

火砕流の流動特性に関する実験的研究

九州大学工学部 学生員○多寶 徹 九州大学大学院 学生員 木藤賢一
九州大学工学部 正 員 平野宗夫 九州大学工学部 正 員 橋本晴行

1. はじめに

火砕流は、雲仙岳における発生により、その存在が広く人々に知られるようになったが、流動特性について検討した研究は少ない。火砕流の流れの構造は底層部と上部からなり、底層部は、比較的大きい粒径の土砂の流れであり、上部は、火山灰などが底層部に引きずられるようにして流動する部分である。そこで、火砕流の流動特性を知る上では、底層部での流動特性を把握することが必要不可欠である。そのため、本研究では、実験水路において粒子流を発生させ、その特性について検討した。

2. 実験

2. 1. 実験方法

実験には、幅15cm、長さ5.0mの側面がアクリル製の可変勾配水路を用いた。水路の上流端には砂を蓄えるホッパーが設けてあり、ホッパーの開き角度を調節することで、供給砂量を調節できるようになっている。実験に用いた砂は中央粒径 $d_{50}=1.9\text{mm}$ 、密度 $\sigma=2.61\text{g/cm}^3$ 、及び最密充填濃度 $C=0.55$ のはほぼ均一粒径の砂である。河床には、実験砂と同じ砂をベニヤ板に貼つけて粗面としたものと、ベニヤ板のみの滑面としたものを用いた。実験条件を表-1に示す。また、発生した流れを下流端から1mの位置で側面から高速度ビデオで撮影し、層厚 h や流速分布を測定した。下流端では流れが定常となつてから、流れを採取し流砂量を求めた。

2. 2. 実験結果

まず、滑面での流下状況について述べる。単位幅流砂量 $q_s=45\text{cm}^2/\text{sec}$ で水路勾配 $\theta_0=27^\circ$ では、粒子の流れは定常状態にはなり得ず堆積が生じる。 $\theta_0=28^\circ$ では粒子は堆積せずに流下し、流れと空間とに明瞭な境界をもって層状に流れた(図-2 (I))。さらに勾配を急にし、 $\theta_0=32^\circ$ では、流れの下層部では層状に流れるが、上層部では粒子が跳ねて分散した流れとなり、流れと空間の境界も明瞭でなくなる(図-2 (II))。 $\theta_0=35^\circ$ では、全層にわたって粒子が分散した流れとなり、流れと空間の判別が難しい(図-2 (III))。流砂量を増やし、 $q_s=105\text{cm}^2/\text{sec}$ とすると、 $\theta_0=28^\circ$ で堆積し、 $\theta_0=35^\circ$ で層状と分散の2層流れとなり、 $\theta_0=40^\circ$ で完全に分散した流れとなる。さらに流砂量を増やし、 $q_s=210\text{cm}^2/\text{sec}$ とすると、 $\theta_0=29^\circ$ でも堆積し、 $\theta_0=30^\circ$ で層状に流下する。しかし、 $\theta_0=40^\circ$ でも、少量の跳砂はあるものの、層状に流下する。滑面での代表的な流速分布を図-3に示す。粒子は底面付近でも滑りのため速度をもち、下に凸の分布をしている。

次に粗面では、 $\theta_0=35^\circ$ のときには流砂量に関係なく、まず、底面付近に、ある厚さの堆積層が形成され、その上を層状な流れができる(図-2 (IV))。 $\theta_0=40^\circ$

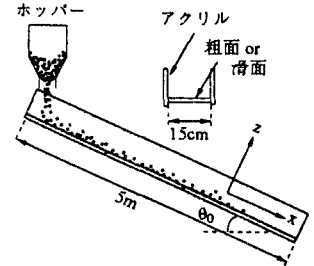


図-1 実験装置

表-1 実験条件

河床条件	滑面			粗面		
流砂量 q_s (cm^2/sec)	45	105	210	45	105	210
水路勾配 θ_0	28° 29°	29° 35°	30° 35°	35° 35°	35° 35°	35°
	32° 35°	40°	40°	40° 40°	40° 40°	40°

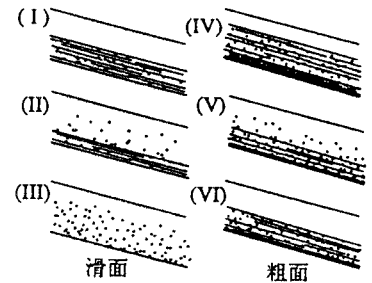


図-2 流下の模式図

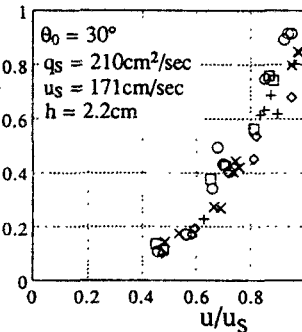


図-3 滑面での速度分布

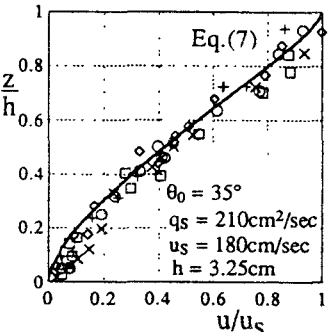


図-4 滑面での速度分布

にすれば、 $q_s=45\text{cm}^2/\text{sec}$ のときには堆積層は形成されず、流れは層状と分散の2層流れとなる（図-2（V））。流砂量を増やせば堆積層は形成されないが、流れは層状となる。（図-2（VI））。さらに流砂量を増やせば堆積層が形成され、その上を層状な流れができる（図-2（IV））。粗面での代表的な流速分布を図-4に示す。流速は堆積層上でほぼ零となり、やや上に凸の分布になる。

3. 濃度・速度分布の解析

2次元等流状態の粒子流を考え、流下方向と垂直方向のつりあい式をたてると、

$$\sigma C g \sin \theta_0 + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} = 0 \dots (1) \quad -\sigma C g \cos \theta_0 + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = 0 \dots (2)$$

ここに、 σ_{zx}, σ_{zz} はそれぞれせん断応力、垂直応力で、 C は粒子濃度である。粒子流にも、従来の土石流における粒子間力¹⁾が拡張して適用できるものとし、粒子間応力に関する係数を γ, K_M, K_p とし、表面濃度を C_s 、最密充填濃度を C_* とすれば、

$$\sigma_{zx} = \tau_{zx} = K_M \sigma^2 \frac{(C/C_*)^2}{1 - C/C_*} \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \dots (3) \quad \sigma_{zz} = -\frac{1}{\gamma} \tau_{zx} - K_p \frac{C}{C_*} \frac{C - C_s}{C_s} \dots (4)$$

さらに、動摩擦係数を $\mu=0.1$ 、運動量伝達に関する係数を $k_M=5, \beta=1.15$ として、

$$K_M = \frac{\pi}{6} (0.0762 + 0.102\mu) \beta^2 k_M, \quad \gamma = \frac{0.0762 + 0.102\mu}{0.0898 - 0.067\mu} \dots (5)$$

式(1)～(5)を用い、 $\eta (=z/h)=0$ で $C=C_*$ 、 $\eta=1$ で $C=C_s$ の境界条件で解くと、濃度分布及び速度分布を規定する式として、

$$\eta = \left\{ 2 \left(1 - \frac{C}{C_*} \right) + \frac{C_s}{C_*} \ln \frac{C}{C_*} \right\} \frac{\chi}{\psi} \dots (6) \quad \frac{u}{u_*} = \int_C^{C_*} F(C) dC / \int_{C_s}^{C_*} F(C) dC \dots (7)$$

を得る。ここに、

$$\psi = \frac{\gamma \tan \theta_0}{\gamma}, \quad \chi = \frac{K_p}{C_s g h \cos \theta_0}, \quad F(C) = \frac{2C - C_s}{C} \sqrt{(C - C_s) \frac{1 - C/C_*}{C/C_*}}$$

である。また、輸送濃度 C_T 及び流速係数 $\bar{u}/u_*$ は、

$$C_T = \int_0^1 u C d\eta / \int_0^1 u d\eta = \int_{C_s}^{C_*} (2C - C_s) \left(\int_C^{C_*} F(C) dC \right) dC / \int_{C_s}^{C_*} \frac{2C - C_s}{C} \left(\int_C^{C_*} F(C) dC \right) dC \dots (8)$$

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \int_0^1 \frac{u}{u_*} d\eta = \frac{1}{\sqrt{K_M}} \frac{h}{d} \left(\frac{\chi}{\beta} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{C_*^2} \int_{C_s}^{C_*} \frac{2C - C_s}{C} \int_C^{C_*} F(C) dC \dots (9)$$

となる。これらの式を用いて速度分布、輸送濃度及び流速係数を計算した結果を図-4、図-5及び図-6中の実線で示す。ここに、 χ は定数と仮定して、 $\chi=1/\beta$ としている。このとき、境界条件を $\eta=0$ で $C=C_*$ としており、図-5、6中ではこの条件を満たす実験値を黒塗り記号としている。速度分布、輸送濃度、流速係数とも理論値と実験値は概ね一致している。

4. 結語

以上、粒子流に関する実験を行い、理論的考察を試みた。理論式は境界条件の問題を残しているものの、現象をうまく説明できた。今後は、空気の吹き上げを伴う粒子流の実験を行う予定である。

参考文献 1) 椿東一郎, 橋本晴行, 末次忠司: 土石流における粒子間応力と流動特性, 土木学会論文報告集, 第317号, 1982.

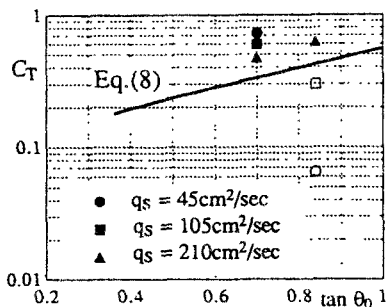


図-5 輸送濃度と水路勾配の関係

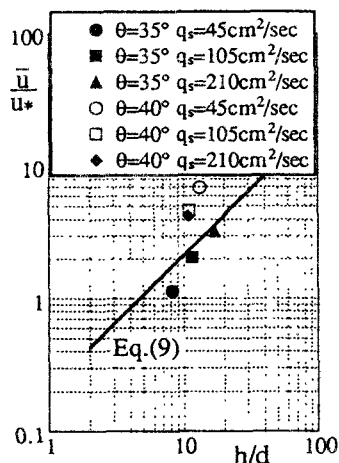


図-6 流速係数と層厚粒径比の関係