

II-296

火砕流の内部構造と流動機構に関する研究

京都大学大学院 学生員 金銅将史
 京都大学防災研究所 正 員 高橋 保
 京都大学防災研究所 正 員 里深好文
 京都大学大学院 学生員 竹内竜太

1. はじめに 火砕流が持つ最も特徴的かつ危険な特質として、高温の火砕物がガスと一体となって安息角以下の緩勾配斜面上でも高速で流下するという高い流動性があげられる。ここでは、流下時の破碎に伴い火砕物質そのものから発生するガスによって斜面上に上向きのガス流が生じ、これが粒子層を支えることにより極めて流動性の高い「流動層」が形成・維持されるという考えに基づいてモデル実験を行い、火砕流の内部構造の解明を試みた。そして、特に重要と思われるいわゆる本体部分の流動機構及び流動・停止の条件についてさらに検討を加えた。

2. 流路実験 粒子層からのガス発生により流動層を維持しながら流下する固気混相流を耐熱性実験流路(長さ4m, 幅5cm, 深さ32cm)内で再現した。これには、重炭酸ナトリウムを約300°Cに加熱すると、熱分解されて炭酸ガスと水蒸気が発生するという現象を利用し、珪砂(粒径80 μ m, 密度2.65g/cm³)を加熱してこれに重炭酸ナトリウムを混合、流路に供給する方法をとった。実験装置を図-1に示す。また、実験では表-1に示すように流路勾配 θ 、重炭酸ナトリウムと珪砂の混合比 n (重炭酸ナトリウム重量/珪砂重量)および底面条件を変化させ、斜面直角方向の粒子濃度分布と流速分布を測定した。

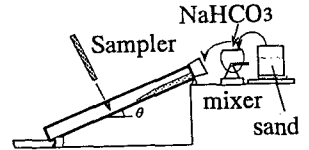


図-1 実験装置

表-1 実験条件

Run No.	流路勾配 θ (°)	混合比 n (kg/kg)	底面条件
A-3	5.5	0.50/15	移動床
B-2	11.5	0.25/15	固定床
B-3	11.5	0.50/15	固定床
C-2	14.5	0.25/15	固定床
C-3	14.5	0.50/15	固定床
D-2	18.5	0.10/15	移動床
D-3	18.5	0.25/15	移動床
D-4	18.5	0.50/15	固/移

3. 流れの内部構造 まず、流路側方に設置した高速度ビデオカメラの画像より、流れは底部の高濃度部分(本体部)と上部の低濃度部分からなることが判明した。このうち、本体部は図-2に示すような3つの領域に分割されると考えられる。すなわち、 $0 < z \leq h_0$ は底部に既に堆積して停止している領域、 $h_0 < z \leq h$ は粒子が接触圧力を持ちながら流下する領域(底層)、 $h < z \leq H$ は上昇ガス流により流動化状態が達成されている領域(流動層)である。また、上方の H_c より上では粒子沈降速度より上向きガス流速が大きくなって粒子は吹き飛ばされてしまう。濃度分布の測定例を図-3に示すが、これによると高濃度部分の濃度は粒子に固有の最粗充填濃度(粒径80 μ mの球形粒子では0.47²⁾)に近く、ほぼ一様な分布になっていることがわかる。

4. 本体部の流動機構 上昇ガス流が存在する条件下での粒子と間隙ガスの混合物の2次元等流状態を考えれば、ガス流の質量保存則¹⁾及び混合物の x, z 方向の運動量保存則がそれぞれ式(1)及び(2),(3)のように与えられる。

$$\frac{d}{dz}(\rho v) = bC\sigma \quad (1) \quad \rho_m g \sin \theta + \frac{dD}{dz} = 0 \quad (2) \quad \rho_m g \cos \theta + \frac{dD}{dz} + \frac{dp}{dz} = 0 \quad (3)$$

ここに、 x 軸は流下方向、 z 軸は斜面直角方向であり、 ρ : ガス密度、 v : 上昇ガス流速、 b : 粒子から単位時間当たりに発生するガス質量の粒子質量に対する割合、 C : 粒子濃度、 σ : 粒子密度、 ρ_m : 混合物の見かけ密度($= \rho\{(\sigma/\rho - 1)C + 1\}$)、 τ : セン断応力、 p : 等方圧力、 D : ガス流による揚圧力である。

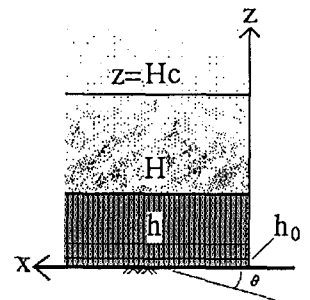


図-2 粒子層の構造

ここで、粒子層内の高さ z の面より上に存在する粒子に起因する単位面積あたりの荷重とガスの揚圧力の差が、粒子を介して伝わる接触圧力 p_s として受け持たれると考えられるので、

$$(\sigma - \rho)g \cos \theta \int_z^\infty C(z)dz - D = p_s \quad (4)$$

が成り立つ。なお、流動層では完全に粒子がガスの揚圧力で支えられるので $p_s = 0$ であり、揚圧力 D は白井²⁾によれば粒子径 d 、ガスの粘性係数 μ として

$$\frac{dD}{dz} = f \frac{\mu v}{d^2} C(1 - C) \quad (5)$$

と表される。但し、底層で $f = 1200$ 、流動層で $18 < f < 1200$ である。

また、せん断応力としては、粒子摩擦によるもの(τ_s)、粒子を浮遊した見かけの流体の変形による粘性応力(τ_μ)、粒子とガスの混合体のマクロな乱れによる乱流混合応力(τ_t)などが考えられる。流動層では流れが層流の場合 τ_μ 、乱流の場合 τ_t が卓越すると考えられ、底層ではこれに $\tau_s (= p_s \tan \phi)$ が加わるものと考えられる(ϕ は内部摩擦角)。以上より、応力の分布は概念的に図-4のように表せるであろう。

さて、実験条件のように粒子からのガス発生が十分にある場合には流れの大部分が流動化して τ_s は殆ど無視できるとすれば、流速分布形として層流の放物線分布あるいは乱流の対数則が考えられる。図-5は、流速分布の測定例と理論曲線との比較であるが、滑面乱流の対数則を仮定するとカルマン定数が $\kappa=20$ と過大に求まることから層流状態であると考えられるA-3のケース以外は、C-2のケースに代表されるように層流か乱流かの判断は難しい。ただ、粘性底層厚が H より大きく求まることからこの実験では層流状態であったと考えるのが妥当とも思われるが、現実の火砕流では流動深及び流速が十分大きく、流れはむしろ乱流状態になっているものと推察される。

5. 火砕流の停止・堆積 流下に伴いガス噴出が次第に収まると、火砕流は流動性を失ってやがて停止すると考えられるが、この過程は b の減少による粒子層構造(図-2)の変化を計算した図-6から理解できる。図中の h 、 h_0 、 H_c は各 b に対して式(1)(3)(4)(5)から求めた理論値である(h_0 は $\tau = \tau_s$ となる高さ)。 b の減少に伴い h_0 が大きくなり、 h_0 が H に一致した時点で流れは停止すると考えられる。同様のことは、勾配 θ の変化についても考察できる。

6. おわりに 今回、流路実験により火砕流の内部構造が調べられ、それが b (及び θ)に大きく依存することが分かった。今後は、流れが層流なのか乱流なのか、また移動床実験で底面侵食が殆ど生じなかったのはなぜかといった残された疑問点に取り組み、実現象を説明しう流れの抵抗則の評価を目指したい。

参考文献

- 1) 高橋 保：火砕流・土石なだれの流動メカニズム、文部省科学研究費自然災害特別研究、計画研究「火山噴火に伴う乾燥粉体流(火砕流等)の特質と災害」報告書、1986, pp.25-41.
- 2) 白井 隆：流動層、科学技術社1973, pp.1-236.

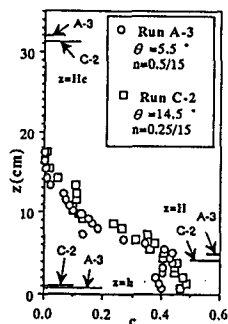


図-3 濃度分布

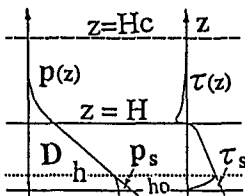


図-4 応力の概念図

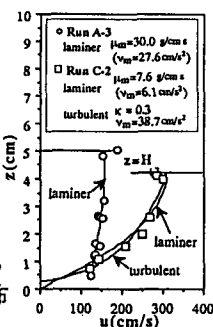


図-5 流速分布

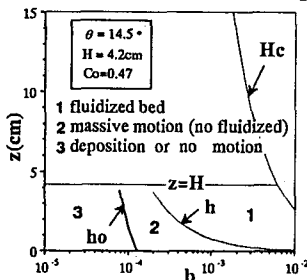


図-6 流れの状態の変化