

京都大学 防災研究所 〇 諏訪 浩・奥田 節夫

石礫を多く含むタイプの土石流においては、流れの先頭部にとくに多量の径礫が集積して大きな段波が形成されている。このため、大径礫の直接的な衝撃破壊が加わり、土石流による被害を激甚なものとしている。前報¹⁾では、流動中の土石流と土石流堆積物に見られるこの現象の観測成果を示すとともに、粒状体に振動を加えて生じる粒度偏析の実験結果を報告した。ここでは、さらに詳細な観測事例を報告し、粒状体に剪断を加えて生じる偏析について、その実験結果を示して検討を加える。

1. 土石流表面の石礫の判読

1985年7月21日に焼岳上々掘沢に発生した土石流について、上下流に250mだけ離れた二地点において、その表面の35ミリ連続写真撮影に成功した。連続写真の一部を写真1に示す。この連続写真を用いて、土石流表面に占める石礫の面積と粒径分布とを求めた。粒径が10cm以上の石礫が土石流表面に占める面積率（以下これを石礫の濃度と称す）と粒度特性値とを求めて図1, 2に示す。ここに石礫の粒径は個々の石の平均径ではなく、それぞれの石礫の最大直径を代表径として用いている²⁾。この粒径を直径とする円の面積を整理して粒度分布曲線を描き、細粒側からの16%, 50%, 84% 粒径を求め、粒度特性値曲線として示す。石礫の寸法は、写真内の石礫の位置および土石流の波高変化に基づく縮尺の変化を考慮して補正してある。

2. 土石流のハイドログラフと岩屑材料特性

図1, 2に示す石礫濃度曲線に着目すると、石礫が土石流の先頭部へ若しく集積していることがわかる。はじめの数秒間に通過するこのような土石流先頭部では、石礫の集積が特に著しいため、石礫は相互に噛み合いながら運動し、石礫の間隙を細粒の泥砂によるマトリックスが充填している状態である。石礫のこのような著しい集積状態のため、土石流の先頭部分では内部摩擦と底面摩擦が増大して流動性が低下し、先端流速や表面流速が図1のハイドログラフに示すように小さくなっている。とくに土石流の先端付近では石礫の濃度が著しく高いが、写真1-1によれば、このような部分では大径礫の間に砂泥のマトリックスがほとんど見られない。しかし、写真1-2によれば、土石流先頭部のある特定の境界から後方ではマトリックスが石礫の間隙を充填するようになることがわかる。さらに後方に至ると砂泥のマトリックスを主体とした流れになり、その中に石礫が分散する構造になっている。

3. 大径礫の先端集積とinverse grading

図1, 2の粒度特性値曲線に表われているような大径礫の先端集積の現象は定性的には以下のように解釈できる^{4,5)}。すなわち、土石流の流れの中で流れの進行方向に生じる石礫の粒度偏析(size segregation)の過程と、流下に伴い流れに合体する大径礫が、土石流の中へ混合し難い性質とによって大径礫の先端集積が生じていると推定される。後者の推論は写真1において見られるように、土石流の先端部が大径礫だけで構成されていて、その間隙にマトリックスが存在しない事実により、強く支持される。前者の粒度偏析過程は流れが充分な厚みをとっている部分で生じ、いわゆる逆級化(inverse grading)と流れ上層における高流速とによって進行する。逆級化は大径の粒子の浮上のために流動層の上のほうほど岩屑の粒度が増大する現象であり、主として分散圧力(dispersive pressure)³⁾と、動的篩(kinetic sieving)⁴⁾および大径

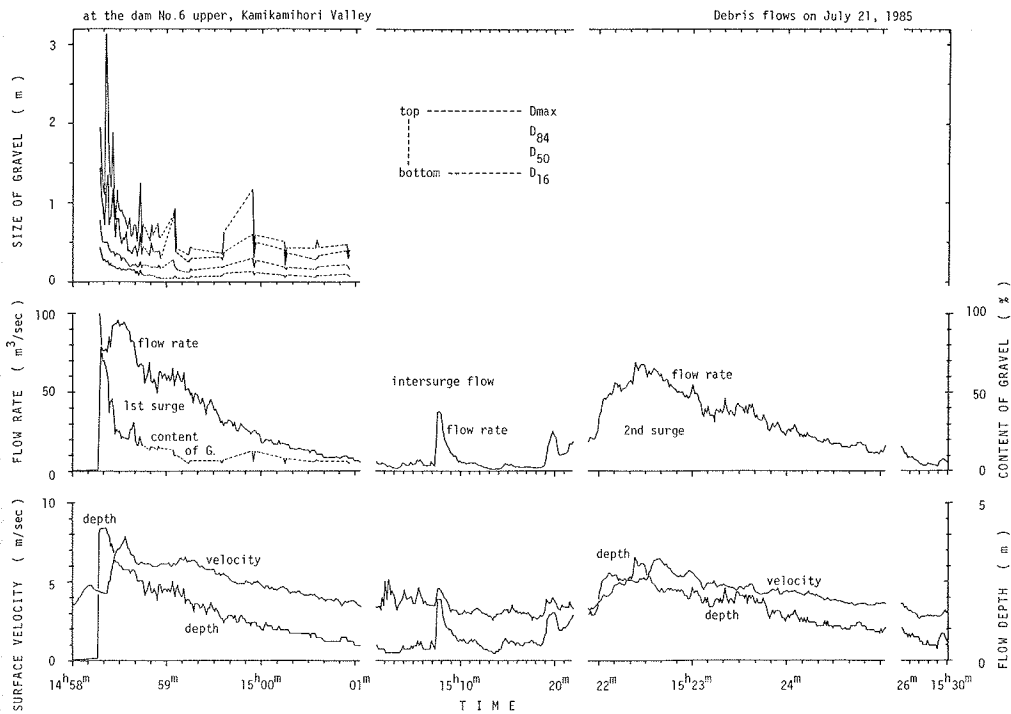


図1 1985年7月21日に焼岳上々堰沢で発生した土石流のハイトログラフと粒径10 cm以上の石礫の濃度曲線および粒度特性値曲線(下流側観測点)

礫の流路底面衝突⁴⁾の3つの効果に起因しているものと推定される。

4. 偏析度の変化

上流側の観測点は、落差が11mの堰堤の直下に位置しているが、この高落差の段階で効果で土石流本体の構造が乱されて、大径礫の先端集積の程度が、たんに低下することが予想された。さらに250m流下して下流側の観測点に至るまでに、落差が2~3mの低ダム(床固)が4基あるだけなので、先端集積の状態が再形成されることも予想された。

そこで土石流の先端部分について、偏析度をつぎのようにして求めて比較した。まず、図3の流

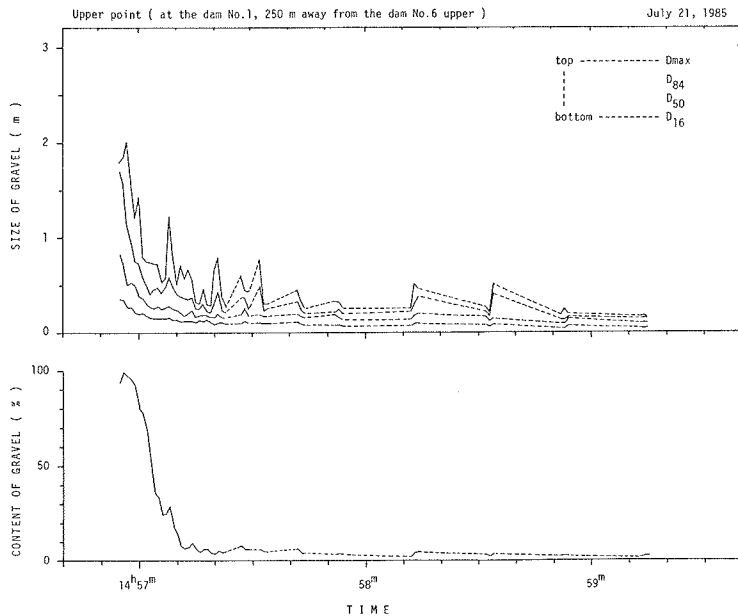


図2 上流側観測点における土石流の岩層の先端集積(濃度曲線に見られる)と大径礫の先端集積(粒度特性値曲線に見られる)

量曲線に示すように、この土石流の先頭部分 30 秒間を流出量（体積）が等分されるように 6 分割し、それぞれの部分 i で基準粒径より大きい粒子の占める面積比率 P_i を求めた。基準粒径は先頭部分 30 秒間全体における中央粒径 D_{50} を用いた。 i 部分と j 部分を比較する場合の偏析度を $C_{sij} = 100 (P_i - P_j) / (P_i + P_j)$ と定義する。ただし、 $i < j$ 。たとえば $C_{sij} = 100$ であれば、 D_{50} を境とする大小の石礫が完全分離していて、大径礫が前方集積していることを意味する。表 1 によると偏析度はいずれも上流側観測点で大きい。これは高落差の段落ちによって大径礫の先端集積構造が、予想に反し、潰れなかつたことを示し、さらに下流の低ガム群を流下する間に大径礫の先端集積の程度がやや低下したことを示す。

5. 粒状体の剪断による偏析の実験 前報¹⁾では異なる粒径のガラス球の混合物に振動を加えて粒子を流動化させると、動的篩の効果によって大径粒子が浮上して粒度偏析が進行することを報告した。このような粒子の流動化は剪断を加えて起こすこともでき、その場合と同様な粒度偏析の生ずることが予想される。そこで剪断による偏析の基本的特性を調べるために以下のような実験を始めた。

実験では粒径の異なるガラス球（大球の平均粒径：12.3 mm，小球の平均粒径：1.7 mm）の混合物を円環流路に充填し剪断を加えた。円環流路は上盤と下盤からなり、上盤は固定で、下盤は 226～53 rpm の範囲で回転させることができる。水路部の外径は 74 cm，幅 8 cm，高さ 5.5 cm である。ガラス球の一樣混合された試料を乾燥状態または水との混合状態で剪断し、流動が定常化したのち 5 分程度一定速度で剪断した。剪断終了後、水路内の試料を上下 4 層に等分割して回収し、粒径別に各層の粒子の重量を測定し、前節と同じ定義式を用いて偏析度を求めた。

6. 実験結果 水路底面は上盤に一体で静止しており、回転するのは底面だけであるが、水路内の速度勾配はほぼ一定の線形分布をしていることがわかった。剪断試験後の試料の偏析状態は大球と小球の混合比によって、図 4、5 に示すように大きく変化することが明らかになった。すなわち、大球の混合比が大きいと逆級化が起るのに対し、小さいと級化状態（下層ほど大径粒子の多い状態）になる。ガラス球の密度はどちらも 2.48 g/cm³ であるが、小径粒子と水の混合物の高密度はこれより小さくなり、大粒子との間に密度差が生じる。大粒子の比率の大きい場合には大粒子相互の作用が生じ、密度偏析の効果より動的篩いの方が優る結果、逆級化が生じたと推定され、大粒子の比率の小さい場合には密度偏析の効果が卓越するものと考えられる。なお、大粒子は上下方向に混合比によって決定する数だけの層を形成して分布し、平面的には各層ごとにかなり整然と配列するという現象が見られたが、この点についての力学的な検討は今後の課題である。

あとがき 前報に引き続き、観測データにもとづいて流動中の土石流における岩屑の粒度偏析過程の検討を進め、実験においては粒状体に剪断を加えて生じる偏析特性の検討を始めた。今後さらに実験を重ね、3 節に記す複数の過程を総合的に検討していく方針である。この研究では、堤岳における建設省根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、研究経費の一部に文部省科学研究費補助金自然発表特別(2)（課題番号 60025033，代表名 諏訪 浩）を用いた。

引用文献 1) 諏訪ほか(1984)砂防学会年報集, 158～161 2) 諏訪ほか(1982)京大防災研年報 25B1, 307～321 3) Takahashi (1980) J. Hydraul. ASCE, 106, 387～396 4) 諏訪ほか(1984)京大防災研年報, 27B1, 409～423 5) Suwa et al. (1985) Proc. I. Symp. Erosion, Debris Flow and Disast. Prev., Tsukuba, 237～241

表1 大径礫の先端集積による粒度偏析度

	Cs123,456	Cs12,56	Cs1,6
上流側観測点	55.7	70.5	81.2
下流側観測点	43.9	55.1	57.6

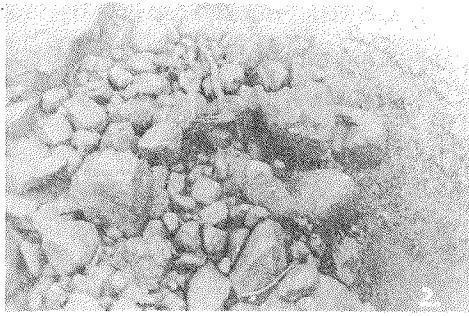


写真1-1

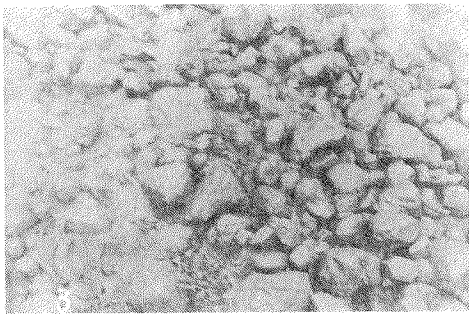


写真1-2 1秒後

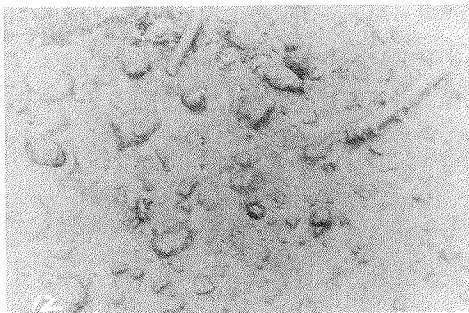


写真1-3 さきに9秒後

土石流の表面。下流側観測点を流下する土石流を俯瞰。視野はおよそ縦47m, 横6.6m。土石流の流向は右向き。1枚目の写真の撮影時刻は1985年7月21日14時58分14秒

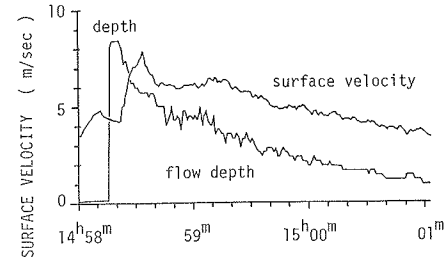
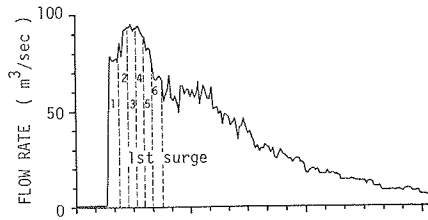
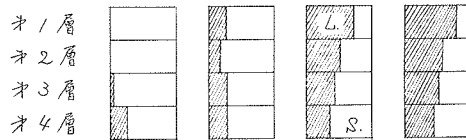


図3 1985年7月21日の土石流の1波の先頭部の等体積6分割

体積混合比(大/小)	0.100	0.35	1.00	1.52
粒子の体積濃度(%)	61.1	63.8	69.1	71.7



偏析度 Cs12,34	-100	-10.2	19.4	17.2
偏析度 Cs1,4	-100	-1.6	32.6	27.4
偏析状態	粗化成層	中立	逆級化成層	

図4 剪断実験による粒状体の偏析結果(水中)。平均粒径は小球:1.7mm, 大球:12.3mm

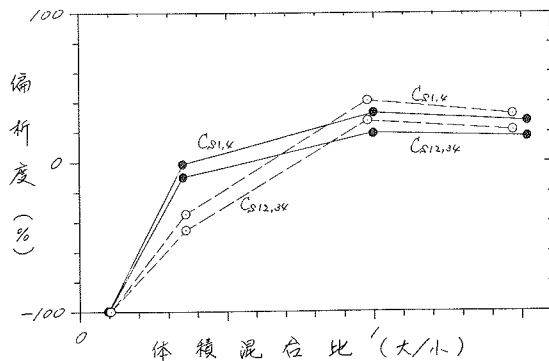


図5 偏析度と混合比の関係。黒丸は水中条件下あり、図4のデータをプロット(速度勾配:3.0/sec)。白丸は乾燥条件(速度勾配:1.5/sec)