

建設省土木研究所 ○ 山田 孝

水山 高久

矢島 重美

1. はじめに

火砕流による災害を防止軽減するためには、まず始めに、その流動メカニズムを物理的に明らかにする必要がある。その一つの試みとして、これまで実験的な研究がいくつかなされており、例えば鎌田らは、幅15cm、長さ120cmの流路上流端にガラス球（MS）と入戸火砕流の堆積物を入れ、空気を底面より与えて流動状況を観察し、流下速度を測定した¹⁾。その結果、MSや火砕流堆積物は空気の供給がなければ静止摩擦角内の勾配で停止するが、空気の供給があると斜面勾配にかかわらず流下することがわかった。また、高橋は、幅5cm、長さ270mの流路に底面より空気を与えてMSを流動化させ、理論的に検討した流速式の妥当性を示した²⁾。

一方、筆者らが、先にインドネシアのメラピ火山、スメル火山で発生した火砕流のスチール写真やVTRから流下速度を判読した結果、勾配が大きいほど流下速度も大きいこと、加速後の運動については流速係数が5～10程度の値をとることなどが推察された。しかし、速度や流速係数が勾配、流下規模とどのような関係にあるのか、また火砕物から放出されるガス流量が勾配に応じてどの程度流動を容易にしているのかについては未知な点が多い。

本研究は、映像資料の解析から得られた結果を実験により検討するとともに、流れの推進力と抵抗力とが均衡する定常状態での流れの特性について考察したものである。

2. 実験の方法

図-1に実験流路の概要を示す。流路は幅30cm、長さ3m、高さ30cmの直線流路であり、勾配を0°から40°まで変えることができる。流路の底面には多孔性のポーラストーンを敷きつめ、コンプレッサーから送られた空気がポーラストーンを通過することによって上方に均一に放出されるようになっている。コンプレッサーの空気供給能力は最大 $10.8\text{m}^3/\text{sec}$ 、圧力 $7\text{kgf}/\text{cm}^2$ であり、バルブによって空気流量を調節できる。実験を行うにあたり、流路の最上流端に土砂を入れ、コンプレッサーから空気を供給し、一気にゲートを引

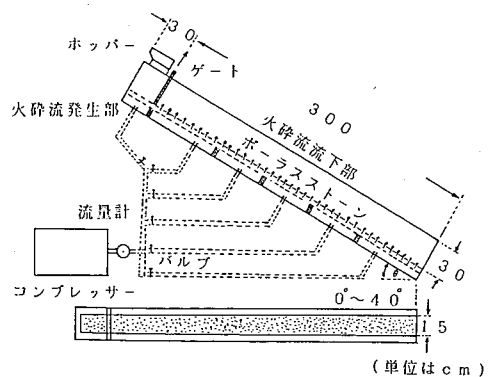


図-1 火砕流発生実験流路

(単位はcm)

き上げると、土砂が流動化し、高速度で流下する。その様子を流路の側面から2台のVTRで撮影し、流速、流動深を判読した。実験Iでは空気流量を一定 ($Q=10.8\text{m}^3/\text{sec} \times 5\text{sec}$) とし、土砂量 (2g, 5g, 7g, 10g) ならびに勾配 (5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°) を変化させて速度の時間的変

化を求め、速度が一定値になる定常領域を把握するとともに、この領域において、流速・流速係数が勾配とどのような関係にあるかを調べた。実験Ⅱでは、火砕流の流動性に重要な影響を与えている空気の上昇速度について流速との関係を調べた。なお、実験に用いた砂は、0.019cmの均一粒径で、動摩擦角は27°、密度は1,543g/cm³である。さらに、この砂をポーラスストーン上に薄く敷きつめた状態で流路の勾配を徐々に上げていくと35°でポーラスストーンとの境から土砂が滑動し始めた。そこで、静止摩擦角は35°とみなした。

3. 実験の結果と考察

図-2~5にVTRから判読したフロント部の流速の時間的変化を示す。速度はゲートから下流に向かって75cm、150cm、225cm、300cmの位置で判読した。勾配が40°、35°、30°、25°の動摩擦角以上ならびにその近傍では、いずれも速度が時間にほぼ比例して増大しているため、等加速運動をしているとみなせ、定常ではないと判断した。一方、勾配が20°以下では、時間の経過とともに速度が一定になる傾向が認められ、この領域を定常状態とみなした。

図-6は土砂量を変化させた場合の勾配と流路末端での流速との関係を表したものである。勾配が急なほど、流速が大きくなる。また、動摩擦角より小さい勾配で定常状態とみなせる領域では流下規模が大きいほど勾配の低下に伴う流速の減少の程度が小さくなる。動摩擦角の近傍ならびにそれよりも大きい勾配では、流下規模にかかわらずほぼ同じ値を示す。

図-7は、流れが定常状態を示す領域での相対流動深 (H/d) と流速係数 (V/V_*) との関係を示したものである。ここに、 V : 流路末端でのフロント部の流速、 $V_* (= \sqrt{gHI})$: 摩擦速度である。流速係数は4~7程度の値をとり、インドネシアのメラビ火山、スメル火山で発生した火砕流の映像から判読して得られた値⁴⁾に近い。また、今回の実験では勾配が15°以下の場合、各勾配において、相対流動深 (H/d) が大きいほど流速係数も大きくなる傾向がある。

一方、火砕流の流下速度について高橋は流動深が粒径に比して十分、大きいとき流速係数 V/V_* が近似的に

$$V/V_* = \frac{1}{K} \left(\ln \frac{30H}{k} - 1 \right) \dots\dots\dots (1)$$

と表され、通常の二次元流れに対して成立する対数則と一致するとしている³⁾。

ここに、 K : カルマン定数 (0.4)、 k : 地盤の粗度高さ、 H : 流動深である。VTRから判読した流

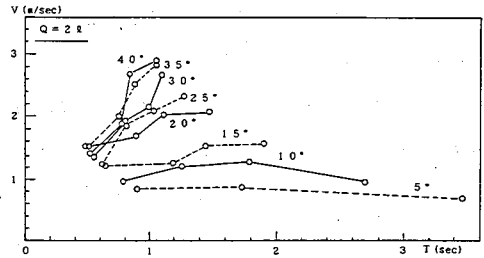


図-2 速度の時間的変化

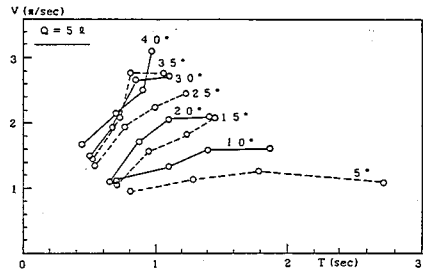


図-3 速度の時間的変化

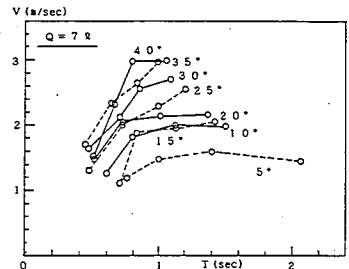


図-4 速度の時間的変化

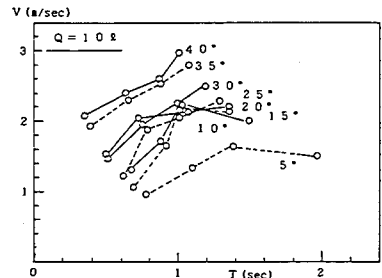


図-5 速度の時間的変化

速と高橋の提案した(1)式をもとに計算した流速との比較を図-8に示す。ここで、粗度高さ k の値は、実験に用いたポーラストーンの表面の状態から0.05cmとした。(1)式をもとに計算した流速が実験値の3倍近い大きな値となる場合は流動深が5~6cmとなる大きな流れのときである。また、計算によって求めた流速が実験値よりも若干小さくなる場合は流動深が1~2cmという小さな流れのときである。流動深が大きい場合、実際の流動層の上部にかなり砂が舞上がった状態となっておりVTR判読の際、流動深として過大な値を与えたことも考えられる。ちなみに、マンギの式において粗度係数 n を0.025として、計算すると、VTR判読によって求めた流速に近くなる。

次に、ポーラストーンの表面から放出される空気と火砕流の流動について考察する。図-9は流路の勾配を変えた場合の、流路底から放出される上向きの空気上昇速度と流路末端での流速との関係を示したものである。ここで、上向き空気上昇速度はコンプレッサーから供給される空気量を流路底面積で除して求めた値である。全体的に空気の上昇速度が大きいと速度も大きくなる傾向が認められる。

動摩擦角より大きい勾配では上向きの空気上昇速度は速度にあまり影響しない。このような勾配では重力の斜面方向成分が卓越し、空気の上昇速度が必ずしも流動の支配要因にならないものと思われる。

一方、動摩擦角近傍ならびにそれ以下では、上向きの空気上昇速度の増加に伴って流速が急激に増加する。この理由として空気上昇速度の増加による内部摩擦角の急激な減少が考えられる。

砂の堆積層が移動を始めるための最小の空気上昇速度と流路勾配との関係を図-10に示す。堆積層の厚さ H は、実験に用いた砂の径(0.019cm)の25倍、50倍、100倍の三種類とし、流路の一區間に長さ、75cm、幅15cmにわたって砂を均一に敷きつめた。勾配は、ポーラストーン上で

の実験砂の静止摩擦角以下とし、敷きつめた堆積層がポーラストーン上を滑り出すための最小の空気流量を計測して、上向きの空気上昇速度に換算した。この図によれば、静止摩擦角近傍では、ほんのわずかな空気でも堆

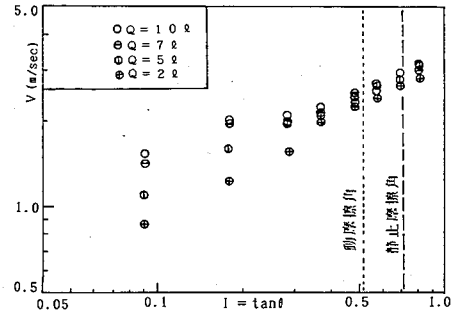


図-6 勾配 ($\tan\theta$) と流速の関係

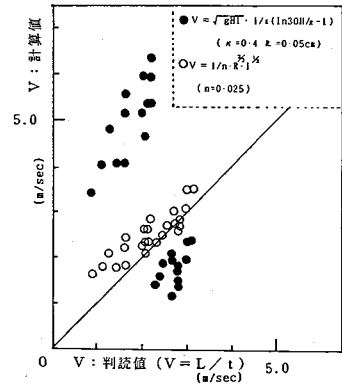


図-8 流速の判読値と計算値

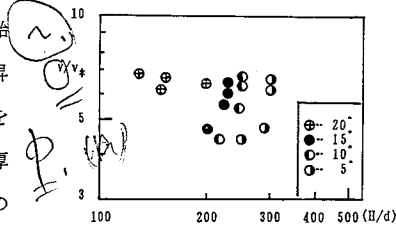


図-7 相対流動深 (H/d) と流速係数 (V/V_0)

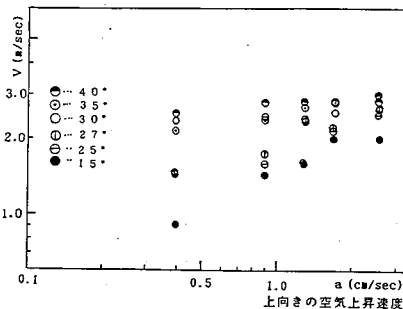


図-9 上向きの空気上昇速度と流速

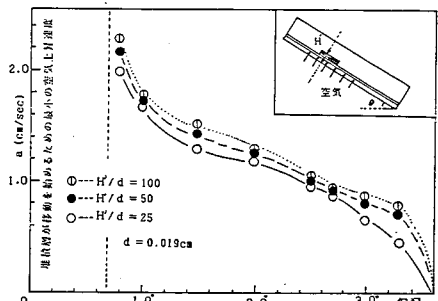


図-10 勾配と堆積層が移動を始めるための最小の空気上昇速度

積層が移動し始めるが、勾配が緩やかになるにしたがい、より大きな空気上昇速度が必要になることがわかる。勾配が $10^{\circ} \sim 12^{\circ}$ ($\tan \theta = 0.18 \sim 0.21$) ぐらいを境に堆積層が急激に動きにくくなり、勾配が 7° ($\tan \theta = 0.12$) 以下では、堆積層が全く流動せず、堆積層に多数の空気の抜け口（パイプ）が形成された。堆積層を厚くした場合は、その流動条件として、若干、大きめの空気上昇速度が必要となるが、勾配との関係についてみてみると、堆積層の厚さによらず、ほぼ同じような傾向を示す。

4. まとめ

本実験によってわかったことは以下のとおりである。

- ① 勾配が大きいほど流速も大きくなる。動摩擦角近傍ならびにそれ以上の勾配では、それぞれの勾配において流下規模にかかわらずほぼ同じ流速となる。動摩擦角よりも小さい勾配では流下規模が大きいほど流速が大きくなり、かつ、勾配の減少に伴う流速の低減の程度が小さい。
- ② 動摩擦角以下の勾配の定常状態では、流速係数の値が4~7程度の値をとり、実際の火砕流から求めた値に近い。15°以下では相対流動深が大きいほど流速係数も大きい。一方、20°では相対流動深によらず流速係数はほぼ一定となった。
- ③ 流路の勾配が、動摩擦角近傍またはそれ以上の場合は、上向きの空気上昇速度は、流下速度にほとんど影響しなかった。動摩擦角以下では、上向きの空気上昇速度が大きいほど流速も大きくなる傾向が認められた。

5. おわりに

火砕流の流動特性を物理的に明らかにするための基礎的実験として、動摩擦角以下での定常的な領域において、勾配、相対流動深、上向きの空気上昇速度と、流速、流速係数との関係について調べた。今後は、流速分布、濃度分布、内部摩擦角の変化を定量的に把握し、流動モデルを構築して実際の火砕流の内部構造を説明することが重要課題となる。

参考資料

- 1) 鎌田桂子、荒牧重雄、柴垣由城、吉田邦夫；入戸火砕流を用いた流動化実験、火山噴火に伴う乾燥粉体流（火砕流等）の特質と災害、自然災害特別計画研究研究成果、No,A-61-1, pp43-53, 1986
- 2) 高橋保；火砕流の流動式およびAuto-Suspensionの意義に関する実験的検討、火山噴火に伴う乾燥粉体流（火砕流等）の特質と災害、自然災害特別計画研究研究成果、No,A-61-1, pp55-60, 1986
- 3) 高橋保；火砕流、土石なだれのメカニズム、火山噴火に伴う乾燥粉体流（火砕流等）の特質と災害、自然災害特別計画研究研究成果、No,A-61-1, pp25-41, 1986
- 4) 水山高久、山田孝、矢島重美、下田義文；1989年インドネシア・スメル火山で発生した火砕流の運動特性、砂防学会誌（投稿中）