

3 焼岳上々堀沢における土石流の規模と石礫の粒度

京都大学防災研究所 ○諏訪 浩・奥西一夫

建設省松本砂防工事事務所 森 俊勇

土石流の流動特性は石礫の粒度や濃度、流れの規模の影響を受けている。そして石礫の濃度や粒度は一つの土石流の中でも先頭部から後続流へかけて大きく変化する。前報では主として降雨流出条件によって土石流の規模がどのように決まるかを検討した¹⁾。ここでは土石流の規模によって石礫の濃度や粒度あるいは流動特性がどのように規定されているかを検討する。

1. 表面流速の空間分布

1988年9月12日に焼岳上々堀沢において図1のハイドログラフに示すように土石流が8波に分かれて流下した。これらの土石流を図2に示す集中観測点において俯瞰の角度でビデオ撮影した。このカメラの視野は土石流の流動深によって移動するとともに縮尺が変化するので、流動深の測定データを用いて目標物の位置と縮尺に補正を加えて、土石流表面における石礫の流速や粒径、石礫の占める面積を求めた。

観測点において右岸に平行な流速成分の横断方向分布として土石流表面の流速分布を示すと図3のようになる。この図から、流れは大きく三つのタイプに分けられることがわかる。すなわち、第1波と第2波の先端部の流動には栓流(plug flow)が認められる。ただし、この栓流は粘土粒子などの細粒材料を高濃度に含むために生じるビンガム流動の結果ではなく、石礫の濃度が高くて石礫が互いに噛み合う構造を呈していることによって生ずる応力抵抗特性としての広義のビンガム流動の結果である。第2波の後続部や第5波の流動深が最大になる部分では明らかに流速分布にシアール(shear)が認められる。また、第5波の流速が最大を記録するところでは、流速分布に大きな乱れが存在している。ただし、後の二つのステージについては、流れの中の応力抵抗則がダイラタント流動²⁾のタイプに近いのか、あるいはレイノルズ応力が支配的な流れ³⁾なのかまでは分からない。

2. 石礫の濃度と土石流のmobility

図2に示す第5波土石流について、粒径が10cm以上の石礫が土石流表面に占める面積率(濃度)と、同じく粒径10cm以上の石礫の、面積で整理した粒径加積曲線から得られる84%、50%、16%粒径などの粒度特性値を俯瞰映像の記録から求めて図4に示す。上々堀沢に発生する土石流については、これらの例を含めて、その流動特性、材料構成の特徴を次のようにまとめることができる。すなわち、土石流の先頭部には大径礫を主体とする多量の石礫が集積していて、最大波高はこの部分に出現するが、先頭部では表面流速はかなり小さめである(その土石流の表面流速最大値の50~70%)。また、この部分では石礫の濃度はほとんど100%に近く、とくに単独で発生する土石流や、複数波の土石流が続けて発生する場合には、その第一波目の土石流の先頭部において、石礫の間隙に泥水を欠き、石礫だけの集団をなしていることが多い。そして、最大波高出現部の背後で石礫の濃度は急速に減少し、波高も低下する。しかしこの時、流れの表面流速は逆に増大して最大値を記録したのち、漸次減少してゆく。

これら1988年の8波の土石流に、1985年7月21日、1983年7月27日および9月5日の三つの土石流を加え、石礫の濃度および石礫の粒度特性値について検討した。なお、濃度および粒度特性値は土石流先頭部の石礫が集中して盛り上がった部分を代表させるため、それぞれの土石流の先端から最大流動深のおよそ10倍の長さの部分を取り、これを

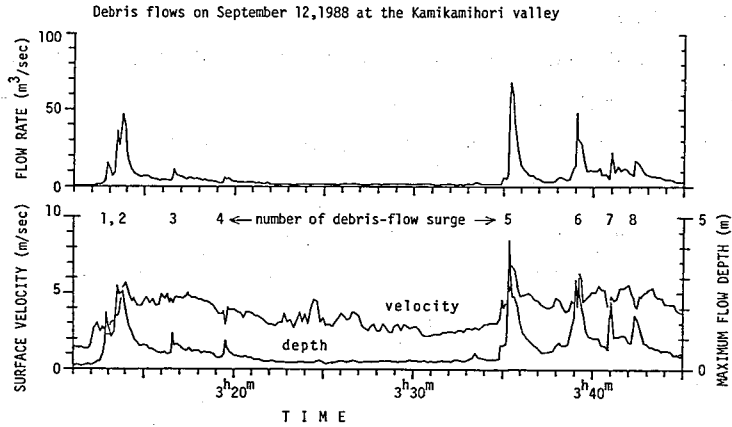


図1 焼岳上々堀沢で1988年9月12日に発生した土石流のハイドログラフ。
10秒の時間分解能で示す

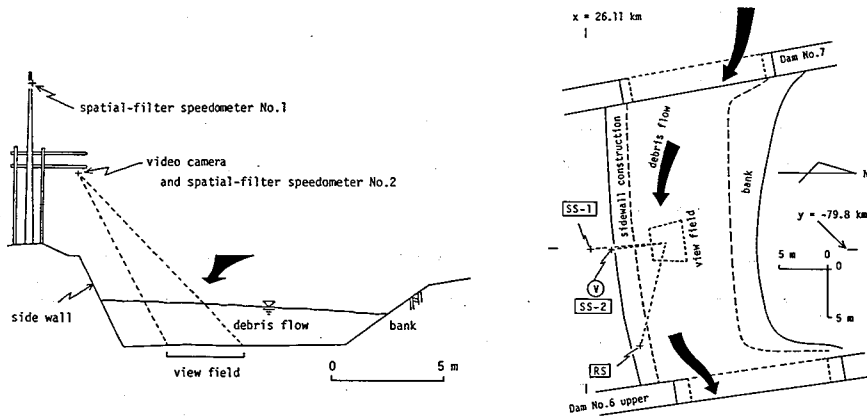


図2 上々堀沢土石流集中観測点付近の横断面図(左)と平面図(右)。
カメラの視野は流れの水位が零の場合を示す

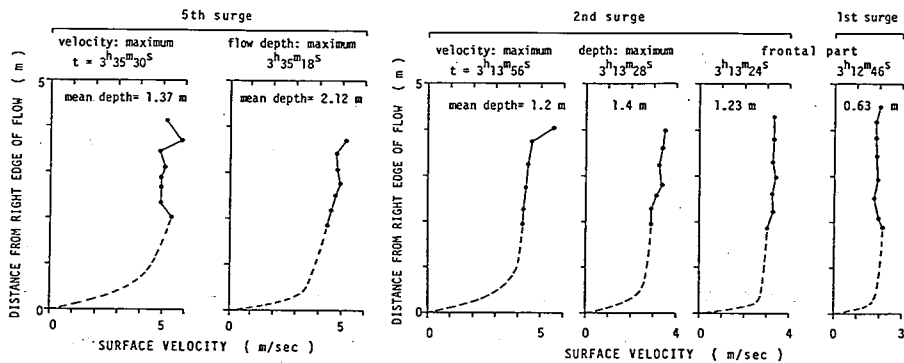


図3 土石流表面流速の横断分布。
縦軸は下流を向いて右岸側から測った横断方向の距離

それぞれの土石流の先頭部としてデータを整理した。

まず、石礫の濃度と土石流の流速に関するmobility（流れ易さ）との関係を図5に示す。流量が最大となるときの土石流の表面流速を V_s 、流動深を h として摩擦速度 u_* を $u_* = (g h \sin \theta)^{1/2}$ で計算すると、 V_s/u_* は抵抗係数 f の $-1/2$ 乗に比例する量であるが、これは流速に関する土石流のmobilityとみなすことができる。ただし、 g は重力の加速度、 θ は流路縦断傾斜角である。すなわち、図5は石礫の濃度が大きいほど土石流の流動性が低下することを示す。これは、石礫相互の摩擦や土石流と流路床との間の摩擦が増大するためである。また図中、1988年9月12日の土石流について、発生順に破線でつないで示すが、発生順の早い土石流では石礫の濃度が大きくmobilityが低いのに対し、発生順の後のものでは石礫の濃度が低下し、mobilityが増大する傾向が概ね認められる。

3. 石礫の粒度特性値と土石流の規模

土石流の規模が大きいほど、その材料となる石礫の粒度が大きいことが予想される。土石流先頭部の石礫の50%粒径 D_{50} と、土石流の最大流量 Q_p (m^3/sec)および総流出量 Q_T (m^3)との関係を図6と7に示す。これらの図はどれも、石礫の粒度と土石流の規模との間にかなり高い正の相関関係があることを示す。ただし、ここで Q_T は図4に斜線で示す部分、すなわち流量が $10m^3/sec$ 以上である時間帯の流量の積分値としている。

4. 最大礫の粒径と土石流の規模

前項で検討した石礫の粒径データは土石流表面の部分視野の記録から求めたものであり、必ずしも個々の土石流の最大礫の粒径を含んでいない。土石流の規模と最大礫の粒径 D_{max} との関係を検討するため、ハイドログラフが得られている土石流について、正面から撮影された全視野の映像記録から、それぞれの土石流に含まれていた最大礫の粒径 D_{max} を判読し、これとピーク流量および総流出量との関係を図8と9に示す。最大礫の粒径はもともと偶然性を多く含むと考えられるが、それでも、土石流の規模の指標値 Q_p や Q_T とかなり高い正の相関関係にあることが分かる。

いっぽう、土石流に含まれる最大礫の粒径と土石流の流動深の最大値 h_{max} との関係を図10に示す。ある程度のばらつきはあるものの、プロットが $D_{max} = h_{max}$ の直線のまわりに集まること、すなわち両者がほぼ同程度の大きさであることが分かる。ところで、石礫が流れに取り込まれたり、逆に石礫が流れから取り残されて堆積する過程を想定すると、流体の密度が同一である場合には、それらのステージにおいて最大礫の粒径は土石流の流速の2乗に比例することが予想される⁴⁾。しかし、両者の間の相関はあまり高くなかった。現象はそれほど単純ではなく、2節で述べたように、いっぽうで石礫の濃度が土石流のmobilityを大きく左右しているためである。

あとがき それぞれの土石流における石礫の濃度や粒度特性の変化の実態は観測によってかなり解明されてきた。さらに、個々の石礫の運動とマトリックス部分のレオロジーとが明らかにされ、これらを総合的に検討できるようになれば土石流の流動特性がさらによく説明されることになる。この研究の一部は文部省科学研究費補助金重点領域(1) (課題番号01601019, 代表者 片岡 順)の補助を得て行った。

引用文献 1) 諏訪 浩・奥西一夫・真中朋久・宮本 登(1989) 焼岳上々堀沢における土石流の発生と規模: 平成元年度砂防学会研究発表会概要集, 307-310. 2) 高橋 保(1977) 土石流の発生と流動に関する研究: 京都大防災研年報, 20B-2, 405-435. 3) 芦田和男・江頭進治・佐々木 浩(1987) 斜面崩壊の発生と土石流の流動機構: 京都大防災研年報, 30B-2, 507-526. 4) Suwa, H. (1988) Focusing Mechanism of Large Boulders to a Debris-Flow Front: Trans. Japan. Geomorph. Union (「地形」), 9, 151-178.

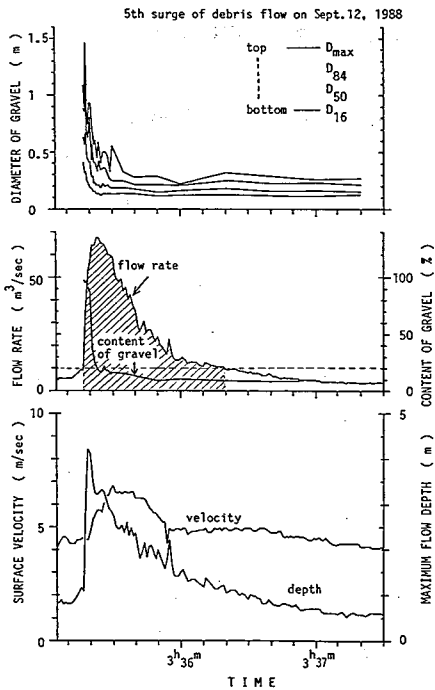


図4 第5波土石流のハイドログラフと、粒径10cm以上の石礫の濃度曲線および粒度特性値曲線

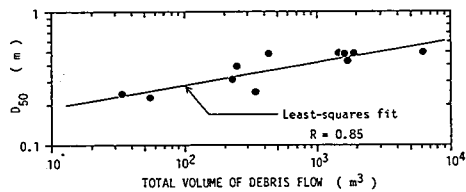


図7 土石流先頭部表面の石礫の50%粒径と土石流の総流出量の関係

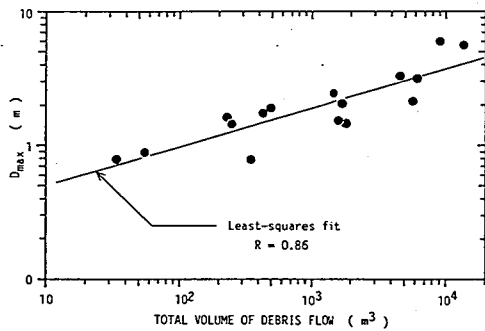


図9 土石流先頭部表面の最大礫の粒径と土石流の総流出量

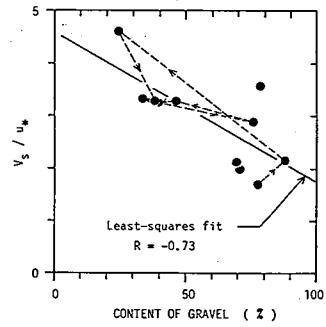


図5 土石流表面の石礫の濃度（面積率）と流速に関するmobility

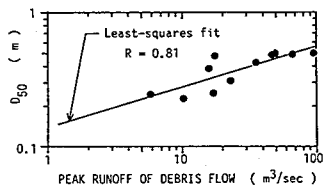


図6 土石流先頭部表面の石礫の50%粒径と土石流のピーク流量の関係（部分視野のデータ）

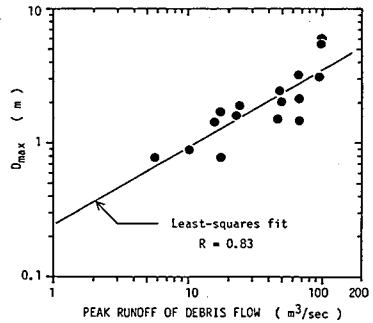


図8 土石流先頭部表面の最大礫の粒径と土石流のピーク流量の関係（全視野のデータ）

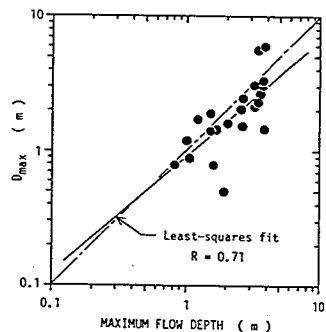


図10 土石流先頭部表面の最大礫の粒径と土石流の最大流動深