

2 火砕流の流動機構

京都大学防災研究所 ○高橋 保

京都大学防災研究所 里深好文

京都大学大学院 金銅将史

1. はじめに

1990年11月、雲仙普賢岳が200年ぶりに噴火活動を再開し、周辺地域に甚大な被害をもたらしたのは周知の通りである。なかでも、噴火に伴い岩片や火山灰などが高温高速で斜面を流れ下る火砕流による被害は、土石流と並んで非常に大きなものとなっている。現在、この火砕流災害が大規模なものとなる第一の原因として、火砕流の有する非常に高い流動性が考えられている。しかし、この高い流動性を維持する流れのメカニズムに関してはまだまだ不明な点が多く、諸説が提唱されている。本研究ではこれらの中で、粒子(火砕物)からのガス発生により高流動性が維持されるという説を取り上げた。すなわち、マグマ中に溶け込んでいる火山ガスの分離によって生産された火砕物が斜面を流れ下る際、なおも火砕物からのガス発生が継続し、粒子層内に上向きのガス流が形成されることにより粒子が浮遊し、斜面との摩擦が著しく小さくなるという考えである。本研究では、この粒子層内部でのガス発生を伴う粒子の流れを斜面上で再現し、その流動に関する流路実験を試みた。また、火砕流の流動機構を考える上では、火砕流内部の粒子濃度や流速の分布など、流れの構造に関する情報が必要である。本研究では、これまでにあまり計測例のないこれらのデータが定常状態について得られており、これをもとに従来の研究における理論の適用性についても検討を行った。

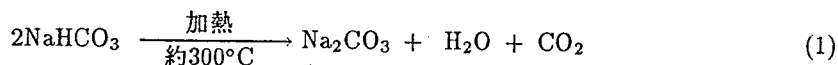
2. 流路実験

火砕流の流動機構に関する流路実験はこれまでにいくつかの例があるが、今回の実験では次のような新たな試みを行った。

[a] 実験流路内で粒子層全体からガスを発生させることにより、流動化状態(化学工学におけるtechnical termで、下方から吹き上げる流体中に粒子が浮遊懸濁した状態をいう。)をつくった。

[b] 定常状態における内部の濃度分布および流速分布の測定を試みた。

このうち[a]は、



で示される化学反応により、水蒸気と炭酸ガスが発生する現象を利用することにした。しかし、実際は生成物の炭酸ナトリウムが吸湿性を持つため、原料の重炭酸ナトリウムだけを加熱すると温度の低い表面付近から固まってしまい、流動化状態は得られない。これを解決するため、あらかじめ砂粒子(粒子密度 2.65 g/cm^3 、中央粒径 $80\mu\text{m}$)のみを容器内で加熱したのち、重炭酸ナトリウムを混

合、攪拌する方法をとった。これにより混合物は激しく反応して見かけの体積は急激に増加し、表面から猛烈に粒子をまきあげる現象がみられる。この方法は、流路床から空気を送って粒子を浮遊させる従来の方法と異なり、粒子層全体からガス発生があるために、実際の火砕流内部の圧力構造をよりよく再現していると思われる。実験では図-1に示すような装置を用い、加熱容器内で流動化させた混合物をすみやかに勾配可変の耐熱矩形断面流路(長さ4m、幅5cm、深さ32cm、底面は滑面)の上流端からほぼ一定流量になるように供給し、火砕流を発生させた。そして、高さ方向の濃度分布および流速分布を、それぞれ濃度分布測定用サンプラーおよび流路側方に設置した高速度ビデオカメラを用いて測定した。なお、流速測定用のトレーサー粒子としては、比重、耐熱性、形状、色などを考慮した結果、フリーズドライタイプのイン

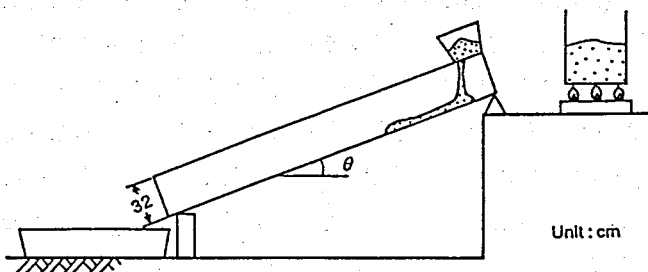


図-1 実験装置

表-1 実験条件

Run No.	流路勾配	混合比	粒子流量
	θ (deg)	n (kg/kg)	Q_p (cm ³ /s)
A-2	13.5	1.0/15	1307
B-1	18.5	0.5/15	1450
B-2	18.5	1.0/15	1445
B-3	18.5	2.0/15	1189
C-1	24.0	0.5/15	1008
C-2	24.0	1.0/15	1047
C-3	24.0	2.0/15	1397
D	18.5	0.0/15	すべて堆積

スタントコーヒーを用いることにした。実験は、同一材料、同一温度(混合時)のもとに、流路勾配 θ および重炭酸ナトリウムと砂との混合比 n (重炭酸ナトリウム質量/砂質量)を変化させて行った。実験条件を表-1に示す。また、あわせて実験終了後に流路内の堆積物の縦断形状を測定した。

3. 実験結果と考察

まず、ガス発生が流動化に及ぼす影響を明確にするために、実験後の堆積物の縦断形状(x :下流端からの距離, z :流路床からの高さ)を図-2に示す。太線で示したのは加熱した砂のみを流した場合、つまり粒子層からのガス発生がない場合であり、他の場合に比べ堆積が顕著で、粒子は流路下流端まで到達していない。一方、粒子からのガス発生があるケースでは、混合物の大部分は下流端から流出しており、流路内堆積物の厚さも、ガス発生量が小さいほど厚くなっていることから、粒子からのガス発生が流動化の大きな要因であることがわかる。

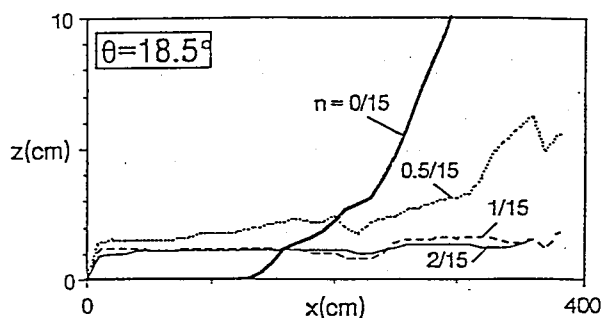


図-2 堆積物の縦断形状

次に、高さ方向の粒子の濃度分布に関する実験結果を図-3に示す。これによると、流れは図中

に(A)および(B)で示した二つの領域に大きく分けられることがわかる。流速測定用ビデオカメラの映像により、流路内の流れは、一種の流体のように自由表面を持って流れる高速の流れの部分と、その表面から猛々と舞い上がる砂煙のような部分とからなっていることがわかっており、(A)および(B)はそれぞれ、この高濃度部分および砂煙の部分をつえたものと考えられる。また、これらはそれぞれ火砕流の本体部分および“灰かぐら”の部分に相当すると考えらる。両者の特徴としては、

- ・ 高濃度部 (A) の濃度は、ほぼ一定である。
- ・ 上方の砂煙の部分 (B) では、高さが増加するにしたがい濃度が減少する。

などの傾向があげられる。

図-3の実線は、仮定した濃度分布の理論式($\theta = 13.5^\circ$, $n = 1/15$ の場合)を表している。この理論式は、領域(A)においては粒子濃度を一定と考え、領域(B)での濃度分布について以下のような解析を行って得られたものである。すなわち、流体の質量保存と流体-浮遊粒子間の相対速度を考慮した、平衡状態の二次元流れにおける濃度分布の基礎式は、粒子拡散係数が渦動粘性係数 ϵ に等しいとして次のようにかくことができる。

$$\epsilon \frac{dC}{dz} + w_0 C = 0 \quad (2)$$

ここに、 C :濃度、 w_0 :粒子沈降速度である。本体部(A)での粒子濃度を C_0 (一定値)とし、これを境界条件として(2)式を解くことによって、実線で示した指数型の濃度分布式

$$C(z) = C_0 \exp\{-\alpha(z - H)\} \quad (3)$$

が得られる。ここに、 H は本体部の厚さである。また、 α は分布形を決定するパラメータと考えられ、 $\alpha = w_0/\epsilon$ で表される。やや実験値と分布形が異なる原因としては、浮遊粒子が多いと沈降速度が小さくなるために、この α の値が z 方向に一定ではなく、粒子濃度の関数になっていることなどが考えられる。

次に、図-4に流速 u の分布を示す。これより、

- ・ 領域(A)では、 z とともに流速は増加し、界面付近で最大となる。
- ・ 領域(B)では、界面付近で急激に流速が小さくなり、それより上では緩やかに減少する。

という傾向が見られる。このうち(A)では、前述のように全体がほぼ一様な濃度分布となっているが、この原因として、粒子径が流動深に対して十分小さいために、粒子が周囲の流体と一体となって振舞い、乱れによって浮遊したまま運ばれることなどが考えられる。よって、固気混相流としての火砕流本体をひとつの連続体として扱えるものとし、流速の分布形として次のような通常の乱流に対し

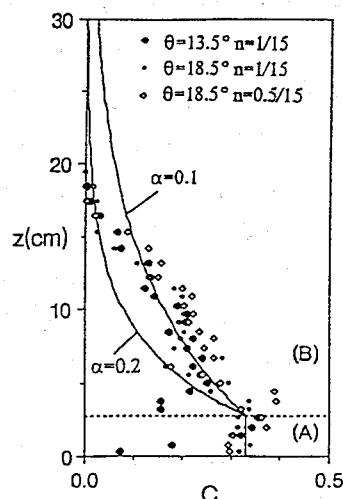


図-3 濃度分布

て成立する対数則

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{H} + \frac{u_m}{u_*} \quad (4)$$

の適用を試みた。ここに、 $u_* = \sqrt{gH \sin \theta}$ であり、 H としてはビデオ画像より読みとった本体部厚さを採用している。なお、カルマン定数 κ に関しては十分な知見がないために、これを変化させて実験データとの比較を行うことにより値を決定した。また、底面付近の情報が得られなかったため、境界条件として(A)と(B)の境界面における流速(ほぼ最大流速 u_m と一致)を与えている。一方領域(B)では、乱流混合による拡散を考えた芦田・江頭²⁾の下層密度流に関する理論の適用を試みたが、この理論は泥水密度流の取扱いに関するものであるため、自由水面にあたる表面が存在しない火砕流に適用するにあたり、上方における境界条件を、粒子の存在する限界高さ H_c において、 $u = 0, du/dz = 0$ として与えるものとした。対数則とあわせて、結果を図-4に実線で示すが、比較的良好に実験値と対応することがわかる。

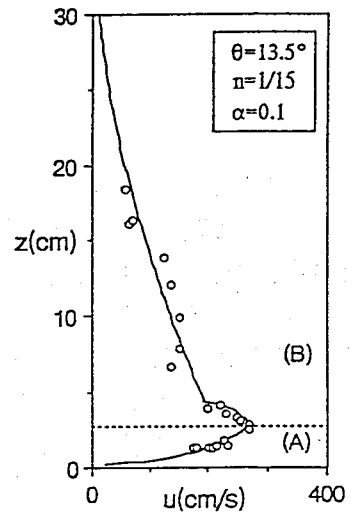


図-4 流速分布

また、(3)式と(4)式を用いて求まる粒子流量

$$Q_s = \int_0^{H_c} C(z) u(z) dz \quad (5)$$

は、下流端で計測した実験値に比較的近い値となることがわかった。このことから、火砕流の内部機構について、上述の理論を用いた議論が可能であると考えられる。

4. おわりに

今回、火砕流の高流動性の維持機構として、粒子からのガス噴出が重要な役割を果たしていることがわかり、さらに、そのような場における流れの内部構造を流路実験によって調べることができた。しかし、実際の火砕流対策を考える上では、火砕流の本体部の厚さやその濃度、流速などを決定する流れの抵抗則の解明が必要であり、これが実験方法の改良とあわせて、今後の課題となろう。

なお、本研究は財団法人砂防・地すべり技術センターの研究開発助成を受けて行われた「火砕流の流動機構に関する研究」の一環である。

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) 芦田 和男・江頭進治：泥水密度流に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第237号、1975, pp.3-29.