

## 火砕流熱風部、火砕サージの運動・堆積の特性

北海道大学農学院 山田孝

## 1、はじめに

溶岩ドーム崩壊によって発生する小規模な火砕流の熱風部は、火砕流本体部から生成されるので、その運動に従属し、本体部に牽引されるように流下する。熱風部は、河道屈曲部で本体部から遊離したり(1991 雲仙普賢岳、1993 マヨン火山、1902 プレー火山)、熱風部のみが河床との比高が大きい段丘面まで到達する(1994 メラピ火山)、海面上を流下する(2000 三宅島、1997 Montserrat's 火山、1944 有珠山など)などの運動特性を有する。本体部から熱風部が遊離する条件や遊離後の熱風部の流下・堆積実態と機構は良くわかっていない。当時は、重力流としての本体部とその上部の浮遊層としての熱風部から構成される火砕流の二層モデルが提案された。このモデルによる二次元数値シミュレーションでは、熱風部が河道の屈曲部で本体部から遊離して独自に流下する場合の流下範囲などの再現は困難であった<sup>1)</sup>(運動方程式内の重力項により流れるとしている)。

火砕流のハザードマップの高度化、対策工、緊急避難施設の開発と効果評価、噴火中の砂防調査手法の開発などのためにも、熱風部を含めた火砕流モデルの改良が不可欠となる。本調査では、平成噴火終息後の雲仙普賢岳を対象として、熱風部が本体部から遊離して甚大な被害をもたらした1991年6月3日熱風部の流下・堆積範囲において、その堆積実態を流れ方向に調べ、過去の研究成果も合わせて流れの状況を考察した。

## 2、調査方法

島原市北上木場地区の熱風部流下範囲において、人力によるトレンチ調査(流れ方向)、侵食河道沿川での露頭観察、堆積物の粒度試験を実施した。熱風部の流下範囲、樹木、電柱の倒壊方向などについての過去の研究成果<sup>2)</sup>、当時の映像をもとに、1991年6月3日の火砕流熱風部は、主に二方向(北上木場町を東に横断した流れと南東方向(水無川河道方向)に流下し、人的被害をもたらした流れ)に流下したと想定した。二方向でのトレンチならびに露頭観察箇所番号は、各々、1'2'⇒3'⇒2⇒3⇒4⇒5、4'⇒5'⇒8⇒7⇒6である(図-1)。前者は、段々畑を横断して駆け上る逆勾配区間、後者は、段々畑を流下する順勾配区間である。トレンチ箇所では、平成噴火直前の地表面(暗褐色の腐植土層)が露出するまで掘削した。トレンチの規模は、幅50cm、長さ50cm、深さ30~60cm程度である。

## 3、熱風部の堆積構造などの流れ方向変化

熱風部の堆積物は、1~3つの堆積ユニットから構成されている。一つのユニットは、灰混じりの砂を主体とする層(下層部という)に火山灰を主体とした層(上層部という)が被覆した構造となっている。下層部は、砂と0.5~1mm程度のガラス成分と0.5~2cm程度のデイサイトの礫を含んでおり、熱風部の底層域を躍動・浮遊によって移動する粗粒分の堆積層と考えられる。上層部は、下層部の上を浮遊しながら流れる細粒分が流れの乱れの低減によって躍動形態に変化したり、沈降して堆積したものと考えられる。上層部、下層部とも、マッシュに堆積しており、火砕サージの堆積構造として度々報告されてきた斜交層理(クロスラミナ)は認められず、平滑床を呈する。礫の正・逆級化は認められない。上層部、下層部ともいずれも炭化木片を含む場合が多い。平成噴火直前の地表面の直上位に存在する最下層のユニットは、火砕流イベントの発生時系列から1991年6月3日の熱風部とみなせる。その上位二つの堆積ユニットは、それ以降(同年6月8日、9月15日)のものなのか、6月3日の2波、3波なのかは分からないので、最下層のユニットのみを対象として、以下の考察をすすめる。

## 3.1.北上木場町を東に横断した流れについて

プロット1'2'では、下層部のみ、プロット3',2,3,4では、上層部と下層部からなる堆積構造を認めることのできる。プロット5では、上層部のみ存在する。プロット4に至る地点(熱風部が本体部から遊離したと想定される箇所から、約800m)までは、上層部の堆積厚は下層部の堆積厚の2倍~8倍と大きい。流下にしたがって、下層部の堆積厚は薄くなる。特に、プロット1'と3'の間で、下層部の厚さは、50~60cmから25cmと大きく減少する。本体部堆積物縁辺からの距離が約100mと最も近いプロット1',2'では、粒径0.5~2cm程度の礫が多数含まれているが、流下に従って、下層部に含まれる礫径も0.5~8mm程度と小さくなる。下層部のマトリックス成分、上層部の粒径も、流下にしたがって細粒化する。例えば、下層部の60%粒径は、堆積厚が急減する1'~3'の区間で、粒径も2.5mmから0.5mmと小さくなり、それ以降は緩やかな減少傾向を示す。上層部の60%粒径は、プロット2,3の区間で最大値を示し、その後は急減する。このあたりは、樹木群が集中して傾倒した箇所であり、熱風部の乱れエネルギーが樹木群によって低減した影響も一つの要因として考えられる。熱風部の流下末端に近いプロット5'では、他の箇所よりも粒径が細かい。上層部、下層部ともに分級はそれほど進んでいない。

## 3.2.北上木場町を南東方向に流下した流れ

プロット4'では、下層部のみ、プロット5',8,7では、上層部と下層部からなっている。流下にしたがって、下層部の堆積厚は、20~30cmから2cmと減少する。特に、プロット4'とプロット5'の間で、下層部の堆積厚は、20~30cmから3cmと急減する。本体部の堆積物縁辺からの距離が約290mと最も近いプロット4'では、下層部に含まれる礫粒は、0.5~2cm程度のものが多数含まれているが、流下につれて0.1~6mmと小さくなる。下層部の堆積厚が急減するプロット4'から5'の区間で、下層部のマトリックス成分の60%粒径も2.3mmから0.6mmと減少

し、それ以降は緩やかに小さくなる。上層部の粒径は、プロット5から8の区間で急減し、その後は緩やかな減少傾向を示す。上層部、下層部ともに分級はそれほど進んでいない。

乱流中の懸濁物質の堆積は、一般的には、流れの減衰(乱れエネルギーの減少)によって、まず始めにトラクション作用で、躍動している粒子が堆積して平滑床を作り、さらに減衰して流れの低領域の状態になるとリップルを作るので、クロスラミナが形成されると解される。今回明らかになった熱風部の堆積ユニットは、マッシュピな平滑床であることから、流れの高領域の状態であったものが急激に減衰し短時間に堆積したこと、単発的に流下・堆積したことなどが推察される。流れが急激に減衰したと考えられる要因として、本体部から遊離したことで、熱風部には運動量が補充されなくなったこと、段々畑や樹木群などの地表面の粗度(特に畑の石垣)が熱風部の躍動・浮遊域の運動を妨げるように働いたことなどが考えられる(石垣の前面、背面での堆積厚は相対的に大きい)。

北上木場町を東に横断した流れについて、プロットごとに下層部の最大粒径の限界摩擦速度、限界流速を算出すると、それらの値の範囲は1.9~5.0m/sec、24~62m/secとなる。また、上層部の60%粒径の限界流速は、31~79m/secとなる。ここで、摩擦速度が沈降速度と等値となる状態を浮遊限界とし、現地(噴火当時)での樹皮の損傷高(磨耗、剥れ)、掃流砂、浮遊砂、飛砂などの知見をもとに下層部の流動深を3mとした(最大粒径の200倍に相当)。上層部の流動深は、映像から100mとした。流速分布は、下層部、上層部ともに対数則を仮定し、相当粗度は、下層部は0.1m、上層部は0.05mとした。ちなみに、樹木や電柱の基礎倒壊、曲折倒壊から力学的に推定した熱風部の流速(最低値)は、場所によって異なるが、約25~69m/secと報告されている<sup>2)</sup>。熱風部が本体部から遊離したと推定され箇所に近いプロット1'での躍動・浮遊帯の平均的な密度は、0.3g/cm<sup>3</sup>程度と高いことが推定される。

#### 4、想定される流れ構造

これまで、火砕流のモデルとして、暫定的に本体部と熱風部の二層構造としていたが、本調査結果より、本体部と熱風部の低層域での躍動・浮遊帯、その上部を浮遊帯とした三層構造で考えるほうがより現実的であると思われる(図-2)。熱風部が本体部から外れて単独で流下すると、下層部の躍動・浮遊帯は流れの減衰に伴って堆積し始め、浮遊帯が卓越するようになる。北上木場町を東に横断した流れの上層部について、Rouse数( $w/\kappa u^*$ )を求めると、60%粒径で1.3~3.3程度の値をとる(カルマン定数は浮遊土砂濃度の増加とともに減少するが、ここでは、清水流の0.4を用いた)。浮遊砂の研究では、Rouse数が小さくなるほど浮遊砂濃度は水深方向に一様化することが明らかにされている。熱風部の上層部の土砂濃度分布は、流動深方向に大きく変化していると考えられる。一方、1993年6月23日に中尾川流域で発生した火砕流のビデオによると、熱風部が本体部と一緒に流下している時、本体部から外れた直後は、流れの底部に無数の小さな渦が存在し、それらの渦の回転速度も大きい。その後は、流下速度の減少とともに、渦のスケールは大きくなり、回転速度は低下する。回転速度が粒子の沈降速度よりも大きければ、粒子は浮遊していると考えられる<sup>3)</sup>。前述の検討は、定常状態、非圧縮性を前提としたものであるが、今後は、乱渦の生成・発達(渦スケールと回転速度の変化)との関係で、熱風部の流れの機構を考えていきたい。

参考文献)

- 1)Yoshiharu Ishikawa, Takashi Yamada and Kiyoo Ido(1994) : Mechanism of the Hot Ash Clouds of Pyroclastic Flows and its Numerical Simulation Methods, J. Erosion Control Engineering Society, 47-1, 14~20.
- 2)石川芳治、山田孝、矢島重美、下田義文(1993) : 雲仙普賢岳で発生した火砕流熱風部による災害、砂防学会誌 46-4, 3~9.
- 3)Alain Burgisser, George W. Bergantz(2002): Reconciling pyroclastic flow and surge: the multiphase physics of pyroclastic density currents, Earth and Planetary Science Letters 202.

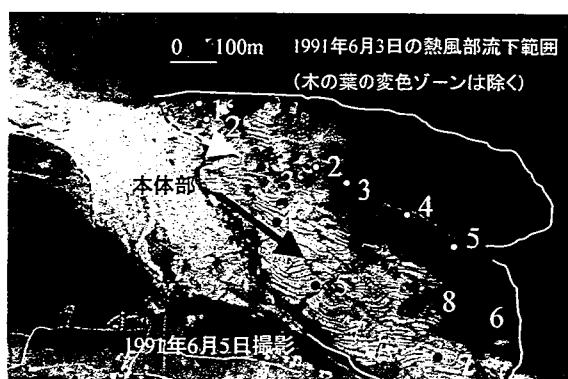


図-1 調査プロットの位置

※黒、白の矢印は熱風部の流下方向を示す

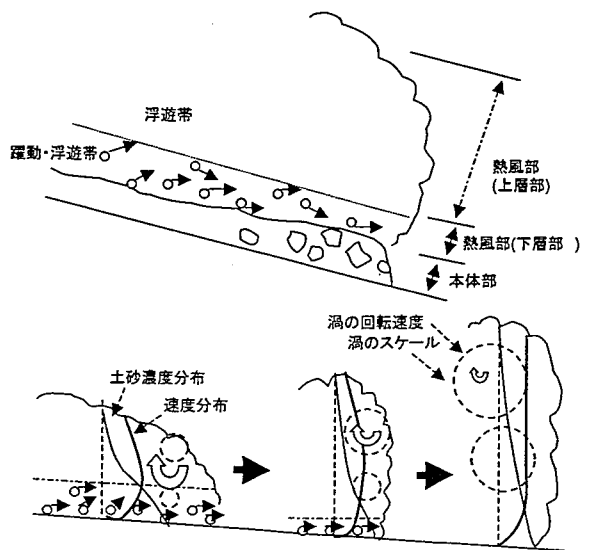


図-2 火砕流の流れ構造(三層構造)と熱風部が単独で流下する場合の流れ構造