

土石流は大小の石礫を含むが、これらの石礫が図1に示すように流れの先端へ集まるとともに、大きなものほど流れの先端へ集積しているのがふつうである。従来の研究においてはこの現象は、流れの中で石礫は大きいほど浮上し易いため、浮上してくる大径礫が上層の高流速に乗ってより速く流送されて生じると説明されてきた^{1)~4)}。しかし、観測結果によれば、最大級の岩塊のサイズは図1に示すように流動深と同程度またはそれ以上のものも多く、大岩塊は継続的に渓床に接触しながら転動しているので、上述の大径礫の浮上過程すなわち逆グレイディングは先端集中の原因の一つかも知れないが第一の要因ではないと考えるようになった。そこで粒子流段波の実験を行って大粒子が前方集中する特性を検討し、つぎに段波内における球形礫の運動解析を行って、大岩塊が先端へ集中する現象の第一の要因を明らかにした。

1. 粒子流段波における大粒子の先端集中の実験

図2に示す実験水路に三粒径混合粒子（ガラス）と水を用いて模擬土石流を流下させたところ、図3に示すように大粒径粒子の先端集中が再現された。つぎに、単一粒径の粒子だけと水を用いても、図4に示すように粒子が先端集中することが分かった。上述の逆グレイディングは異粒径粒子の混合状態において初めて生じる現象であるから、Bagnold(1968)以来の定説では図4の結果の説明は不可能である。さらに、単一粒子を用いても、粒子が段波の先端へ集中したが、その運動は粒径によって異なり、図5に示すように大きい粒子は段波の中に取り込まれた直後はほかの中小の粒子に比べると一旦は遅れをとるものの、やがて加速してより大きな速度を獲得し、けっきょく他の粒子よりも早く先端に追いつくという顕著な特性を示すことが分かった。

2. 段波中の球形礫の運動解析

図5に示した実験結果を説明するため、単純化したモデルを用いて段波中での石礫の運動解析を行った。すなわち、図6の右上部に示すような、一定速度Vで流下する一様な泥流段波に球形の岩塊がとり込まれて後の運動を検討する。岩塊は滑動するとし、揚力を無視すると岩塊の運動方程式は

$$\frac{4}{3}\pi R^3(\sigma + \frac{\rho}{2}) \frac{dv}{dt} = \frac{4}{3}\pi R^3 \sigma g \sin \theta - \frac{4}{3}\pi R^3(\sigma - \rho) \mu g \cos \theta + \frac{1}{2} C_D \rho \pi R^2 (V - v) |V - v| \quad (1)$$

である。ただし速度と力は斜面下流向きをプラスとする。記号の意味は図6に示す。gは重力の加速度、 C_D は抗力係数である。(1)式を $dv/dt = G + D$ (2)

と変形する。ここに、

$$G \equiv \frac{\sigma}{\sigma + \rho/2} g \sin \theta - \frac{\sigma - \rho}{\sigma + \rho/2} \mu g \cos \theta \quad (3)$$

$$D \equiv \frac{3C_D}{8R} \cdot \frac{\rho}{\sigma + \rho/2} (V - v) |V - v| \equiv C (V - v) |V - v| \quad (4)$$

ただし、 $C \equiv (3C_D/8R) \{ \rho / (\sigma + \rho/2) \}$ である。ここでGはRに無関係であるが、 $D \propto R^{-1}$ であることに注目しておく。上流の谷底が急傾斜なところからスタートして下流の緩傾斜な斜面に到る岩塊の運動は図6に示すような5つのステージに分けて検討することができるが、その解析結果を表1に示す。ここで添え字のuとl(If)はそれぞれ谷の上流部と下流部での値を示す。また、 $V > v$ の場合には $u \equiv V - v$ なる不足速度差（速度欠損）を、 $v > V$ の場合には $u \equiv v - V$ なる超過速度差（速度超過）を補助的に用いて方程式(2)の解を求める。

ステージ1 上流の急傾斜の谷底に静止（ $v = 0$ ）していた岩塊が運動を開始したのち加速し、岩塊の速度vが段波の流速 V 、または v_0 （ $< V$ 、または $< V_1$ ）になるまでのステージである。(2)式の解は

$$u = \sqrt{\frac{G}{C}} \tan \left\{ \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{C}{G}} \cdot V_0 \right) - \sqrt{GC} t \right\} \quad (5)$$

となる。表2の焼岳上々堀沢におけるパラメーターの代表値と、 $V_0 = 10 \text{ m/sec}$ を仮定して表1に示す馴化時間 τ_1 の式により、例えば直径20cmの礫は2.8秒後に、直径2mの岩塊は7秒後に速度 v が V_0 に等しくなることが分かる。

ステージ2 同じく急傾斜の谷底で段波の流速 V_0 に達した岩塊がさらに加速し、 V_0 より $\sqrt{G/C}$ だけ大きな終末平衡速度へ漸近するステージである。(2)式の解は

$$u = \sqrt{G/C} \tanh (\sqrt{GC} t) \quad (6)$$

となる。例えば、直径20cmの礫は1.4秒後に V_0 より1.3m/sec(終末速度超過の95%値)だけ早くなり、直径2mの岩塊は5.3秒後に V_0 より4.8m/sec(同95%値)も速くなる。すなわち、初めに静止していた石礫はごく短時間で段波の流速より大きな平衡速度に達することが分かる。そしてこの平衡速度の値は粒径が大きいほど大きいので、岩塊は大きいほど早く段波先端に追いつくことになる。ちなみに焼岳上々堀沢では、土石流が急傾斜区間を流下するのに要する時間は200秒から500秒程度であるから、上述の各秒数はごく短時間と見なすことができる。

ステージ3 速度 $v = v_0$ ($\leq V_0 + \sqrt{|G|/C}$)で下流の緩傾斜の斜面に進入した岩塊が減速して v が下流側の緩傾斜の流路における段波の流速 V_1 になるまでのステージである。(2)式の解は

$$u = \sqrt{\frac{|G|}{C}} \tan \left[\tan^{-1} \left\{ \sqrt{\frac{C}{|G|}} (v_0 - V_1) \right\} - \sqrt{|G|C} t \right] \quad (7)$$

となり、例えば直径2mの岩塊の流速は $\tau_3 = 18$ 秒以内というごく短時間で下流部での段波の流速 V_1 と等しくなる。

ステージ4 同じく緩傾斜の斜面で段波の流速 V_1 に減速した岩塊がさらに減速し、 V_1 より $\sqrt{|G|/C}$ だけ小さな終末平衡速度に漸近するか、または停止するステージである。(2)式の解は(8)式となる。

$$u = \sqrt{|G|/C} \tanh (\sqrt{|G|C} t) \quad (8)$$

ケース1: $\sqrt{|G|/C} < V_1$ の場合には、 v は $V_1 - \sqrt{|G|/C}$ へ漸近する。例えば直径20cmの礫の速度は3秒後に V_1 より0.3m/sec(終末速度欠損の95%値)だけ小さくなり、直径2mの岩塊の速度は21.7秒後に V_1 より2.3m/sec(同95%値)だけ小さくなる。従って、 V_1 が2.3m/sec以下になると、直径2mの岩塊は21.7秒以内に停止する。さらに、 V_1 が0.3m/sec以下になると、直径20cmの礫が3秒以内に停止する。この結果は、土石流の減速過程においては、石礫は大きいものから順にとり残されていくという各個堆積過程における分級のプロセスを物理的に説明するものである。ただし実際には各個堆積と集合堆積の過程とが複雑に組み合わさっていることも多い。

ケース2: $\sqrt{|G|/C} > V_1$ の場合には表1に示す時間 $\tau_{4(2)}$ だけ経過の後に停止する。

ステージ5 ステージ1において岩塊の速度が V_1 に達する前に($v = v_0$ で)、下流の緩傾斜の斜面に達した場合がこのステージとなる。(2)式の解は $u_0 \equiv V_1 - v_0$ を用いて

$$\frac{u - \sqrt{|G|/C}}{u + \sqrt{|G|/C}} = \frac{u_0 - \sqrt{|G|/C}}{u_0 + \sqrt{|G|/C}} \exp(-2\sqrt{|G|C} t) \quad (9)$$

となる。 $\sqrt{|G|/C} < V_1$ のときは(ケース1)加速して図6に示すように礫の速度 v が $V_1 - \sqrt{|G|/C}$ に漸近するが、 $\sqrt{|G|/C} > V_1$ の場合には(ケース2)、減速して時間 $\tau_{5(2)}$ だけ経過の後に停止する。

あとがき 実際の土石流においては石礫相互の衝突力が存在するが、その効果はマクロにみれば(1)式において流体の抗力に含めて解釈することが可能である。けっきょく、土石流先端へ大岩塊が集中してくる現象の第一の要因はステージ2のところで述べたメカニズムである。これは換言すれば、粒径が大きくなると粒径の3乗に比例して大きくなる体積力(重力と摩擦力の合力)と粒径の2乗に比例して大きくなる面積力(流体の抗力)とが釣り合うためには、より大きな速度差($v - V_0$)が必要になるという基本的な物理法則に従って生じる現象であると言える。本研究を進めるにあたり、岡山理科大学 奥田節夫 教授に貴重な御助言を賜った。ここに謝意を表する。

引用文献 1)Bagnold,R.A.(1968)

Sedimentology,10,45-56; 2)Takahashi,

T.(1980)Jour.Hydraulics Div.ASCE,

106,381-396; 3)橋本晴行ほか(1983)

土木学会論文報告集, 336,75-84;

4)諏訪 浩ほか(1986)京都市防災研

年報, 29号B-1,391-408.

図1 土石流の縦断面形と石礫の粒径分布の模式図。断面平均流動深は流れが偏流しているためここに示す流動深(=最大流動深)のおよそ1/2である。

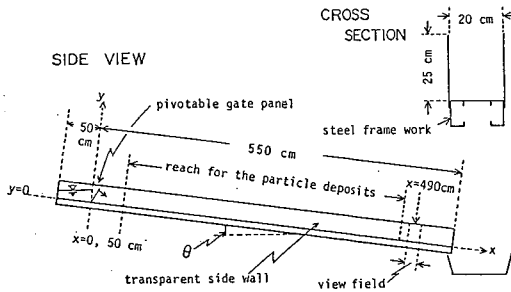
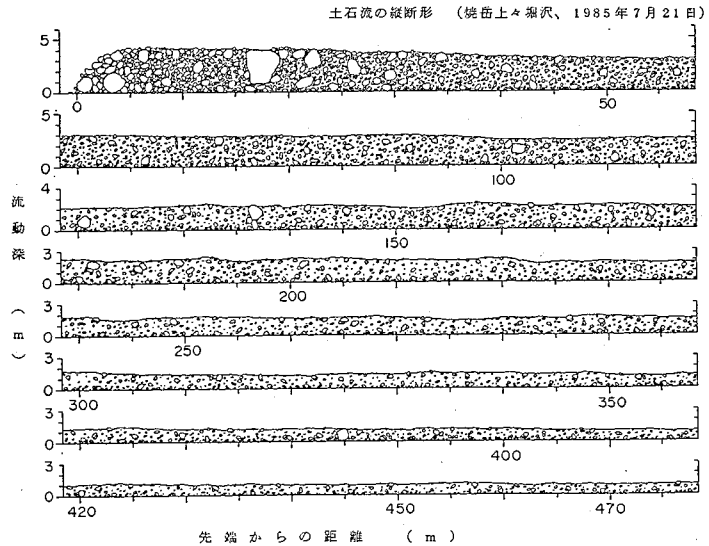


図2 実験水路

底面は1mmφ, 1cm格子の金網固定による粗面

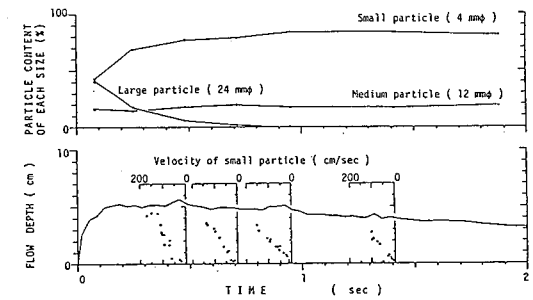


図3 三粒径混合粒子流における粒径別混合比率の変化

(粒度偏析). 時刻の零は段波先端の通過時刻.

大粒子2.2kg, 中粒子4kg, 小粒子9.2kg, 水20%, $\theta = 9^\circ$

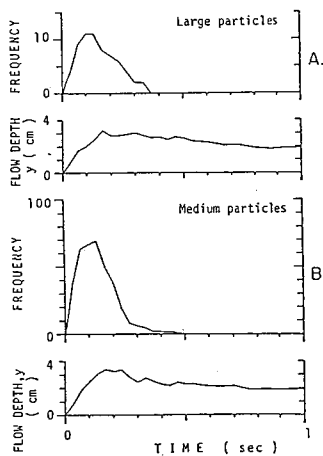


図4 一様粒径粒子流における粒子の通過個数

(先端集中). 使用粒子の重量: 0.56kg,

水20%, $\theta = 6.2^\circ$

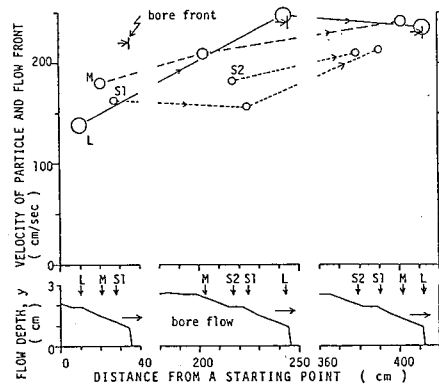
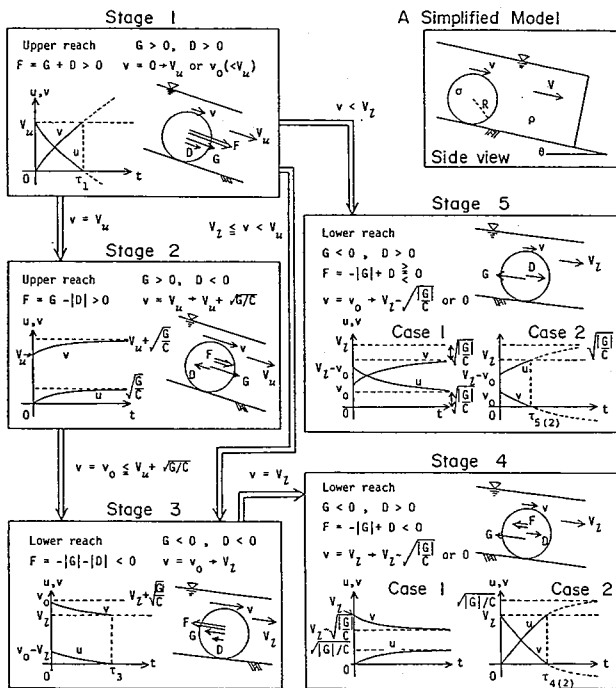


図5 水流段波中の単一粒子の運動. 粒子のスタート位置

から10cm, 210cm, および410cm下流点付近における測定結果.

L, M, Sはそれぞれ粒子の大, 中, 小を示す.



A Simplified Model

表2 礫と岩塊の運動の数値的検討に用いた
物質定数と諸パラメータの数値例

(概ね焼岳上々堀沢における実測値に基づく)

$\sigma = 2.4 \text{ g/cm}^3$	$\rho = 1.8 \text{ g/cm}^3$
$\nu_z = 0.6$ (for large value)	$\mu_z = 0.3$ (for small value)
$\theta_u = 20^\circ$ (for an upper reach)	$\theta_z = 5^\circ$ (for a lower reach)
$R_L = 1 \text{ m}$ (for a large boulder)	$R_s = 0.1 \text{ m}$ (for a small boulder)
$C_D = 0.4$ (for a range of Reynolds number $10^3 \sim 10^5$)	
then	
G_u (for an upper reach)	$G_{u,max} = 1.93 \text{ m/sec}^2$
	$G_{u,min} = 1.43 \text{ m/sec}^2$
G_z (for a lower reach)	$G_{z,max} = -0.087 \text{ m/sec}^2$
	$G_{z,min} = -0.44 \text{ m/sec}^2$
and	
$C_{min} = 0.081 \text{ m}^{-1}$ for a large boulder ($R_L = 1 \text{ m}$)	
$C_{max} = 0.81 \text{ m}^{-1}$ for a small boulder ($R_s = 0.1 \text{ m}$)	

図6 一定速度 V (V_u または V_z) で流下する一様な泥流段波の中の球形礫の加速減速運動を表す5つのステージ。

ステージ1と2は上流の急傾斜部で生じ、ステージ3～5は下流の緩傾斜部で出現する。(2)式の体積力 G と面積力(抗力) D および両者の合力 F の関係(作用方向など)と、運動解析結果のグラフを示す。

表1 段波中の球形礫の運動解析結果。

4行目に示す段波と礫の速度差 u を用いて(2)式の運動方程式を7行目のように変形し、8行目の初期条件を用いると、解(5)～(9)式を得る

Stage	1	2	3	4	5
Gradient of valley slope	steep (upper reach)	steep (upper reach)	gentle (lower reach)	gentle (lower reach)	gentle (lower reach)
G	+	+	-	-	-
Relative velocity of boulder	deficiency $u \equiv v_u - v$	excess $u \equiv v - v_u$	excess $u \equiv v - v_z$	deficiency $u \equiv v_z - v$	deficiency $u \equiv v_z - v$
D	+	-	-	+	+
Combined force	$G + D > 0$	$G - D > 0$	$- G - D < 0$	$- G + D < 0$	$- G + D \geq 0$
Equation of motion	$\frac{du}{dt} = -G - Cu^2$	$\frac{du}{dt} = G - Cu^2$	$\frac{du}{dt} = - G - Cu^2$	$\frac{du}{dt} = G - Cu^2$	$\frac{du}{dt} = G - Cu^2$
Initial condition at each stage ($t = 0$)	$u = v_u$ ($v = 0$)	$u = 0$ ($v = v_u$)	$u = v_0 - v_z$ ($v = v_0$)	$u = 0$ ($v = v_z$)	$u = v_0$ ($v = v_0 < v_z$)
Equation of solution	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
v at the final state of each stage	$v = v_u$ at $t = \tau_1$	$v = v_u + \sqrt{G/C}$ at $t = \infty$ $\sqrt{G/C} = \text{const.} \times \sqrt{R}$	$v = v_z$ at $t = \tau_3$	Case 1: for $\sqrt{ G /C} < v_z$ $v = v_z - \sqrt{ G /C}$ at $t = \infty$ Case 2: for $\sqrt{ G /C} > v_z$ $v = 0$ at $t = \tau_{4(2)}$	Case 1: for $\sqrt{ G /C} < v_z$ $v = v_z - \sqrt{ G /C}$ at $t = \infty$ Case 2: for $\sqrt{ G /C} > v_z$ $v = 0$ at $t = \tau_{5(2)}$
Attaining time:	$\tau_1 = \frac{1}{\sqrt{G}} \tan^{-1}(\sqrt{\frac{C}{G}} v_u)$	$\tau_3 = \frac{1}{\sqrt{ G }} \tan^{-1}(\sqrt{\frac{C}{ G }}(v_0 - v_z))$			
	$\tau_{4(2)} = \frac{1}{\sqrt{ G C}} \tanh^{-1}(v_z / \sqrt{ G /C})$	$\tau_{5(2)} = \frac{1}{2\sqrt{ G C}} \ln \left(\frac{u_0 - \sqrt{ G /C}}{u_0 + \sqrt{ G /C}} \cdot \frac{v_z + \sqrt{ G /C}}{v_z - \sqrt{ G /C}} \right)$			