

京都大学防災研究所[○]諏訪 浩, 奥田節夫

京都府立大学農学部 小川恒一

石礫を主体に構成されている土石流では、その先頭部分に巨大な石礫が多量に集積している。このために土石流の破壊力が大きく、被害が激甚になっていることが多い。ここでは、焼岳上々堀沢の土石流についての観測事実を呈示して、このような大径礫の粒度偏析の実態を明らかにし、さらにこのような粒度偏析の基本的な特徴を簡単な実験によって再現して検討を加える。

1. 土石流堆の堆積構造 焼岳上々堀沢の扇状地に形成された土石流堆 (debris-flow lobe)

にピットを掘削して1981年に堆積断面を調べたところ、いわゆる *inverse grading* (逆級化成層) の構造を呈していることを既に明らかにしている¹⁾。 *inverse grading* とは、単一堆積層内の上位に粒度の増大と大径粒子の集中が生じている構造とさす²⁾。図1は最下段に断面を示す三つの土石流堆についてピットの調査から判明した堆積物の上層 (surface) と下層 (underground) を構成する岩屑の粒度特性の分布を示す。この調査によると、石礫が主体の盛り上がり型の土石流堆PとJだけでなく、砂礫が主体の平坦型の土石流堆Aにおいても、おおむね *inverse grading* が認められるとともに、大径礫が土石流堆の下流先端に集積している状態 (一種の *sorting*) が明瞭に認められる。

2. 流動中の土石流の岩屑材料 1983年には、実際に流下中の土石流の映像記録から、大径礫が

土石流の先端部へ集積している状況が明瞭に確認された。上々堀沢の土石流は多量の石礫を含む流れであるが、土石流の先頭から後方まで流動材料が均質ではなく、石礫の粒径分布と、流れの中の石礫と砂泥との割合が、先頭から後方にかけて大きく変化する。流下中の土石流の上面 (表面) を真上から写真撮影し、そのフィルムから粒径が5 cm以上の石礫の粒度特性と、5 cm以上の石礫が岩屑材料全体に占める面積率を判読した結果を図2に示す。この図を図3に示すような同じ土石流の流量の時間変化と対照すると、次の二点が指摘される。まず、大径礫が土石流のごく先頭部分 (図3に時刻0~5秒で示す部分に相当) へ多量に集積しており、土石流の後方ほど石礫の粒度が小さくなっていることがわかる。つぎに、土石流本体の先頭部分がほとんど石礫だけで形成されているのに対し、大きな流量が継続する土石流本体の大部分 (時刻約5~50秒付近) と後流 (時刻約50秒以降) はマトリックスを主体とする流れであり、うしろの方ほどマトリックスの比率が高い。しかもマトリックスが認められ始める時刻5秒付近のこの境界部がやや不連続的で非常に明瞭に判別されることが注目された。

3. 粒度偏析過程と非混合過程 大径礫が土石流の先端部へ集積する過程は、観測事実を検討す

る限り、つぎの二つの現象の重複効果として出現している可能性が高い。すなわち、土石流の流下に伴って流れの中で粒度偏析が進行して先端部に大径礫が集積する現象および溪床の大径礫が土石流の中へとり込まれず、土石流の先端部に位置しつづけて (非混合過程)、先端において大径礫の集積がさらに助長される現象である。前者の粒度偏析は次のように説明されており³⁾、理論的に妥当な解釈

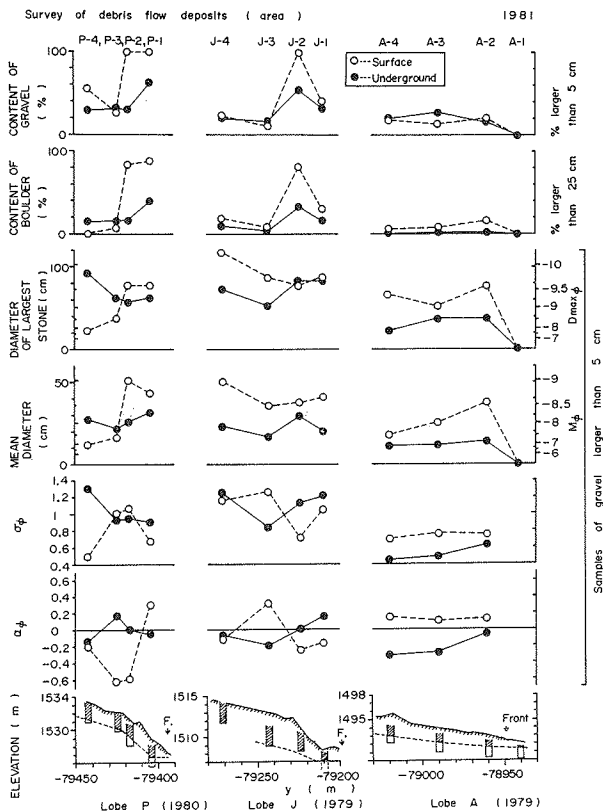


図1 土石流堆を構成する石礫の存在比率と粒度特性。

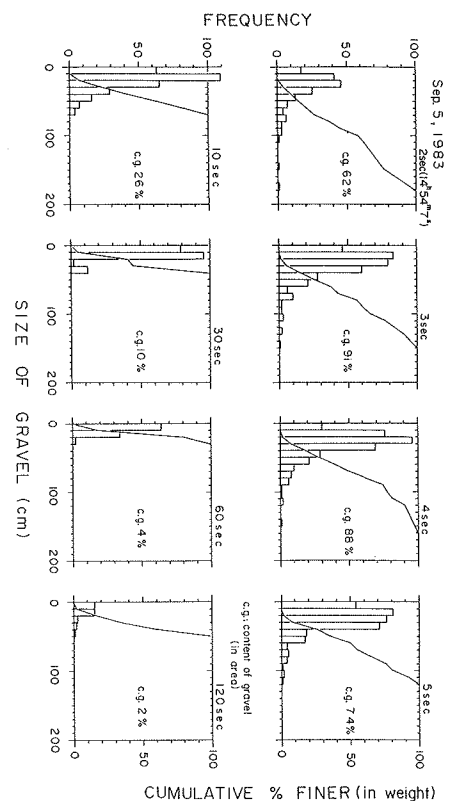


図2 土石流の岩屑粒子の粒度偏析。

と考えられる。まず、土石流の流れの中で大径礫が浮上するという *inverse grading* が生じる（第一の粒度偏析）。ところが、土石流の流速は上方ほど大であるから浮上した大径礫はより早く下流へ運搬されて先端部へ集積する（第二の粒度偏析）。

4. *Inverse grading* の成因

前述の大径粒子が浮上するプロセスは、粒子流中に存在する分散圧力の効果を考慮したモデル³⁾で既にい

図2 土石流の岩屑粒子の粒度偏析。
石礫の粒度分布を棒グラフで、石礫の粒度加積曲線を折れ線グラフで描く。

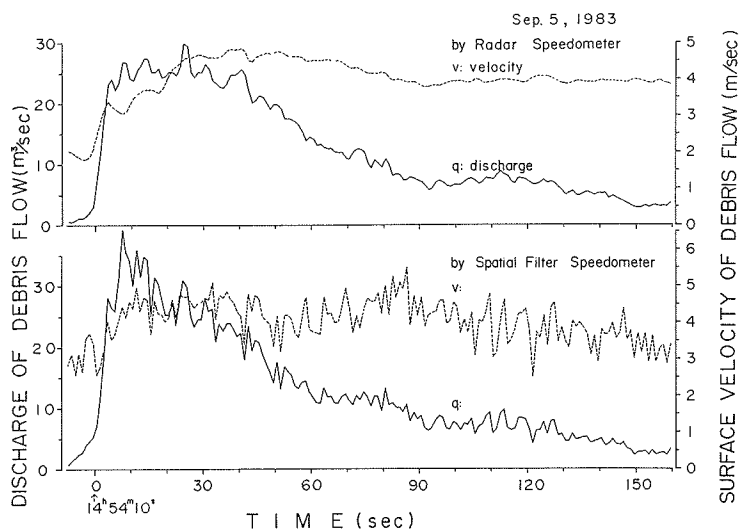


図3 土石流の表面流速とハイトログラフ。

しかし、実際の土石流の観測結果を検討すると、このような分散圧力の効果以外に、kinetic sieving²⁾や底面と大径礫との直接衝突の効果が大きく関与していると推定される。

5. 振動による粒度偏析の特性

一般に粒径が異なる粒子の混合物に十分な振動が加わると、大径粒子の隙間を小径粒子が落下して結果的に大径粒子が浮上するという粒度偏析が進行するが、この現象は percolation⁴⁾ または kinetic sieving と称せられている。土石流は、映像記録や地盤振動記録⁶⁾ から認められるように、その中に非常に激しい乱れを有する流れであるから、大小の岩屑が激しくとみ合う状態の中で、このような kinetic sieving の生じている可能性は非常に高い。そこで、振動を加えて生じる粒度偏析の基本的な特徴を明らかにするため、以下のような実験を行った。試料に加える振動は、土石流においては、大径礫相互の衝突や流路床と大径礫の衝突によって生ずる振動や流れの中に生ずる乱れに対応するが、ここでは厳密な意味での模型実験までは志向していない。

実験では、粒径の異なるガラス球の試料を内径 12 cm、高さ 18 cm の円筒容器に詰め、これに上下方向の振動を加え（振動数 4~40 Hz、振幅 1~24 mm の範囲でコントロール）、図 4 に示すように、偏析後の試料を 6 層に等分し、粒径別に粒子の重量を測定し、図中の式で定義する偏析度⁵⁾を求めた。その結果、以下のようなことが明らかになった。まず、振動による粒度偏析の発生条件は、振動の加速度が 1G を上回ることと、粒径比がある限界値（図 7 から 1.7 と 2.4 の間の値と推定される）より大きいことであった。つぎに、図 5 は粒度偏析の時間的な進行状況を示す。どの実験においても、この例と同様、実験開始のすぐ初期に偏析の進行速度が大きくなり、しばらくして偏析度が最大に達してからは、試料の中に容易にばいりたスケールを持った対流が生じ、その混合効果によって偏析度のやや低下した状態が続く。振動の加速度が大きくなると、偏析の進行速度は著しく大きくなるが、図 6 によると、加速度が大きくなり過ぎると逆に混合効果が生じてきて偏析度の低下することがわかる。図 7 は粒径比が 8 付近までは粒径比の増大につれて偏析度が著しく増大するが、これを越えると偏析度の増大は頭打ちになることを示す。図 8 は三粒径粒子の混合試料においても、大径粒子と小径粒子については二粒径粒子の場合と同様な粒度偏析が生じるのに対して、中粒径粒子に関しては粒度偏析がほとんど見られないことを示している。

以上の実験では、異なる粒径の粒子を等量ずつ混合した試料を用いているが、小径粒子の試料の中に大径粒子を 1 個だけ埋藏しておき、さきの粒度偏析の発生条件下で振動を加えると、やはり大径粒子が浮上してくる。浮上速度は粒径比によってあまり変化せず、振動の加速度の増加に伴って著しく増大する。大径粒子 1 個でもこのように浮上してくる現象の解釈には、前述のような percolation のモデルとは異なる力学モデルが必要になると考えられる。

ここには空気中での粒子の粒度偏析の特性を整理して示したが、同じ実験を試料に水を加えて行くと、偏析は著しく抑制された。しかし、試料に激しい波立ちや乱れが生ずるような大きな振動を加えると、空気中におけるのと同程度の偏析の生じることが確認された。

あとがき 土石流における岩屑の粒度偏析過程の実態を検討し、遂級化の成因のうち、主として kinetic sieving の基本的な特性を明らかにしたが、さらに異なる実験条件を用いて土石流の粒度偏析に関与している複数の過程を総合的に明らかにしていく必要がある。この研究では、建設省土木研究所との共同観測で得られたデータを利用し、文部省科研費補助金

課題番号(58025030)を用いた。

引用文献 1)諏訪ほか(1982),

京大防災研年報, 25B-1, 307~

321 2)Naylor(1980), J. Sed.

Pet., 50, 1111~1116 3)Takahashi

(1980), J. Hydraul. ASCE, 106, 381~

396 4)三輪(1972),粉粒体工学,

朝倉書店, 221~237

5)Williams(1976), Powder Tech.,

15, 245~251

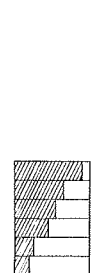
6)奥田ほか(1980),京大防災研

年報, 23B-1, 357~394

はじめ



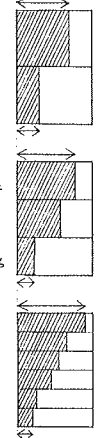
偏析結果



振動

各層での分離を
示すのではなく、
混合率を示す。

評価法



偏析度 (coefficient of segregation)

$$C_s = \frac{P_T - P_B}{P_T + P_B} \times 100$$

... (after Williams, 1976)

$$C_{s/256} = \frac{P_{12} - P_{56}}{P_{12} + P_{56}} \times 100$$

$$C_{s/6} = \frac{P_1 - P_6}{P_1 + P_6} \times 100$$

図4 粒度偏析結果の評価方法。

(偏析度の定義, 二粒径粒子の等量試料)

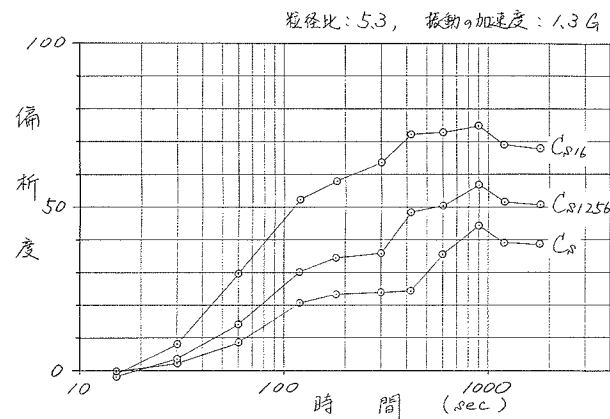


図5 加振時間の経過に伴う偏析度の変化。

(二粒径粒子の等量均質混合試料)

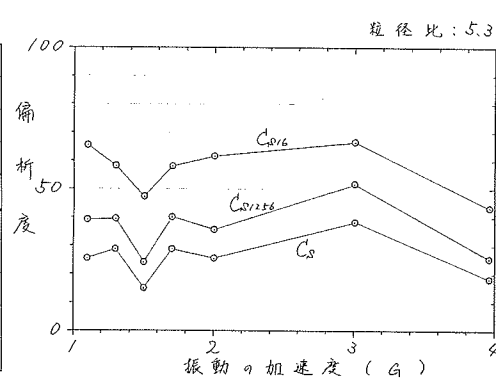


図6 偏析度と振動の加速度との関係。

(二粒径粒子の等量均質混合試料)

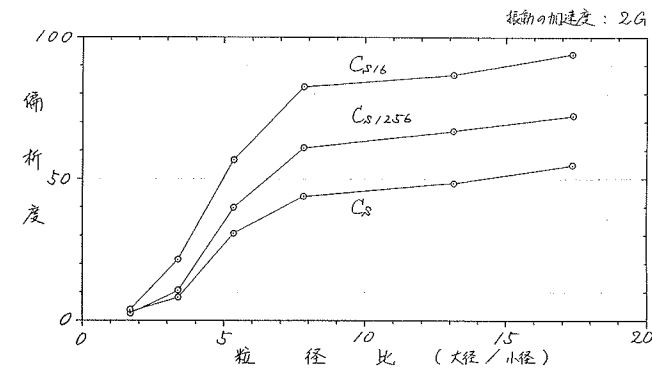


図7 偏析度と粒径比の関係。

(二粒径粒子の等量均質混合試料)

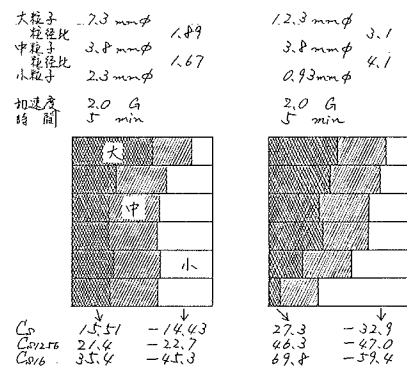


図8 三粒径粒子の等量均質混合試料

料における粒度偏析。