

～湖・海に流入する土石流の堆積～

九大大学院 学生員 ○末次 忠司

九大工学部 正 員 橋 東 一郎

" " 橋本 晴行・藤田 和夫

" 学生員 高見 裕一

桜島の野尻川では、流路工を流送された土石流が、海に流入してデルタを形成すると同時に、Back Sandが流路工を急速に遡上、埋没させており、土石流対策上、重要な課題となっている。この様な現象は、大正池や洞爺湖に流入する焼岳や有珠山など火山地域に発生する土石流に度々見られる問題である。本文は、湖海に流入する土石流の堆積過程について水路実験を行い、特に背砂現象について若干の考察と解析を加えたものである。

実験の方法とその結果；実験には、長さ14m、幅10cm、高さ30cmの可変勾配アクリライト水路を用い、その末端には、長さ1.9m、幅1.3mの湖海に相当する水槽が連結されている。火山地域の土石流では、火山灰によって比重の増加した濁水が、相対的に比重の小さい礫や岩を輸送し、4～5程度の勾配でもかなりの流速能力を持つことから、実験には平均粒径 $d=5.34\text{mm}$ 、水中比重 $S=0.59$ 、堆積濃度 $C_0=0.63$ のメサライトを使用した。移動床実験では水路から海に沿って、厚5cmの一樣勾配の堆積層を作り、浸透水で飽和させた後、上流端から $q_{00}$ の流量で供給して土石流を発生させた。固定床実験は勾配を10%とし、上流端から7.5mの区間に厚10cmの堆積層を作り、その下流の滑面に土石流を流下させた。下流水槽の水位を適当に一定値を保ち、静水中に突入する土石流の堆積過程も5台のVTRカメラで撮影して解析した。土石流の堆積は極めて進行が早く、実験時間は60秒程度である。堆積形状の模式図及び用いた記号はFig. 1に示した。

Fig. 1は移動床実験で、堆積の末端は河床にはほぼ連続した形で遡上するが、固定床滑面の場合には、Fig. 5に示す様に堆積末端に厚1Dのstepが形成され、stepが遡上する形でBack Sandが進行する。堆積範囲が水路内に限定されている場合について実験結果を記すと以下の様になる。

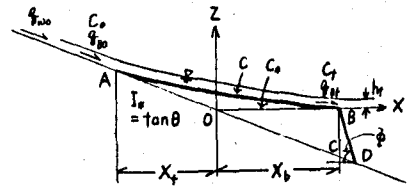
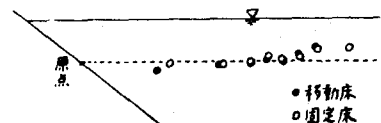


Fig. 1 流れ、堆積の模式図

(1)段丘肩(B点)の経路；段波状土石流が水面に突入した時間を $t=0$ とすると、水中に突入、浮遊した粒子は1～2秒後に堆積して、急速に段丘を形成する。段丘の軌跡は、約5秒以降、初期波面にはほぼ平行に進行する(Fig. 2)。これは、稀流砂による堆積段丘の軌跡と同様の傾向であって、段丘水深 $h_t$ や段丘流砂量 $q_{ht}$ は与えられた $q_{00}$ 、 $q_{00}$ が一定条件下では、ほぼ一定値に保たれることを示している。ここで、段丘肩経路の延長線と原河床との交点を原点とする。

Fig. 2 段丘肩の軌跡( $\theta=4.5^\circ$ )

(2)段丘流砂量 $q_{ht}$ ；段丘肩は水平に進行するから、その移動速度を用いて  $q_{ht} = \frac{\sin \phi \cos \theta}{\sin(\phi - \theta)} C_0 I_0 X_1 \frac{dh_t}{dt}$  …… ① から計算される。 $\frac{q_{ht}}{q_{00}}$ の値は、 $\theta=4.5^\circ$ の場合 $\frac{q_{ht}}{q_{00}} \approx 0.196$ 、 $\theta=5.7^\circ$ の場合 $\frac{q_{ht}}{q_{00}} \approx 0.202$ である。この値は稀流砂の場合の $\frac{q_{ht}}{q_{00}} = \frac{3}{7}$ に比べてかなり小さい。なお、 $\tan \phi = 1.07$ で水中安息角 $\tan \phi_0 = 0.88$ よりも若干大きい。

(3) $X_1$ 、 $X_2$ の時間的変化の例をFig. 3に示す。2次元堆積では $X_1$ は移動床、固定床による差異は殆んど見られぬが、 $X_2$ は固定床ではstep形成のため、背砂の遡上は減少する。なお、図中の破線は、後述の理論式による計算結果である。

(4)移動床、固定床の場合の堆積形状の実験結果を破線で、計算結果を実線で示した例をFig. 4, 5に示す。理論値と実測値とを比較すると、堆積高さ $h_t$ はほぼ一致しているが、フロント段丘の進行速度に差異が生じている。なお、固定床の場合のstepの高さDは、一つの実験では時間的に変化しない。

# 理論的考察

移動床 ( $D=0$ ) の場合; 堆積形状 (Fig. 1 の AB) を 2 次曲線で表わ

し、 $X=X_f$  で  $Z=0$ 、 $X=-X_b$  で  $Z=L_b X_b$ 、 $-\frac{\partial Z}{\partial X}=L_b$  とし係数を決めると

$$Z=L_b \frac{X_f}{(X_f+X_b)} \left\{ X^2 - (X_f + \frac{X_b}{X_f}) X + X_b^2 \right\} \dots\dots\dots (2) \text{ とする。}$$

砂の連続式は、厳密には次式

$$g_{so} t + C_0 X_b L_b = C_0 \int_{-X_b}^{X_f} (Z + L_b X) dX + C_0 \frac{\sin^2 \theta \cos \phi}{\cos \theta \sin(\phi - \theta)} \frac{1}{2} X_f^2 + \int_{-X_b}^{X_f} C \frac{R}{\cos \theta} dX \dots\dots\dots (3)$$

で表わされるが、左辺第 2 項及び右辺第 2、3 項はいずれも小さいので簡単化のために無視する。ここで無次元量  $X_f/h_0 = \xi_f$ 、 $X_b/h_0 = \xi_b$ 、 $(X_f+X_b)/h_0 = \xi_0$ 、 $g_{so} t / C_0 L_b h_0 = \tau$  と導入すると、式 (2)

を式 (1) の及び式 (3) に代入した砂の連続式は、各 2 次式となる。

$$\xi_f \xi_b = 3 \tau \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\sin^2 \theta \cos \phi}{\sin(\phi - \theta)} \tau = \frac{g_{so} t}{g_{so}} \dots\dots\dots (5)$$

土石流においては輸送濃度を  $C_T = dC$ 、 $g_T = C_T g_0$

として、近似的に、 $(C_0 - C_T) g_T = \text{const.}$  と仮定するから

$$C_0 g_{so} = (C_0 - C_T) g_{so} = (C_0 - C_T) g_T \dots\dots\dots (6)$$

が成立する。この土石流勾配  $L_b$  では  $d \approx 1$ 、段丘肩付近では、 $d_f \approx R/d$  と勾配の関数で

$d_f \approx 1$  である。また、土石流の濃度  $C$  を次式

$$C = -(\frac{\partial Z}{\partial X}) / s_{d1} \dots\dots\dots (7) \text{ で表わす。式 (2)}$$

(2)、(4) を用いて、式 (5)、(6) より

$$\frac{1}{2} \frac{d \xi_f^2}{d \tau} = B \frac{g_{so} t}{g_{so}} = B \frac{1-A}{1-d_1 A (1-\frac{2}{3} \frac{d_f^2}{d})} d_f (1-\frac{2}{3} \frac{d_f^2}{d}) \dots\dots\dots (8)$$

初期条件として、 $\tau=0$  で  $\xi_f=0$  とすると

$$\xi_f^2 = 8 \tau \dots\dots\dots (9) \text{ ここで、} R \text{ は次式}$$

$$R = -\frac{1}{4 d_1^2 A} \left[ -\{ 3(1-d_1^2 A) + 4B(1-d_1 A) \} + \sqrt{ \{ 3(1-d_1^2 A) + 4B(1-d_1 A) \}^2 + 48 d_1^2 A B (1-d_1 A) } \right] \dots\dots\dots (10) \text{ より決まり}$$

これは式 (5) より、 $\xi_b = (\frac{3}{8} - 1) \xi_f$

固定床の場合; 厚さ  $D$  の  $\text{step}$  の形で背砂が遊上するので、境界条件として、 $X=-X_b$  で  $Z=L_b X_b + D$ 、 $-\frac{\partial Z}{\partial X}=L_b$  と

して、その 2 次式を求める。以下、移動床の場合と同様にして、次式

$$\frac{1}{2} \frac{d \xi_f^2}{d \tau} = d_1 B \frac{1-A}{1-d_1 A (1-\frac{2}{3} \frac{d_f^2}{d} + f(\gamma))} \times \left\{ 1 - \frac{2}{3} \frac{d_f^2}{d} + f(\gamma) \right\} \dots\dots\dots (11) \text{ となる。ここで、} f(\gamma) = \frac{2}{3} \frac{d_f^2}{d} + \frac{4}{3} \left( \frac{d_f}{d} \right)^2 \frac{1}{\gamma} \text{、} \gamma = D/h_0$$

となるが、 $D=0$  を除いて  $f(\gamma)$  は小さいので、近似的に  $f(\gamma) = 0$  とし、 $\xi_f^2 = 8 \tau$ 、 $\xi_b = \frac{3}{8} \frac{2 \tau}{\xi_f + 2 \frac{D}{h_0}} - \xi_f \dots\dots\dots (12)$

$d_f = 0.6$  とおいて、 $X_f$ 、 $X_b$  および堆積形状を計算した結果が Fig. 3~5 に示されている。最後に Fig. 3 には固定床実験において、堆積途中から段丘が海域内へ進行し、3 次元的に拡がる場合の  $X_f$ 、 $X_b$  を  $X$  印で示している。海域に入ると、 $X_b$  は  $X_f$  の増加に比べて増加せず、河口水位の高い  $H_r = 11.5 \text{ cm}$  の実験では、2 次元堆積と類似した堆積プロセスで、流れ方向に砲台状堆積形をとるのに対して、河口水位の低い  $H_r = 7 \text{ cm}$  の実験では、フロントが水中で停止した後、海中に流入した砂粒は、最初は海中への流送能力が大きいので Back Sand は起らず、水路出口の平坦部の堆積が上昇した後、急激に 2 次元よりも大きい  $\text{step}$  で遊上する。海中における堆積は、流れ方向から横方向に進行し、最終的には同心円状の堆積コンターを形成する。

参考文献; 橋、次村、宮武: 貯水池の堆砂過程について (九大工学集報: 1967 年)

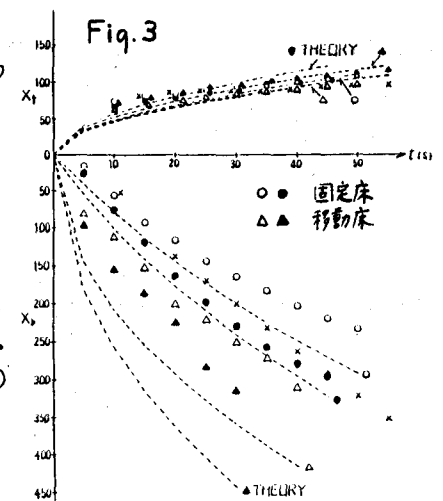


Fig. 3

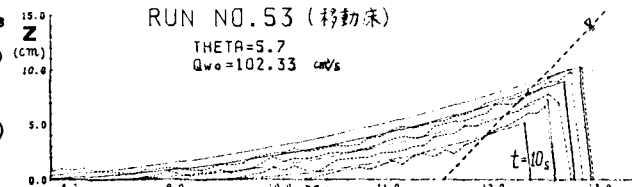


Fig. 4. 10秒毎の堆積形状

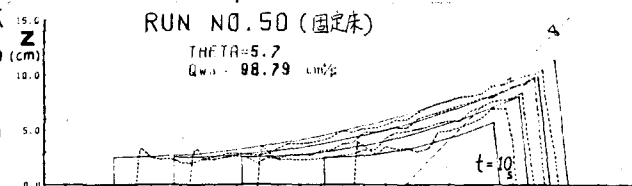


Fig. 5. 10秒毎の堆積形状