

# 土石流における岩屑の粒度偏析過程 その1

—大径礫の先端集積と動的篩作用による逆級化—

諏訪 浩・奥田 節夫・小川 恒一

## SIZE SEGREGATION OF SOLID PARTICLES IN DEBRIS FLOWS, PART 1

### —ACCUMULATION OF LARGE BOULDERS AT THE FLOW FRONT AND INVERSE GRADING BY KINETIC SIEVING EFFECT—

By Hiroshi SUWA, Setsuo OKUDA and Kouichi OGAWA

#### Synopsis

Debris flow has the larger destructive force and brings about the more catastrophic disaster due to its distinctive accumulation of large boulders to the flow front. The observed facts about size segregation were explained with the data on debris flows at Mt. Yakedake, Japan. Then the mechanism and basic properties of such segregation were discussed with the aid of laboratory experiments. This accumulation was ascribed to the size segregation in the flow and to the un-mixing process of newly entrained large boulders with the main flow. The former process is known to occur with both the inverse grading and the condition of higher flow velocity at the upper layer in the flow.

The mechanism of inverse grading was already evaluated with the dispersive pressure effect, but other effects by kinetic sieving and collision of large boulders to the valley bottom are regarded also effective. So the experiments on size segregation were carried out by vibrating the particle mixture of different sizes in order to study the elemental properties of kinetic sieving, and the following results were brought about: the occurrence condition of size segregation, the relationships between segregation rate or segregation velocity and acceleration of vibration or size composition of particles.

#### ま え が き

土石流の類型は多量の石礫を含むもの（石礫型土石流）と石礫の含有量が少ないもの（泥流型土石流）とに大別されるが、これら二者の中間型も存在する。これらのうち、石礫型の土石流はその先頭部に多量の石礫、とくに最大礫を含む大径礫が集積していることに特徴がある。このため、規模が同程度の場合には、他のタイプに比べて石礫型の土石流の破壊力は一層大きいので、土石流災害による被害はよりひどくなることが多い。

本論文では、まず長野県焼岳上々堀沢を流下する土石流についての観測事実と、同じ上々堀沢の扇状地に形成された土石流堆の堆積構造についての調査結果とを示して、このような大径礫の粒度偏析の実態を明らかにする。つぎに、既往の文献のレビューを交えながら、土石流における岩屑の粒度偏析の成因を検討する。土石流における粒度偏析の最大要因はいわゆる inverse grading の過程と考えられ、流れの中の乱れや流路地盤の振動によってもこのような inverse grading が引き起こされると思われる。そこで振動によって生じ



Photo 1-2 3 sec.



Photo 1-4 10 sec.



Photo 1-1 2 sec.; the flow front.



Photo 1-3 5 sec.; the third in the right hand perfectly lacks the matrix in the interstices among the gravels

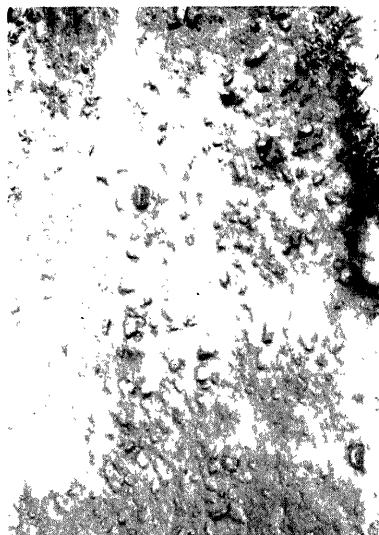


Photo 1-6 30 sec.

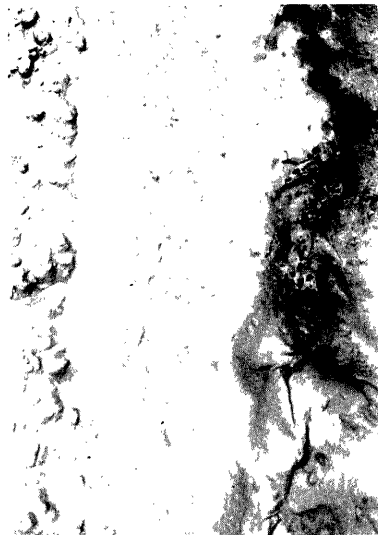


Photo 1-8 90 sec.

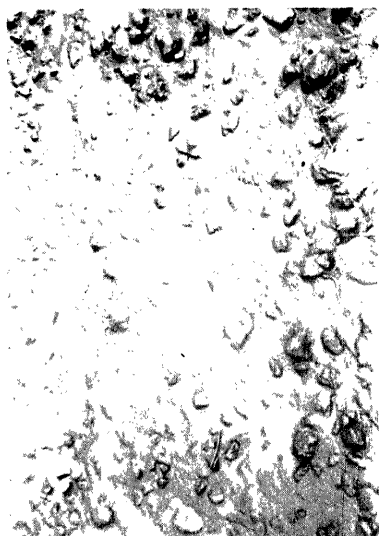


Photo 1-5 20 sec.



Photo 1-7 60 sec.

Photo 1 Top surface of a debris flow on Sept. 5, 1983 at Kamikamihori valley of Mt. Yakedake. A selected series of photos automatically taken every one second. The actual scale of this view field is 4.7 meters by 6.6 meters, and the flow direction is from the left to the right.

る粒度偏析の基本的な特徴を実験によって再現して検討を加えた。

石礫型土石流において大径礫が流れの先頭部へ集積することは、数少ない目撃談の伝聞によって以前から知られていたが、実際の土石流を観測してその実態が映像記録されるようになったのは焼岳<sup>1)</sup>や桜島<sup>2)</sup>における観測が軌道にのってからである。しかし、本論文で報告するような粒度偏析の詳細は、これらの観測によってもこれまでは計測できていなかった。

堆積学の分野では土石流堆積物における *inverse grading* についての種々の研究があり、Naylor<sup>3)</sup>によってそのメカニズム研究のレビューがなされている。土石流の実験的研究においては、Takahashi<sup>4)</sup>が粒子流中に存在する分散応力の効果を考慮したモデルで大径礫の浮上機構を説明している。Hirano ら<sup>5)</sup>は、独特の実験装置を用いて作り出した土石流において、大径礫が流れの先頭部へ集積し、保持される状況を観察している。いっぽう、土石流の現象とは無関係に、工業生産のラインにおいて生じる粒度偏析を防止したり、工学的に粒度偏析を利用する立場から、粉体工学の分野では混合粒径の材料に振動や容器の回転などの条件を与えて発生する粒度偏析や密度偏析の実験が行われており<sup>6,7)</sup>、三輪<sup>8)</sup>や Williams<sup>9)</sup>によってそれらの研究成果がレビューされている。

現実の土石流においては、さきの分散応力の効果だけでなく、Naylor の言う *Kinetic Sieving*<sup>3)</sup> や、境界面における衝突効果などを評価して、その粒度偏析の機構を総合的に解釈する必要がある。そこで、ここでは手始めに振動を加えて生じる粒度偏析の基本的な特徴を定量的に整理するための実験を行った。

## 1. 流動中の土石流における粒度偏析

焼岳上々堀沢に発生する土石流は典型的な石礫型の土石流であるので、土石流の先頭から後方まで流動材料が一様均質の状態とは著しく異なり、石礫の粒径分布と流れの中に細粒材料からなるマトリックスの占める割合が大きく変動している。この点については、これまでの観測データによってある程度把握されている<sup>1)</sup>が、これまでは土石流が床固め砂防ダムを越流するところを正面から遠望するアングルで撮影された写真を分析していたため、土石流のごく先頭部の材料構成しか判読できなかった。ところが、1983年の観測では **Photo 1** に示すように、流下中の土石流の表面を真上から至近距離で写真撮影できたので、土石流の材料構成に関してこれまでよりずっと詳細な情報を得ることができた。

**Fig. 1** には、1983年9月5日に発生した土石流の鮮明な写真から判読された粒径 2 cm 以上の石礫の粒径別頻度分布（棒グラフ）と粒度加積曲線、および粒径が 2 cm 以上の石礫が流動材料全体に占める面積率の値を、**Fig. 1** のそれぞれの図の上部に記された写真の撮影時刻に対応させて示した。ここに、石礫の粒径は個々の石の平均径ではなく、個々の石の最大径を代表径として用い、この粒径を直径とする球の重量を整理して粒度加積曲線を求めている。写真から石礫の粒径を求めるところでは、土石流の水位変化に基づく縮尺変化を考慮し、拡大率について高さの補正を施した。

この土石流の表面流速、流量、流れの平均厚みの時間変化を **Fig. 2** に示す。この図には **Fig. 1** に記した石礫の占める面積率と最大礫の粒径のほか、**Fig. 1** の粒度加積曲線から求められる岩屑の 84% 粒径、50% 粒径（中央粒径）および 16% 粒径の時間変化も併せて示した。これらのグラフを対照すると、次の二点が明らかになる。まず、土石流のごく先頭部分（時刻 2～6 秒あたり）へ大径礫が多量に集積しており（**Fig. 2** の上・中段または **Fig. 1** の粒度加積曲線に表現）、連続する土石流本体の後方ほど石礫の粒度が小さくなっていき（時刻 10～20 秒あたり）、さらに後方の流れにおいてはほぼ一定した小さな粒度が維持されていることがわかる（**Fig. 2** の上段に表現）。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 6 秒～40 秒あたり）と後続流（時刻約 40 秒以降）は粒径 2 cm 未満の細粒砂礫の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く、石礫の比率が低下している状況が **Fig. 2** の中段のグラフからわかる。しかも、**Photo 1-3** に示されるように、マトリックスが認められ始める時刻 5 秒付近において、材料構成に関して明瞭な境界の存在していることが注目される。すなわち、この **Photo 1-3** の右三分の一までの土石流先端部には石礫の間隙にマト

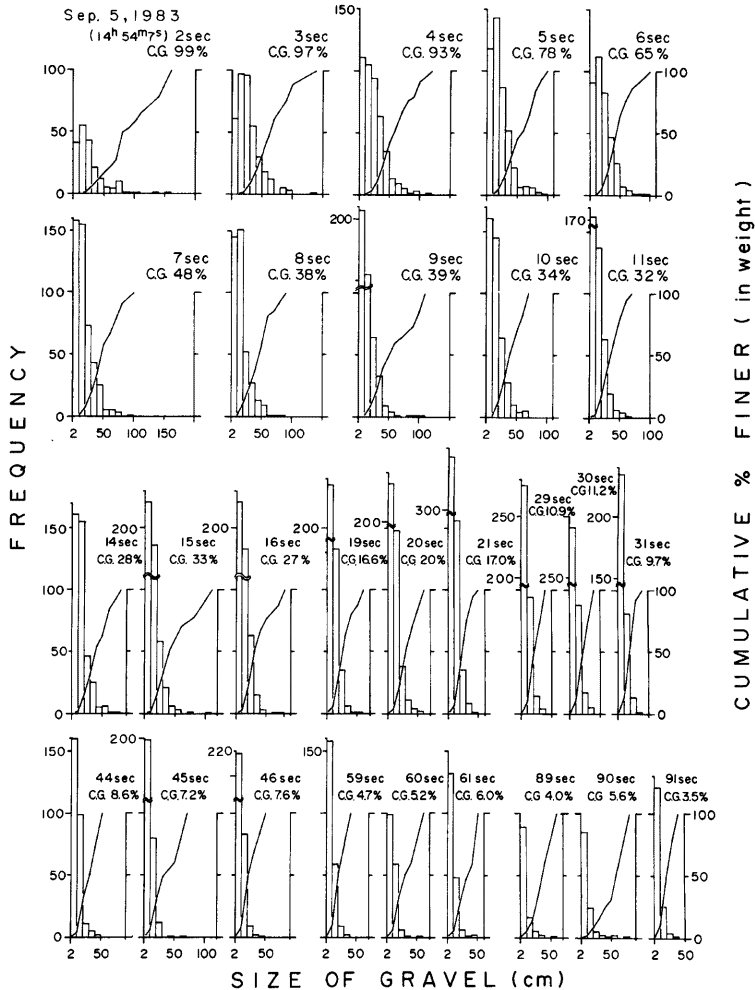


Fig. 1 Size segregation of gravels in a debris flow. Times indicated with the seconds correspond to the times in the captions of Photo 1. Percentage of C. G. means the gravel contents in area on the surface of this debris flow.

リックスがほとんど見当たらないのに対し、左側三分の二および後続部においては石礫の間隙を既にマトリックスが完全に埋めている。ただし、この境界はあくまでも流れの表面におけるものであり、下層においては筆者らの実験<sup>10)</sup> などにおいて既に認められているように、マトリックスのフロントは下層部においては表面における境界線から下流側へ石礫群の中を楔状に潜り込むように形成されているものと推定される。いずれにしても、マトリックスの有無という点でこのような明瞭な境界の存在することは土石流の構造および流

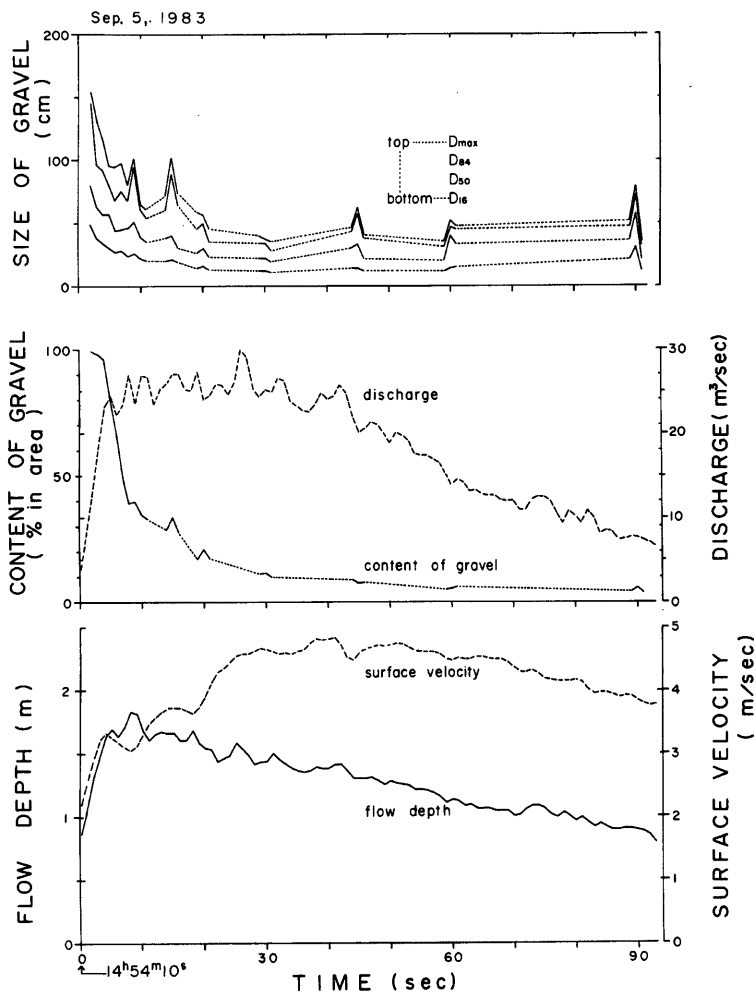


Fig. 2 Time changes in the size factors of gravel and the content of gravel larger than 2 cm size, accompanied with discharge, surface velocity and flow depth of the debris flow

動機構を検討する場合に大いに配慮される必要がある。

## 2. 土石流堆における粒度偏析

焼岳上々堀沢の扇状地に形成されている土石流堆の堆積断面を調べたところ、いわゆる inverse grading の構造を呈していることを既に明らかにしている<sup>11,12)</sup>。inverse grading (逆級化) とは単一堆積層または実際の流れの中で、上方に向けて岩屑の粒度が増大していたり、上方に向けて粒径の大きな岩屑が集中してい

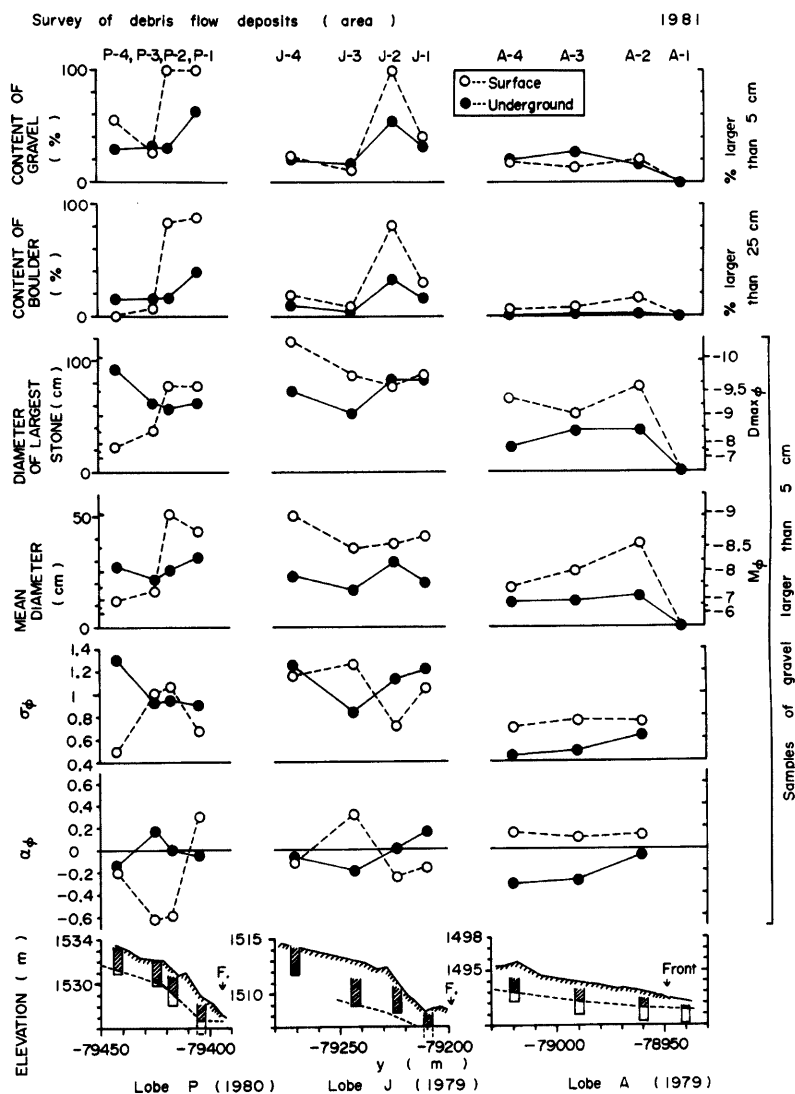


Fig. 3 Spatial distributions of gravel content, boulder content and size indexes of gravel in the samples of debris-flow lobes, arranged in the horizontal position corresponding to the location of the survey pits in the bottom diagram.  $M_\phi$ :  $\phi$  mean diameter,  $\sigma_\phi$ :  $\phi$  deviation,  $\alpha_\phi$ :  $\phi$  skewness calculated with the method after Inman (1952)

る構造を指す<sup>3)</sup>。

この沢では、流出量が  $10^3 \text{ m}^3$  オーダ以上の規模の土石流は扇状地に到達し、そのどこかに堆積しておおむね縦長の土石流堆 (debris-flow lobe) を形成する。土石流堆には、土石の集積度が高い状態で扇頂から扇央へかけての区域に形成される盛り上がり型と、細粒土砂を主体に石礫が分散堆積した状態で扇央から扇端にかけて形成される平坦型とが見られる。平坦型の土石流堆は terminal deposits (末端堆積物) であるが、盛り上がり型の土石流堆は lateral deposits (側方堆積物) である場合とがある。

そこで、扇状地の上・中・下流部分というように、堆積位置の全く異なる三つの土石流堆を選び (それぞれ Fig. 3 の下段に lobe P, J, A として示すものに対応)、ピットを堀削して堆積材料の粒度の空間分布すなわち堆積構造を検討した<sup>11,12)</sup>。Fig. 3 は最下段にそれぞれの縦断面でその形を示す三つの土石流堆 (lobe P と J は盛り上がり型で、A は平坦型) の各ピット調査点において、上層 (図中に surface と記す) と下層 (underground と記す) を構成する粒径が 5cm 以上の岩屑の粒度特性の空間分布を示す。岩屑の粒径はピットの壁面の写真から個々の石礫の最大径を読みとって代表粒径とした。この図において、最上欄のグラフは、盛り上がり型の土石流堆の先頭部では粒径が 5cm 以上の石礫の比率 (岩屑全量に対する) が下層より上層で大きいことを示す。上から第二欄のグラフは、粒径範囲を 25cm 以上の巨礫に限定して比較すると、大径礫が上層に集中するという上述の傾向がさらに明瞭に現われることを示し、第三・第四欄のグラフと併せて検討すると、これら三つの lobe の主要部分ではおおむね 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中するという一種の sorting の状態が明瞭に認められる。

### 3. 大径礫の偏析過程と非混合過程

土石流の先頭部へ大径礫が集積する現象は、以上の観測事実と後述する理由により、つぎの二つの過程が重複して生じていると想定される。すなわち、一つは土石流の流下に伴って、もともと流れを構成していた岩屑のうち粒径の大きなものが流れの先頭部へ集中する現象 (大径礫の粒度偏析過程) であり、もう一つは、溪床に堆積している大径礫が土石流の流下にともなって流れの中に完全にはとり込まれず、土石流の先端部に位置しつつけて (大径礫の非混合過程)、大径礫がだんだん集積してくる現象である。

Fig. 2 の最上欄のグラフに示されているように、土石流に含まれている石礫の粒度が流れの前方へ向けておおむね漸増していることは、前者の粒度偏析過程の存在を強く支持するものである。そして、この過程については既に Takahashi によって次のように説明<sup>4)</sup>されており、基本的に妥当な解釈と考えられる。まず、土石流の流れの中で大径礫の浮上すなわち inverse grading が生じる (第一の粒度偏析)。この場合、粒径の大きいものほど上位に、あるいは上方へ速く浮上する。ところが、流れの上層ほど流速が大きいので、粒径が大きいものほど流れのより前方へと集まってくる (第二の粒度偏析)。

いっぽう、Photo1-1~1-3 において示されるように、土石流の先端部分はマトリックスをほとんど含まない石礫だけの集積した状態を呈している。これらの石礫はもとはマトリックスとの混合物として流れの先頭部分を形成していたが、土石流の流下につれて石礫が分離してきてこのような状況を呈するに至ったとも考えられるが、上述の大径礫の非混合過程に起因している可能性も高い。すなわち、この沢の谷底には大径礫を含む岩屑の堆積物が多量に存在しているため、谷の上流で発生した土石流は流下するにつれてこれらの岩屑を流れにとり込みながら、その規模を拡大 (成長) していく、このとき、細粒材料は流れの中に容易にとり込まれるのに対し、大径礫は流れ本体の中にはとり込まれ難く、先端部に留まり易いため、このようなマトリックスを欠く石礫の集積物の出現が助長されるものと考えられる。ちなみに、Hirano ら<sup>5)</sup>の土石流の室内実験においては、流れの中からいったん先端へ到達した岩屑のうち、細粒材料は再び流れの中にとり込まれ易いのに対し、大径粒子は容易にはとり込まれない状態が観察されている。

### 4. Inverse grading の成因

前節において述べた、土石流先端部への大径礫の集積を招く二要因のうち、前者の岩屑に関する粒度偏析

過程に着目すると、土石流の流れの中で大径礫が浮上する現象すなわち *inverse grading* のプロセスを解明することが重要になる。ここで対象としているような石礫型の土石流に関しては、大径礫の浮上を促進する要因として、①粒子流における分散応力の効果と ②kinetic sieving の効果および ③大径礫の流路底面衝突効果とが想定される。

これらのうち、①の要因を考慮したモデルで、Takahashi は土石流中における大径粒子の浮上機構に理論的な検討を加えている<sup>4)</sup>。流れの中で速度勾配について上下方向の分布が評価でき、大径礫の粒径が流れの厚みに対して比較的小さい場合にはこのモデルによる解釈も評価できると思われる。つぎに、②の要因は混合粒径の粒子の混合物に振動が加えられたり、激しい乱れが存在する場合に、大径粒子の間隙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の効果であり、流れの中の速度勾配には無関係に、粒子間の相対的な粒径の差異と流れの乱れや振動の大きさが影響すると思われる。③の要因はとくに最大径級の石礫について重要になる。すなわち、Fig. 2 の例に限らず、石礫型の土石流の厚みは一般に流れに含まれる最大径級の石礫の粒径とほぼ同程度であるため、最大径級の石礫は流路底面と比較的頻繁に直接衝突する。このような衝突はたとえ流路床が滑らかな場合でも生じるが、実際の流路床は大径礫を含む溪床堆積物による凹凸や基岩の凹凸のためにあまり滑らかではないから、この衝突がいっそう効果的に作用して、大径礫は流路床から反発力を受けるような状態になり、大径礫の浮上が助長されと考えられる。なお、②の効果については、たとえば大径粒子が一個であっても粒子の再配列が可能な流動化条件のもとでは大径粒子の浮上していくことが次節の実験において示される。

したがって、土石流に含まれる最大径級の石礫の浮上は主として上述の②や③の効果に起因し、他の大径礫や岩屑全体に関する *inverse grading* は主として①や②の効果に起因するものと推定される。以上の効果のうち、②については土石流に関しては定性的に記述<sup>9)</sup> されているだけで定量的な評価が行われていない。③の効果については本論文で初めてとりあげたため、実証は今後の課題である。ここでは、手はじめに②の効果の基本的な特徴を整理するための実験を行ったので次節においてその結果をまとめる。

## 5. 振動による逆級化の実験

一般に、混合粒径の粒子の混合物に十分な振動が加えられるなどして、試料が流動化したり粒子の再配列が生じたりするときには、大径粒子の間隙を小径粒子が落下していき、結果的に大径粒子が浮上するという一種の粒度偏析の進行することが知られているが、この現象は粉体工学のほうでは *percolation* (パーコレーション<sup>8)</sup>) と称せられ、堆積学のほうでは *kinetic sieving*<sup>9)</sup> と称せられている。実際の土石流の映像記録や、土石流の流下によって生ずる地盤振動の記録<sup>10)</sup> から認められるように、土石流はその中に激しい乱れを有する流れであるから、流れの中の大小の岩屑が激しくもみ合う状態の中で、このような *kinetic sieving* の生じている可能性は非常に高い。実験では試料に振動を加えて粒度偏析を発生させた。この振動は、実際の土石流に関しては、大径礫相互の衝突や大径礫と流路底との直接衝突によって生じる流路地盤の振動や、流れの中に生ずる乱れの大きさに対応するが、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。

なお、このような異粒径粒子の混合物の粒度偏析に関しては、池田ら<sup>6)</sup> が試料に振動を加えて、林ら<sup>7)</sup> がくり返し衝撃を加えて実験を行っている。それらの研究では、粒度偏析を巨視的に検討するために、主として  $10^{-1}$  ないし  $10^0$  mm オーダの細かい粒子が用いられ、小さなスケールで、しかも振動の加速度や衝撃の大きさが一定のもとでの実験が行われている。これに対し、本実験では  $10^0 \sim 10^1$  mm オーダの比較的大きな粒子を用いてなるべく大きなスケールで、しかも粒径比や振動の加速度を大きく変化させて実験を行い、さらに、大径粒子の浮上過程を集団的なものと単一的な現象とに分離してより詳細に検討することを目ざした。

### 5.1 実験方法

実験では、粒径の異なるガラス球の試料を円筒容器に詰め、この円筒容器を上下方向に振動させ、偏析後の試料を回収して偏析の程度や偏析の進行速度などを求めた。

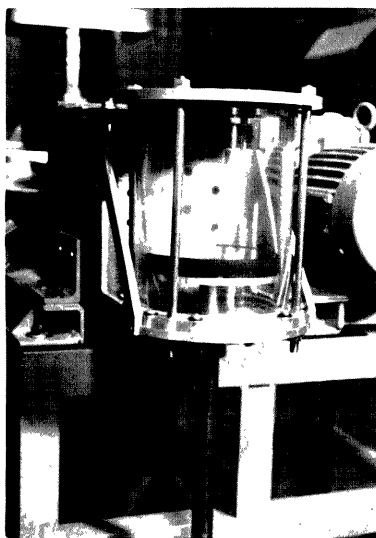


Photo 2 Specially devised vibrator for size segregation test, produced by Sanwa-Seiki Co.

使用した実験装置は三和精機研究所製の級化過程実験水槽 GE1 型である。装置の構成は、無断変速モータの回転運動が往復運動に変換され、Photo 2 の中央に見える円筒容器が単振動するようになっている。円筒容器の底面は Photo 2 に写っているようなピストンになっており、偏析後の試料はこのピストンを上昇させることによって任意の厚みに分割して回収できる。この実験装置の主な仕様としては、円筒容器の内径 120 mm, 高さ 180 mm, 振動数 4~40 Hz, 振動の全振幅 1~24 mm, 振動方向は 0° (鉛直), 15°, 30°, 45° に可変 などがあげられる。振幅は実験のまえに設定して測定しておき、振動数は実験中にモニターしながら一定に保持した。試料には粒径が 0.93 mmφ から 29.5 mmφ までのガラス球 (小さいものはガラスビーズ, 大きいものはビー玉, 平均密度はいずれも 2.48 g/cm<sup>3</sup>) を用いた。

実験材料に関しては、試料の混合条件、粒径比、振動の加速度および振動時間などを変化させた。二粒径試料を等重量用いた実験を主体にしたが、この場合、Fig. 4 の左寄りに示すように、試料の混合あるいは充填の初期条件を三通りに変えても、偏析度が最大に達して以降はほぼ同一の偏析状態を示すことが確認され

たので、均質一様混合の条件で実験を行った。粒径比は大径粒子の直径の平均と小径粒子の直径の平均との

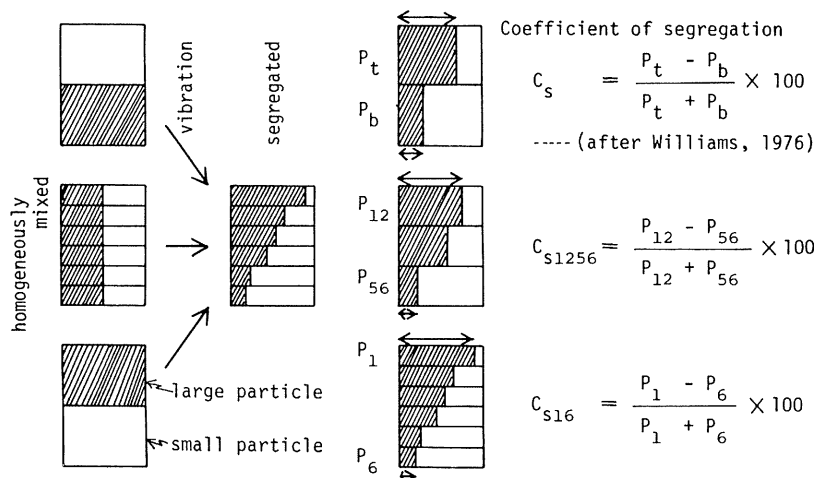


Fig. 4 Evaluation method for size segregation, and the definition on the coefficient of segregation. Portions with oblique lines  $P_t, P_b, P_{12}, \dots$  mean the weight percentages of large particle in each layer.

比の値を用い、1.67から17.3の間で変化させた。振幅はこれにまとめる実験においては4.09mmに設定し、振動数を変化させて振動の加速度をコントロールしたが、その値は地球の重力の加速度を1Gとして最大4Gまでの範囲で変化させた。

偏析後の試料は上下方向に6層に等分し、粒径別に粒子試料の重量を測定し、Fig. 4に示すWilliamsの式<sup>9)</sup>およびこれに準じる式で定義される偏析度 (coefficient of segregation) を求めて粒度偏析の程度を評価した。この偏析度は、完全な混合状態では0であり、完全な偏析状態すなわち上半分が大径粒子で下半分が小径粒子に分離した状態では100となる。

## 5.2 実験結果と考察

以下ではとくに断らない限り、大小二粒径粒子の等重量均質混合試料を用いて行った実験の結果について述べる。振動による粒度偏析の発生条件は振動の最大加速度が1Gを上回ることと、粒径比がある限界値より大きいことであった。この限界粒径比は加えられる振動の加速度の大小によって多少変化することが予想されるが、振動の加速度が2Gの場合にはFig. 7によってこの限界粒径比は1.7と3.4の間にある値であることがわかる。

粒度偏析の時間経過の一例をFig. 5に示す。この実験では粒径比5.3の試料に振動加速度1.3Gの振動が加えられており、振動開始後30秒から60秒の時期に偏析の進行速度が最大となり、時刻約900秒後に偏析度が最大に達してのち、偏析度がやや低下した状態がつづく。これは試料の中に円筒容器いっぱいのスケールを持った対流が生じて、その混合作用が影響するためである。この対流には容器の振動特性、形状、容器境界面における摩擦および粒度偏析の結果生じるみかけ密度分布の偏りなどの要因が関与しているものと推定される。Fig. 5～7における三つの偏析度の大小関係からうかがえるように、大径粒子の比率はおおむね試料の上層ほど大きくなっている。とくに偏析度が最大の時点では、表層においては2～5粒径分の厚みで大径粒子が集積し、この部分では小径粒子をほとんど欠いていた。その下の中間層ではほぼ連続的なinverse gradingが形成されており、底面に近いところでは逆に小径粒子ばかりになっていることが注目された (Fig. 10の左側部分を参照)。

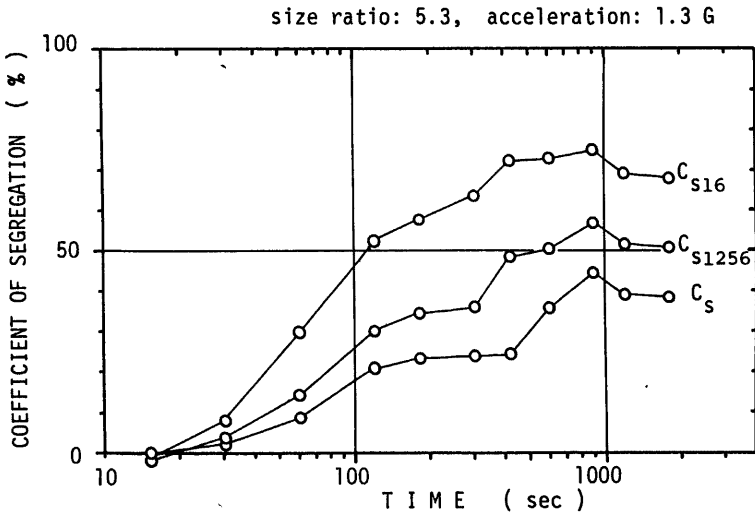


Fig. 5 Time changes in the coefficients of segregation. Size ratio means the diameter ratio of large particle to small particle.

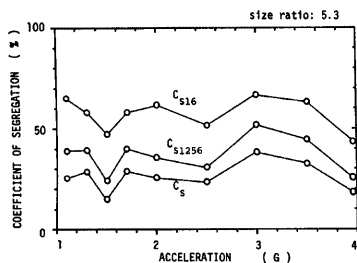


Fig. 6 Changes in the coefficients of segregation versus the acceleration of vibration delivered to the sample

振動の加速度を 1G から漸時増大していくと偏析の進行速度は著しく増大するが、Fig. 6 によると偏析度の最大値はあまり系統的には変化しないが、振動の加速度が大きくなりすぎると大きな振動による混合作用の影響でやはり偏析度は低下する。加速度が 1.5G や 2.5G の辺りに偏析度が極小値をとるところがあるが、これは装置や試料に固有な振動特性との関係で上述の対流現象が高進するためらしい。

粒径比が増大すると、一般に偏析度も増大する。振動の加速度を一定の 2G とし、試料の粒径比をだんだん増大して各実験における偏析度の最大値を求めて示すと Fig. 7 のようになる。この図は、粒径比が 7.8 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、粒径比がこれより大きくなると偏析度の増大が

頭打ちになることを示す。この限界粒径比を  $r_s$  とし、さきの偏析の発生条件を与える限界粒径比を  $r_k$  とすると、 $r_k$  は動的篩作用限界粒径比、 $r_s$  は静的篩作用限界粒径比と称されるべきものである。すなわち、粒径比が 1 から  $r_k$  の間の値では振動を加えても粒度偏析が起こらないが、 $r_k$  をこえると粒度偏析が起こるようになり、粒径比の増大とともに偏析度が急激に増大する。しかし、粒径比が  $r_s$  を越えると偏析度の増大は鈍化する。ちなみに、振動などを与えない静止状態において小径粒子が大径粒子の間を落下できる限界粒径比を求めたところ、 $r_s$  の値に一致するという注目すべき結果を得た。なお、 $r_k$  についての本実験の結果は林らの実験<sup>7)</sup> による値 2.5 などとほぼ同程度である。

以上に二粒径材料に関する実験の結果を整理したが、三粒径粒子の等重量混合試料に関する実験を行ったところ、二粒径材料の場合と定性的には同様の結果を得た。ただし、Fig. 8 に示すように、三粒径粒子のうち大粒径粒子と小粒径粒子については顕著な粒度偏析が生じるのに対し、中粒径粒子に関しては粒度偏析がほとんど見られなかった。

これまでは異なる粒径の粒子を等量ずつ混合された試料における粒度偏析現象すなわち大径粒子について

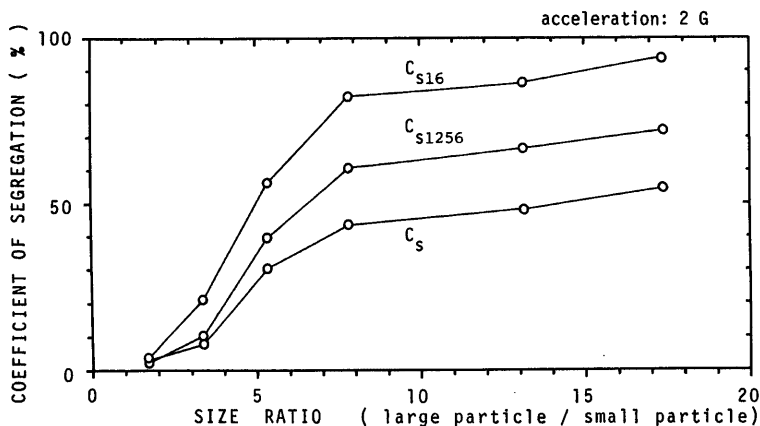


Fig. 7 Changes in the coefficients of segregation versus the size ratio of the particles

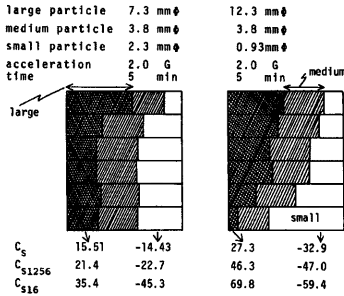


Fig. 8 Size segregation in the samples of particle mixture with three different sizes

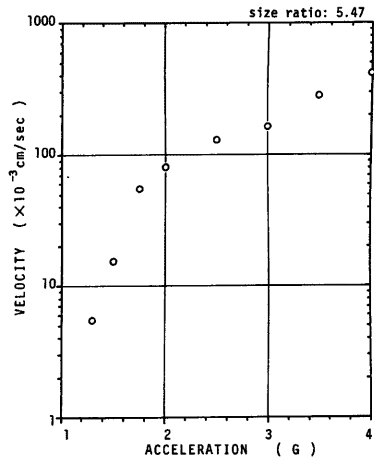


Fig. 9 Velocity of upward motion of a large particle among the small particle layer versus the acceleration of vibration delivered to the layer

はその集団的な浮上現象の実験結果について説明を加えてきたが、つぎに小径粒子の試料の中に大径粒子を1個だけ埋積しておき、さきの粒度偏析の発生条件下で振動を加える実験を行った。すると、大径粒子は単独でも必ず浮上してきた。この場合の大径粒子の浮上速度は粒径比を変えてもほとんど変化せず、振動の加速度を漸増すると Fig. 9 に示すように浮上速度は著しく増大する。大径粒子が単独でこのように浮上する現象は従来の kinetic sieving の概念とはやや異なっている。すなわち、kinetic sieving は大径粒子の間隙が振動などによって広げられて、小径粒子がその間隙を落下していくことに起因しているのに対し、大径粒子1個の単独での浮上現象は、振動によって大径粒子が上方に跳躍する度に、大径粒子の下方にできる隙間が小径粒子の再配列によって埋められていくことに起因していると考えられる。したがって、振動による粒度偏析はこれら大径粒子の集団的浮上現象と単独的浮上現象という二つの要因の重複過程として進行しているものと考えられる。

以上では、すべて試料に水を加えない条件すなわち乾燥状態で行った実験について説明してきたが、同じ実験条件で試料に水を加えて振動を加える実験を行うと、Fig. 10 に一例を示すように、粒度偏析が著しく抑制されることがわかった。水が加えられた条件でも、容器の底面付近では大径粒子と底面との衝突効果によって、表面付近では波立ちの効果によって、局所的な粒度偏析が生じるものの、試料の内部においては粒子の再配列が著しく抑制されるために粒度偏析が生じ難い。しかし、実験装置の円筒容器とほぼ同じ容量の別の透明容器に同じ試料を詰め、さらに大きな振動や不規則な振動を加えて、表面の波立ちを激しくするとともに、試料の内部にも乱れや流動状態が生じるようにすると（手で容器を上下に激しくシェイク）、むしろ乾燥状態における場合よりも著しい粒度偏析を生じることがわかった。

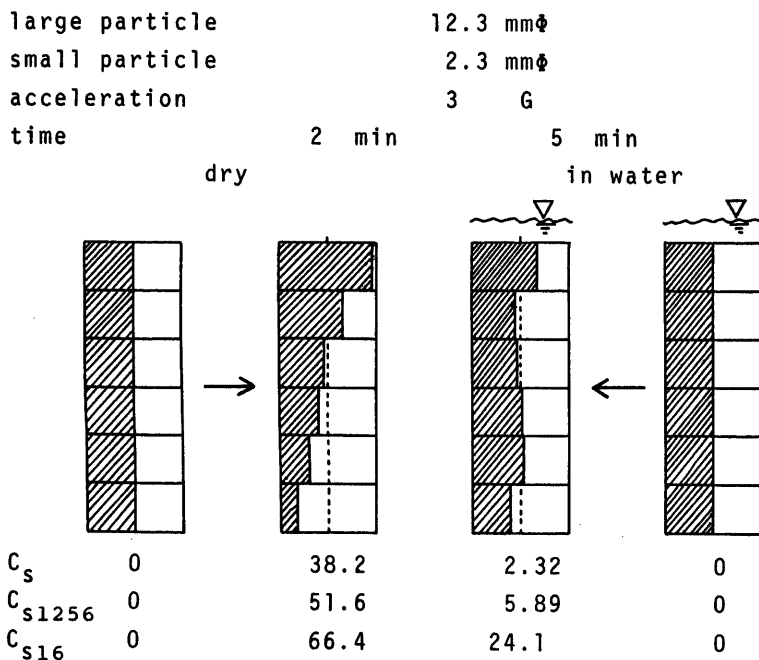


Fig. 10 Comparison of two conditions of size segregation either with or without water

## ま と め

土石流における岩屑の粒度偏析の実態を検討し、粒度偏析を支配する一要因としての逆級化の成因のうち、主として kinetic sieving の基本的な特性を実験によって明らかにした。流動中の土石流においては流れの構成材料がこれまでの想像以上に不均質であり、とくに大径礫が流れの先頭へ著しく集積していることが注目された。そして、大径礫の集積を土石流の流動に伴う流れ内部での粒度偏析現象と大径礫の非混合現象とによって解釈した上で、粒度偏析現象の支配的要因としての inverse grading のプロセスを検討した。inverse grading は、定説化しつつある粒子流中の分散応力による作用以外に、kinetic sieving の効果や底面衝突効果によっても助長されることを主張し、主として kinetic sieving について、試料に振動を加えて生じる粒度偏析の実験を行ってその基本的な特徴を整理した。ここに説明したような kinetic sieving による大径粒子の集団的浮上や、大径粒子の単独浮上現象は、必ずしもこのような振動によらずとも、試料粒子に活発な再配列を促がすような試料の流動化条件が揃えば同様に inverse grading を引き起こすものと考えられる。したがって、これらの現象は流路の振動に伴い、それ自体の内部に激しい乱れを伴う土石流においても実際に存在していると考えられる。しかし、本篇 3 節および 4 節の冒頭に記したように、実際の土石流の粒度偏析には複数のメカニズムが関与しているものとみられるから、これらのプロセスを総合的に明らかにして、その力学的なメカニズムを解釈していくことが重要である。

## 謝 辞

文献検索に関して京都工芸繊維大学 荒川正文教授の援助を受け、同時に同教授から当研究に対して有益なご助言をいただいたことを記し、同教授に謝意を表する。実際の土石流における粒度偏析については、焼岳上々堀沢において建設省松本砂防工事事務所と共同で行っている観測で得られたデータを利用した。なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金 自然災害特別研究(2)課題番号58025030の交付を得て実施された。

## 引 用 文 献

- 1) 奥田節夫・諏訪 浩・奥西一夫・仲野公章・横山康二：土石流の総合的観測 その3, 京大防災研年報, 20号 B-1, 1977, pp. 237-263.
- 2) 建設省九州地建大隅工事事務所：桜島土石流調査報告書, 桜島砂防技術資料, 1982, pp. 1-227.
- 3) Naylor, M. A.: The origin of inverse grading in muddy debris flow deposits — a review, Jour. Sed. Petrology, 50-4, 1980, pp. 1111-1116.
- 4) Takahashi, T.: Debris Flow on Prismatic Open Channel, Jour. Hydraulics Div. ASCE, 106, 1980, pp. 381-396.
- 5) Hirano, M. and M. Iwamoto: Experimental Study on the Grain Sorting and the Flow Characteristic of a Bore, Memoirs Fac. Engi. Kyushu Univ., 41-3, 1981, pp. 193-202.
- 6) 池田千尋・津々見雄文・川北公夫：粉粒体の振動による偏析現象, 材料, 19, 1970, pp. 579-582.
- 7) 林 俊孝・笹野睦雄・津々見雄文・川北公夫・池田千尋：粉粒体のタッピングによる流動と偏析, 材料, 19, 1970, pp. 574-578.
- 8) 三輪茂雄：粉粒体工学, 朝倉書店, 1972, pp. 221-237.
- 9) Williams, J. C.: The segregation of particulate materials. A review, Powder Technology, 15, 1976, pp. 245-251.
- 10) 諏訪 浩・奥田節夫：土石流先端における巨礫の運動および先端形状について, 京大防災研年報, 16号 B, 1973, pp. 425-432.
- 11) 諏訪 浩・奥田節夫：焼岳上々堀沢扇状地における土石流の堆積構造, 京大防災研年報, 25号 B-1, 1982, pp. 307-321.
- 12) Suwa, H. and S. Okuda: Deposition of debris flow on a fan surface Mt. Yakedake, Japan, Z. Geomorph., Suppl.-Bd. 46, 1983, pp. 79-101.
- 13) 奥田節夫・諏訪 浩・奥西一夫・横山康二・小川恒一・浜名秀治・田中俊一：土石流の総合的観測 その6. 1979年焼岳上々堀沢における観測, 京大防災研年報, 23号 B-1, 1980, pp. 357-394.