して $D_{50}$ の最大値が決まると仮定し、図6から

$$D_{50} = \begin{cases} 0.0245 h_{max} \exp(2.35 h^*) & (h^* \geq 0.576) \\ 0.0952 h_{max} & (h^* \leq 0.576) \end{cases} \quad (5)$$

を得た。 $C_g$ については、図7から規格化だけを行って次式を得た。

$$C_g = 0.03 \exp(2.98 h^*) \quad (6)$$

6. 高橋の式による計算(パラメーターに流動深の関数表現を使用) 4つの土石流について $h$ の実測値だけ

を(4)~(6)式を用いて平均流速を計算した結果を図8に示す。いずれの例でも、土石流の主要部分については、計算値が実測値をよく表現している。ただし、尾部については $D_{50}$ の過大評価のために実測値を下回っている。

あとがき Manningの式に関しては、土石流の後続部分にしか式を適合させられなかったが、高橋の式に

については、実測流動深の関数で石礫の濃度と粒径という二つのパラメーターを表すことによって、土石流の主要部分について比較的よく適合させることが出来た。本研究では、焼岳における建設省松本砂防工事事務所との共同観測で得られたデータを利用した。同事務所の宮本 登所長をはじめとする諸氏と、本研究に対してご助言をいただいた京都大学防災研究所 奥田節夫教授に謝意を表す。なお、研究費の一部に文部省科学研究費補助金自然災害特別研究(2)(課題番号61025036、代表者 諏訪 浩)を用いた。

引用文献

- 1) Takahashi(1980)J. Hydraul. ASCE, 381-396; 2)奥田ほか(1978)京大防災研年報B-1, 237-263;
- 3) 水山ほか(1984)新砂防, 135, 23-26; 4) Hungr et. al. (1984)Can. Geotech. J., 663-677; 5)諏訪ほか(1986)京大防災研年報, B-1, 391-408; 6)Bagnold(1954)Proc. Roy. Soc. London, A, 225, 49-63.

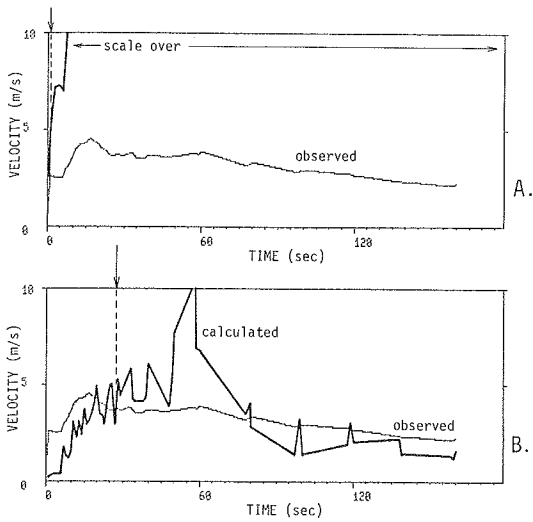


図5 高橋の式(4)式によるDF850721の計算流速と実測流速の比較。  
 $C_d \approx C_g$  (実測値)、 $d = D_{50}$  (実測値) とした。

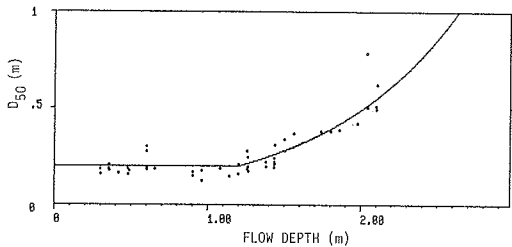


図6 DF850721の中央粒径 $D_{50}$  (m)と流動深 $h$  (m)の関係。回帰線は  
 $D_{50} = \begin{cases} 0.0516 \exp(1.12 h) & (h \geq 1.21 \text{ m}) \\ 0.20 & (h < 1.21 \text{ m}) \end{cases}$

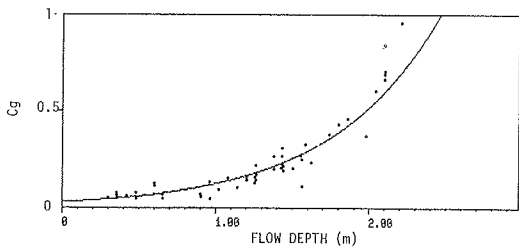


図7 DF850721の石床濃度 $C_g$ と流動深 $h$  (m)の関係。回帰線は  
 $C_g = 3 \exp(1.42 h)$

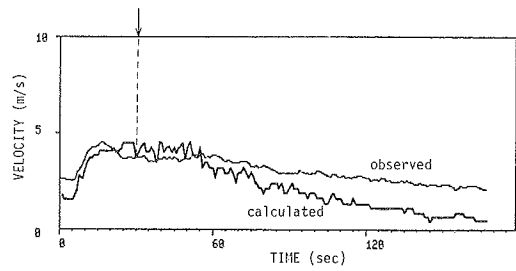


図8-1 (4)式によるDF850721の平均流速の計算値と実測値の比較。流動深 $h$ が $h_{max}/2$ となるところ(矢印で示す)で流速が一致するように $\beta$ の値を定め、 $d = D_{50}$ 、 $C_d = 0.4 C_g + 0.3$ かつ $C_d \leq 0.6$ とし、 $D_{50}$ と $C_g$ には回帰式(5)と(6)を用いた。

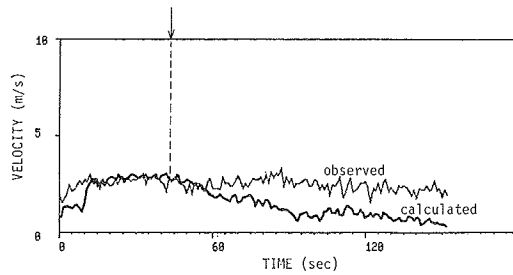


図8-2 同。DF830905

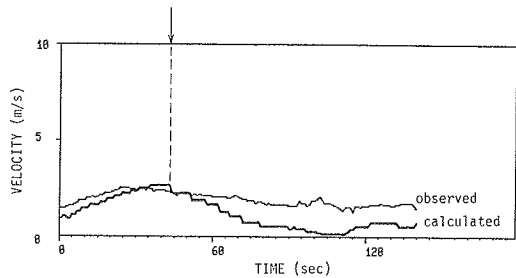


図8-3 同。DF850911-1

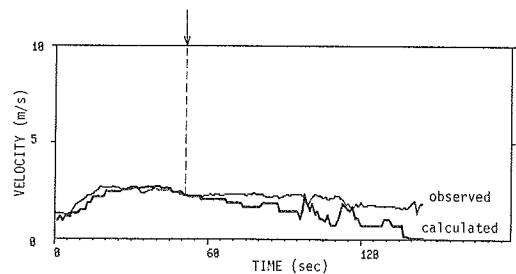


図8-4 同。DF850911-2