

# 火砕流熱風部の流れ構造と対策工の可能性についての研究

## Characteristic of Hot Ash Clouds Movement and Deposition after Separation from it's Main Body of Lava Dome Collapse-induced Pyroclastic Flow and Possibility of it's Measures

山田 孝  
Takashi YAMADA

北海道大学大学院 農学研究院 准教授

### 要 旨

#### Abstract

Flow-direction changes in the structure of deposits and grain size distribution of hot ash clouds from the pyroclastic flows that occurred on June 3, 1991(Kitakamikoba district) and June 24, 1993(Senbongi district) in the Unzen Volcano were investigated. Changes in the flow velocity, eddy scale, and the eddy rotational speed of the hot ash clouds were also revealed by VTR-analysis .The typical structure of a flow unit of the hot ash cloud deposits showed the alternation of a sand layer and an ash layer. Only sand layers were identified in the area where the hot ash clouds separated from the main body of pyroclastic flow. The depth and grain size of the sand layer decreased rapidly in the lower area where the hot ash clouds separated. The ranges of the critical velocities of traction and suspension for the 60% grain size of the hot ash cloud deposits of the Senbongi district were calculated to be 4.5 to 9.5m/sec and 6.7 to 13.6 m/sec, respectively, using Bagnold's critical friction velocity equation and the logarithmic distribution law (flow velocity: 18 to 37m/sec). Above results might be expected to offer that hot ash cloud flow structure is the combination of a high-density sand suspension prevailing layer as a lower part and a low-density ash suspension layer as a upper part. On the basis of the above findings, the possibility of physical measures against hot ash clouds was studied. To control the behavior of hot ash clouds, such as fence structures would be available for reducing turbulent energy ,promotion settling and capturing of suspended materials in hot ash clouds

《Key words : hot ash cloud; deposits survey; VTR-analysis; critical velocity of traction and suspension; flow structure; physical measures》

## 1. はじめに

溶岩ドームの崩壊によって発生する火砕流の熱風部（重力流動をしている本体部から得る運動エネルギーを自らの体積を増加させるために消費する固・気混相流の部分）は、火砕流の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分離する（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）などの運動特性を有する。過去に、熱風部によって甚大な被害が出たケースの多くが、本体部が相当の速度で流下中（本体部から熱風部への運動量の供給が活発になされているとき）に流路屈曲部などで熱風部が外れ、大きな乱れエネルギーを持った状態で独自に流下した場合である。しかしながら、そのような本体部から熱風部が分離する条件や分離後の熱風部の流下・堆積実態、その流れの構造は良くわかっていない。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を用いた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を精度良く再現できなかった<sup>1)</sup>。

火砕流の運動に関する既往の研究としては、ビデオ解析によるもの<sup>2)3)</sup>、堆積物調査の結果から流れの構造を推定したもの<sup>4)</sup>、理論的考察と実験によるもの<sup>5)</sup>、に大別できる。火砕流が頻発した雲仙普賢岳の噴火時（1991～1995年）は、火砕流の平均流速の変化や流速係数などがビデオ解析によって算出された<sup>2)</sup>。また、堆積物先端部付近の局所的な場所での堆積構造や組成などが詳細に調べられたが<sup>4)</sup>、安全管理上、調査実施可能区域が限定されたため、流れ方向の変化などは明らかにされなかった。さらに、堆積物調査の結果とビデオ解析の結果を組み合わせ、流れ構造を議論するまでには至っていない。溶岩ドーム崩壊起因型の火砕流は通常、複数回にわたって発生するので、その堆積物はいくつもの火砕流が重なって堆積した状態となっていることが多く、仮に、ある特定の火砕流の流れをビデオなどで撮影できたとしても、その流れを構成している粒子や堆積構造を火砕流イベントごとに調べられた事例はほとんどない。また、逆に、過去の主要なイベントの堆積物を詳細に調べた事例はあっても、それを形成した流れの諸量を解析できる映像資料は存在しない場合がほとんどである<sup>6)</sup>。

本研究では、同一の火砕流に対して、堆積物調査とビデオ解析を組み合わせるという観点に基づき、雲仙普賢岳で熱風部が本体部から分離して独自に運動した事例の中から、1993年6月24日に中尾川流域千本木地区で発生した火砕流を抽出した。流れを解析できる映像資料は得られなかったが、単一のイベントの流れ方向の堆積構造と粒径の変化を明らかにするという目的で、1991年6月3日に水無川北上木場地区で発生した火砕流も対象とした。それらの流下・堆積範囲において、流れ方向の堆積物の構造と粒径の調査を行った。また、千本木地区で発生した火砕流の熱風部の速度、渦の速度などをビデオから判読した。堆積物の調査結果、ビデオ解析の結果をもとに、火砕流本体部から熱風部が分離した後の熱風部の堆積・運動特性について考察した。以上の結果とこれまでの火砕流の流れ構造などに関する既往研究をもとに、火砕流熱風部の対策工の可能性について考察した。

## 2. 研究方法

長崎県島原市の千本木地区、北上木場地区で、各々、1993年6月24日、1991年6月3日に発生した火砕流の熱風部流下範囲（樹木の葉が変色、しなだれた区域は除く）を対象とした。それらの流下範囲、発生当時の映像（写真、ビデオ）、樹木、電柱の倒壊方向などに関する過去の研究成果、両地区

での堆積物の残存区域（治山・砂防工事，道路工事による地形改変がなされていない区域）の現況をもとに，熱風部の流下方向を想定した．それをもとに，トレンチ，露頭観察の位置を複数箇所，選定した．トレンチ掘削箇所では，平成噴火直前の地表面（暗褐色の腐植土層）が露出するまで人力で掘削した．トレンチの規模は，幅 0.5m，長さ 1m，深さ 0.3～0.6m 程度である．露頭観察は，北上木場地区の火砕流堆積区域に形成された侵食河道沿いで実施した．

千本木地区（写真-1）では，右岸側に当時の火砕流堆積物が残存している．そこでの熱風部流れ方向をビデオ（1993年6月24日撮影，撮影者不明），火砕流発生後の空中写真などをもとに確認し，東北東方向への流れのひとつを選定した．流れ方向のトレンチ箇所の番号は，1⇒2⇒3⇒4⇒5⇒6である．

北上木場地区での，1991年6月3日の火砕流熱風部は，主に二方向（北上木場地区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．それらの流れ方向のトレンチならびに露頭観察箇所の番号は，各々，1' 2'⇒3'⇒2⇒3⇒4⇒5，4'⇒5'⇒8⇒7⇒6である（写真-2）．ダッシュをつけた番号は，露頭観察箇所である．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．

ついで，千本木地区での堆積物調査の結果から明らかになった熱風部の堆積物の代表粒径，堆積厚などの情報をもとに，熱風部の流速分布を仮定したうえで，摩擦速度などを求め，代表粒径の移動限界流速，浮遊限界流速を試算した．また，火砕流熱風部を構成している渦の回転速度などをビデオで判読し，代表粒径の沈降速度との比較などを行った．

以上の熱風部の堆積構造，移動限界，浮遊限界などの情報から，本体部から分離した熱風部の流れ構造，運動・堆積特性について検討し，火砕流熱風部の対策工の可能性を考察した．

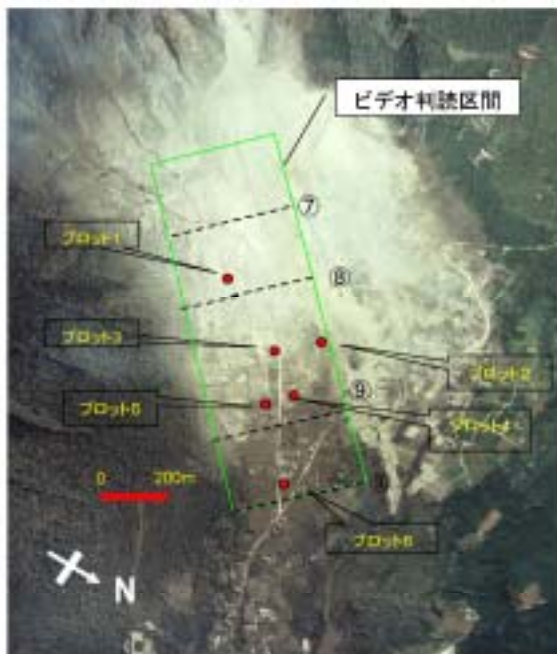


写真-1 1993年6月24日に雲仙普賢岳中尾川流域千本木地区を流下した火砕流の熱風部堆積物調査プロット箇所とVTR判読区間(⑦～⑩)（雲仙復興事務所提供（1993年6月24日撮影））に追記

Photo-1 investigation plots of hot ash cloud deposits of June 24, 1993 in Nakao River basin, Unzen volcano (offer: Unzen Restoration Project Office)

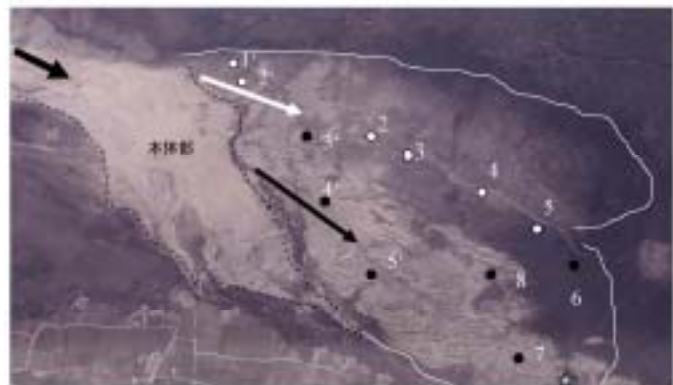


写真-2 1991年6月3日に雲仙普賢岳水無川流域北上木場地区を流下した火砕流熱風部の堆積物調査プロット箇所（1991年6月5日撮影）

※黒、白の矢印は熱風部の想定流下方向を示す ※木の葉の変色区域は除く

※☆印は熱風部の流下状況について，証言がなされた住民の自宅

Photo-2 investigation plots of hot ash cloud deposits produced on June 3, 1991 in Mizunashi river basin, Unzen Volcano (taken on June 5, 1991)

### 3. 熱風部の堆積構造などの流れ方向変化

写真-3, 4, 5に, 千本木地区, 北上木場地区で観察された熱風部の流れ方向の堆積物を示す. 両地区とも, 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.

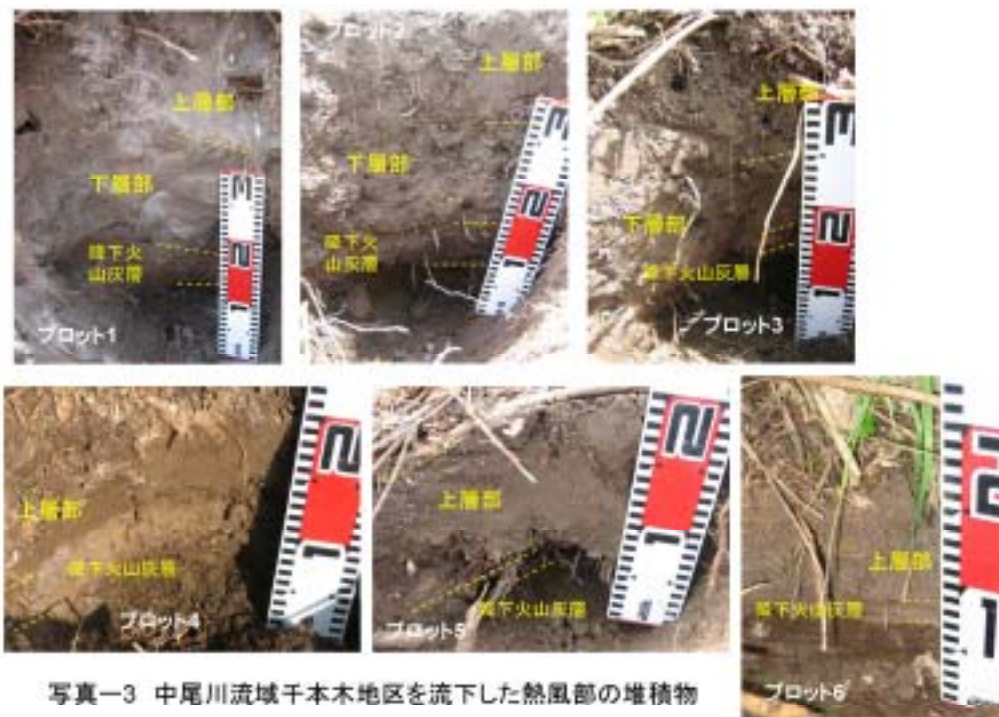


写真-3 中尾川流域千本木地区を流下した熱風部の堆積物  
(流れ方向: 1⇒2⇒3⇒4⇒5⇒6) (2006年4月21日撮影)

photo-3 hot ash cloud deposits in east-north-east flow direction in the Senbongi district of Nakao river basin (taken on April 21, 2006)  
(flow direction; 1⇒2⇒3⇒4⇒5⇒6)

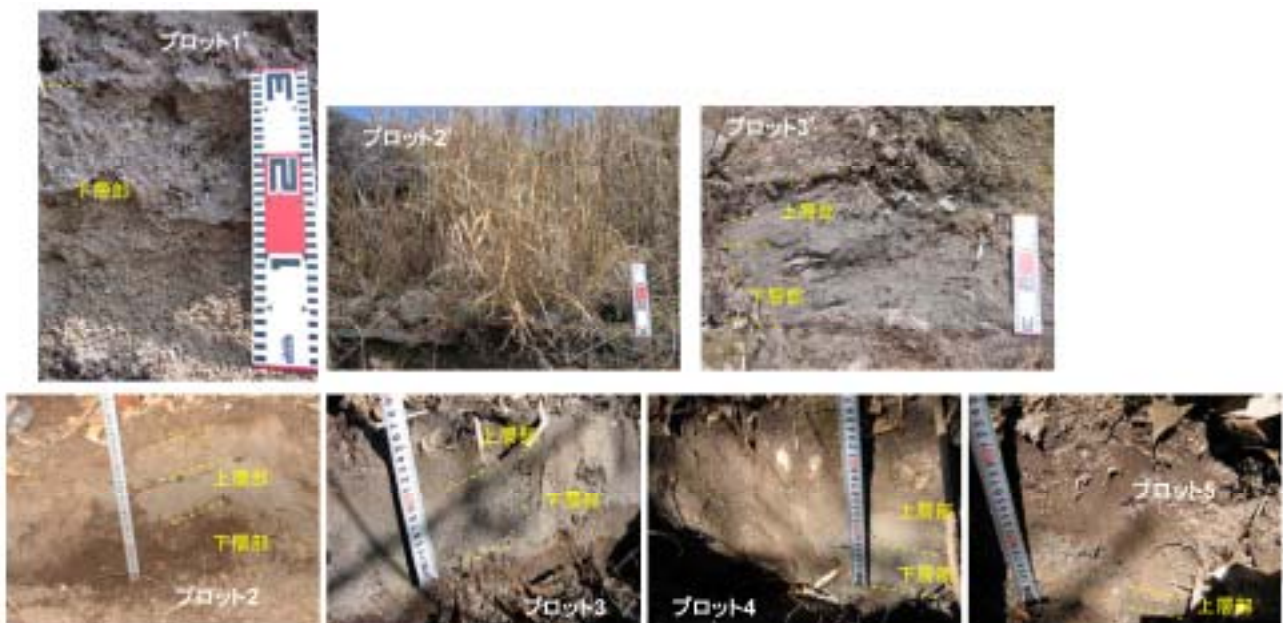


写真-4 水無川流域北上木場地区を東に横断した熱風部の堆積物

(流れ方向: 1'⇒2'⇒3'⇒2⇒3⇒4⇒5) (2006年2月21日, 3月10日撮影)

photo-4 hot ash cloud deposits in east flow direction in the Kitakamikoba district of Mizunashi river basin (taken on February 21, 2006 and March 10, 2006) (flow direction; 1'⇒2'⇒3'⇒2⇒3⇒4⇒5)

千本木地区では、平成噴火直前の地表面の上位に、1993年6月23日の火砕流（扇頂部直下で堆積）の熱風部が拡散した火山灰が自由沈降して形成したと考えられる火山灰層が堆積しており、その上位に同年6月24日の熱風部が堆積している。北上木場地区では、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日の熱風部と断定できる。ただし、その上位の堆積ユニットは、6月3日の2波、3波なのか、あるいはそれ以降（同年6月8日、9月15日）のものなのかは特定できない。そこで、本研究では、最下層のユニットのみを対象とした。ユニットの構造は、以下の3タイプに分類できる。



写真-5 水無川流域北上木場地区を南東方向に流下した熱風部の堆積物  
（流れ方向:4'⇒5'⇒8⇒7⇒6）（2006年2月21日,3月10日撮影）

photo-4 hot ash cloud deposits in south-east flow direction in the Kitakamikoba district of Mizunashi river basin (taken on February 21,2006 and March 10,2006) (flow direction; 4'⇒5'⇒8⇒7⇒6)

- ・タイプⅠ：砂（その他、火山灰、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いる）を主体とする層（以下、「下層部」という）に火山灰を主体とした細粒のものからなる層（以下、「上層部」という）が被覆した構造
- ・タイプⅡ：「下層部」のみの構造
- ・タイプⅢ：「上層部」のみの構造

両地区とも、上層部、下層部はいずれも緻密に充填されたように堆積している。これらには、火砕サージの堆積構造として、過去に報告された斜交層理（クロスラミナ）は認められない（流れ方向に比較的長距離区間の観察が可能な露頭箇所においても認められない）。堆積構造は、平滑床を呈し、礫の分布は、正・逆級化を示さず、ランダムである。下層部の底部付近には、細礫が集中してかみ合ったような層（風成堆積物の運搬様式のひとつである「表面クリープ帯」<sup>7)</sup>）は認められない。

「下層部」、 「上層部」は、Walker・McBroome がセント・ヘレンズ火山のブラスト堆積物で指摘した”Layer 1”,”Layer 2”<sup>8)</sup>に相当すると考えられる。上層部、下層部ともいずれも炭化木片を含む場合が多い。上層部は、層理が認められないこと、沈降速度の大きな大粒径が層の下方に集まる堆積構造を呈していないこと、などの理由から、熱風部の拡散した灰が自由沈降して形成された層ではなく、流れていたものが堆積した層であると考えられる。なお、自由沈降により、上層部の上位に薄く堆積したと考えられる層は、存在しなかった（堆積後の度重なる降雨により流失したと考えられる）。

図-1, 2に, 流れ方向の堆積構造, 堆積厚の変化を, 図-3, 4, 5に粒径分布の比較を示す. また, 各プロットでの代表粒径を60%としたときの, その方向の変化を図-6, 7, 8に示す. 千本木地区を東北東に流下した流れについて, プロット1, 2では, 下層部と上層部の双方が観察される. プロット3, 4, 5, 6では, 上層部のみ認めることができる. 下層部の堆積物を観察できたプロットは2カ所と少ないので, その変化傾向を把握することはできないが, 上層部の堆積厚は, 流下方向に従って0.15mから0.1mへとわずかに減少していく傾向が見られる. プロット1から3にかけて, 下層部のマトリックス成分の60%粒径は, 約0.7mmから0.2mmと変化する. 上層部のそれは, 0.1mmから0.3mmの範囲で変動する.

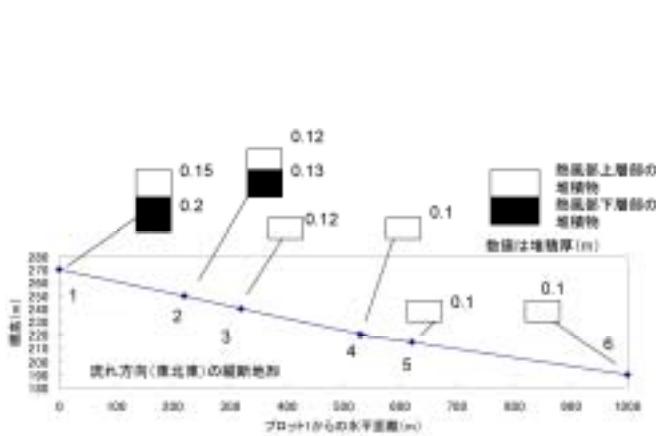


図-1 熱風部の堆積物の流れ方向の堆積構造, 堆積厚の変化 (中尾川流域千本木地区)  
Fig-1 Changes in the structure and depth of hot ash cloud deposits in east-north-east flow direction (Senbongi district of Nakao river basin)

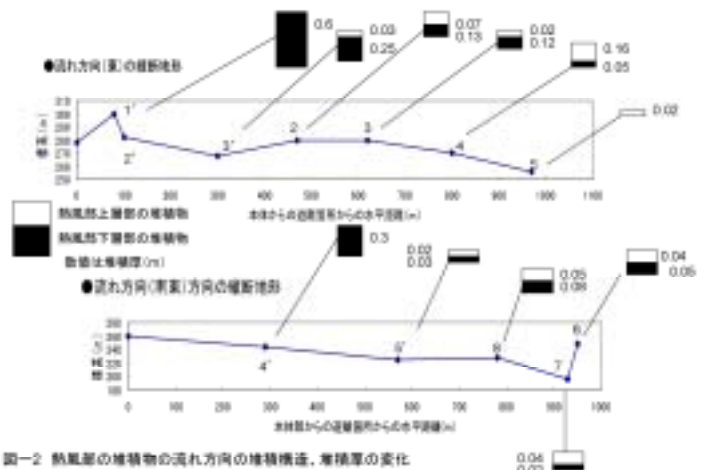


図-2 熱風部の堆積物の流れ方向の堆積構造, 堆積厚の変化 (水無川流域北上木場地区)  
Fig-2 Changes in the structure and depth of hot ash cloud deposits in the flow direction (Kitakamikoba district of Mizunashi river basin) (above: east direction, below: south east direction)

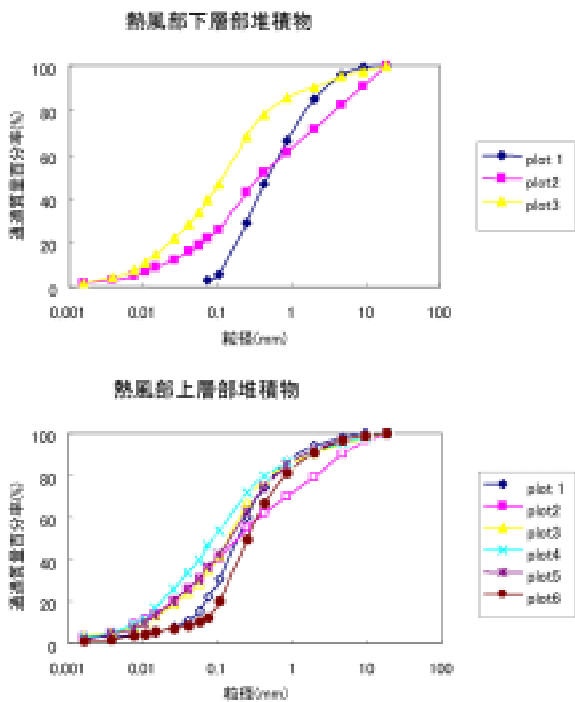


図-3 熱風部の堆積物の流れ方向の粒度分布の変化 (中尾川流域千本木地区を東北東方向に流れた流れ)  
Fig-3 Changes in grain size distribution in the east-north-east flow direction in the Senbongi district of Nakao river basin

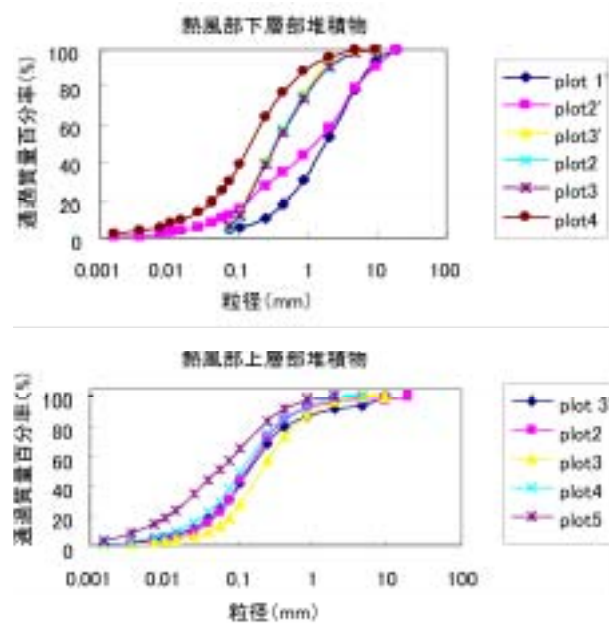


図-4 熱風部の堆積物の流れ方向の粒度分布の変化 (水無川流域北上木場地区を東に横断した流れ)  
Fig-3 Changes in grain size distribution in the east flow direction in the Kitakamikoba district of Mizunashi river basin

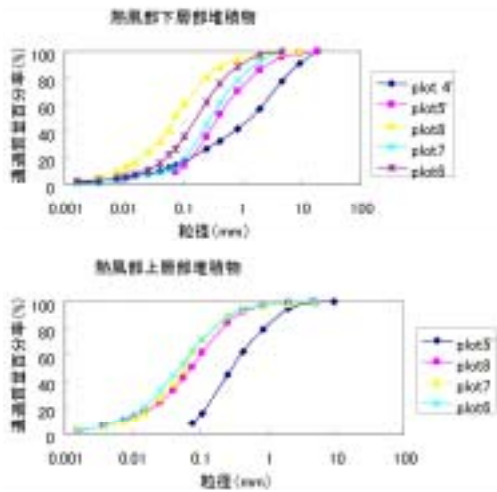


図-5 熱風部の堆積物の流れ方向の粒度分布の変化

(水無川流域北上木場地区を南東に横断した流れ)

Fig-5 Changes in grain size distribution in the south-east flow direction in the Kitakamikoba district of Mizunashi river basin

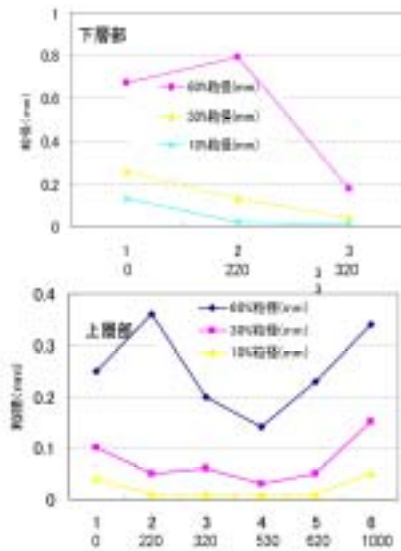


図-6 中尾川流域千本木地区での熱風部堆積物の流下方向(東北東)の粒度変化

上段:調査プロットの番号 下段:本体部分離箇所からの距離(m)(熱風の流下距離:1200m)

Fig-6 Changes in grain size distribution in east-north-east flow direction (Senbongi district of Nakao river basin)

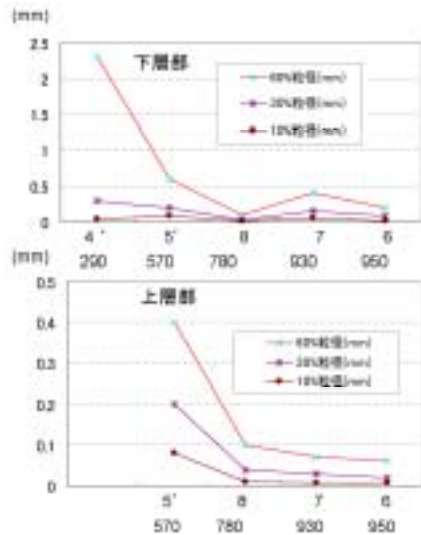


図-7 水無川流域北上木場地区での熱風部堆積物の流下方向(南東)の粒度変化

上段:調査プロットの番号 下段:本体部分離箇所からの距離(m)(熱風の流下距離:1200m)

Fig-7 Changes in grain size distribution in south-east flow direction (Kitakamikoba district of Mizunashi river basin)

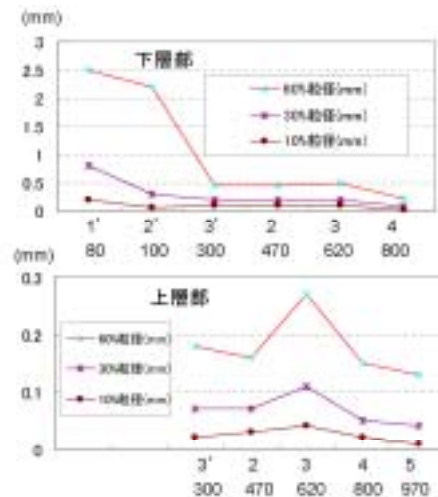


図-8 水無川流域北上木場地区での熱風部堆積物の流下方向(東)の粒度変化

上段:調査プロットの番号 下段:本体部分離箇所からの距離(m)(熱風の流下距離:1300m)

Fig-8 Changes in grain size distribution in east flow direction (Kitakamikoba district of Mizunashi river basin)

北上木場地区を東方向に流下した流れについて、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かできる。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分離したと想定される箇所から、約 800m)までは下層部の堆積厚は上層部のその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'との間で、下層部の厚さは、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、流下にしたが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、流下にしたがって小さくなる。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ことの影響も考えられる。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。

次に、北上木場地区を南東方向に流下した流れについてみる。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、30cm から 2cm と減少する。特に、プロット 4' とプロット 5' との間で、下層部の堆積厚は、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は、0.5~2cm 程度の径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。

千本木地区、北上木場地区で確認された熱風部堆積物の下層部は、熱風部の底層域を浮遊しながら移動する粗粒分が堆積した層と考えられる。前述のように、細礫が下層部の底部付近に凝集した堆積層は認められないことから、礫が表面をクリープしながら堆積する表面クリープ帯の存在は考慮しなくてもよいと思われる。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り、沈降・堆積した層と考えられる。

図-1, 2 からも推察されるように、熱風部が本体部から分離して単独で流下すると、下層部の浮遊帯は流れの減衰に伴って堆積し始め、上層部の浮遊帯が卓越するようになると考えられる。災害当時に、プロット 7 から南東方向に約 150m に位置する自宅（写真-2 内の☆：熱風部の流下範囲の先端付近に相当）にて被災した住民の証言によると、熱風部が自宅を通過するときには、音はしなかったと証言している<sup>9)</sup>。堆積物の粒径の情報もあわせると、この箇所では、プロット 5（東方向）と同様に、上層部主体の流れになっていたと想定される。

ところで、乱流中の懸濁物質は、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<sup>7)</sup>。今回明らかになった熱風部の堆積ユニットは、マトリックス成分が緻密に充填された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は、本体部から分離したために、熱風部には運動量が補充されなくなったことが主と考えられるが、その他にも、段々畑や樹木群などの地表面の粗度（特に畑の石垣の落差：1.8~2m）が熱風部の浮遊帯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）。

#### 4 . 熱風部の運動特性の考察

以上の堆積実態をもとに、熱風部の運動特性について考察する。まず、中尾川千本木地区での各プロットにおいて、下層部、上層部の流動深方向の平均的な密度を（1）式により求める。

$$\rho_f = (1 - C)\rho_a + C\rho_s \cdots \cdots (1)$$

ここで、 $\rho_f$ : 流れの平均的な密度、 $C$ : 流れの平均的な土砂濃度、 $\rho_a$ : 空気の密度、 $\rho_s$ : 土粒子の密度 (=2.6)



下層部の流れの平均的な土砂濃度は、各プロットでの堆積厚（間隙比（0.7）を考慮した深さ）を下層部の推定の流動深で除して求めた。下層部の流動深は、現地で認められた樹皮の損傷（磨耗、剥れ、磨り減り）は、主に、浮遊帯中の砂以上の大きさの粒子によるものとみなし、その高さをもとに、3m（堆積物サンプルの最大粒径の約 150～200 倍に相当）とした。上層部についても、同様に、各プロットでの堆積厚を、ビデオ画像から判読した流れの先端部の高さで除して求めた。空気の密度は、水無川での被災車両の燃焼実態<sup>10)</sup>から、温度を 400° として求めた。表-1 に、平均的な密度の変化を示す。下層部の密度は、流下方向に減少するように見えるが、上層部の密度は大きく変化しない。本体部から分離した直後と想定されるプロット 1 での平均密度は、約 100kg/m<sup>3</sup> 程度と高い。流れの密度が高いことが、熱風部が本体部から分離する主要な要因であると思われる。

表-1 下層部、上層部の平均的な密度(中尾川)  
table-1 calculated average density of hot ash cloud

調査プロット	下層部の ρ f(kg/m <sup>3</sup> )	上層部の ρ f(kg/m <sup>3</sup> )
1	102.5	12
2	66.8	9.7
3	61.7	9.7
4	-	8.2
5	-	8.2

つぎに、千本木地区で撮影されたビデオから、熱風部の渦のスケール、渦の回転速度（上向きの変動速度）などを読み取った。なお、熱風部の流れの先端の流動深、流速については、過去の解析結果<sup>11)</sup>を用いた。

表-2 ビデオ解析結果(中尾川)  
table-2 VTR-analysis results of hot ash clouds movement

測定区間	流速U(m/sec)	流れの先端部の流動深(m)	渦の最小スケールL(m)	渦の最大スケールL(m)	小さな渦の回転速度ω(m/sec)	レイノルズ数Re (u*ks/ν)	u/u*
⑦-⑧	18.1	20	10	20	6	6006	20.1
⑧-⑨	37.3	20	10	25	15	12040.3	20.7
⑨-⑩	16.7	20	10	12	5	5920.3	18.8

ν : 3×10<sup>-5</sup>m<sup>2</sup>/sec(300°)

プロット	VTR判読区間 (写真)参照)	下層部		上層部	
		u/w(D60)	u*/w(D60)	u/w(D60)	u*/w(D60)
1	⑦-⑧	9.2	1.4	5.1	0.8
2	⑧-⑨	17	2	9.5	1.1
3	ν	11.4	2	12.7	1.5
4	ν	-	-	4.6	0.8
5	ν	-	-	3.6	0.6
6	⑨-⑩	-	-	3	0.5

表-2 にビデオの解析結果を示す。摩擦速度(u\*)と相当粗度(ks)を用いたレイノルズ数(Re)は、Re=5.9×10<sup>3</sup>～12×10<sup>5</sup> 程度である。相当粗度(ks)は、熱風部流下前の畑の畝高を想定して 0.2m とした（強風時の農作地帯での粗度高さとして、1~3×10<sup>-1</sup>m という値が報告されている<sup>12)</sup>）。

流れの流速分布は、粘性低層を考慮しない対数法則 (2) 式が「下層部」、「上層部」に適用できるものと仮定した。ここで、過去の研究から、比較的規模の大きい火砕流(流下距離が 10km 程度)のカルマン定数については、0.4 付近に分布すること<sup>3)</sup>を参考に、カルマン定数 (κ) は 0.4 と仮定した。

$$\frac{u}{u_*} = 2.5 \log_e \frac{y}{k_s} + 8.5 \dots \dots (2)$$

ここで、u：流速，u\*：摩擦速度，y：流れの先端部の流動深，ks：相当粗度

(2) 式を用いて、各プロットの下層部、上層部の代表粒径（60%粒径）の浮遊限界速度を求めた。沈降速度(w)は、下記の式を用いた。

$$w = \sqrt{\frac{4g \cdot d(\rho_s - \rho_f)}{3C_d \cdot \rho_f}} \dots \dots (3)$$

ここで、g：重力加速度，d：粒径，ρs：土粒子の密度 (=2.6) Cd：抗力係数（粒子を球とみなして 0.5 を採用した）

流動深方向の土砂濃度分布については、実データはないが、ビデオ解析の結果から上層部の Rouse 数( $w/ku^*$ )を求めると、60%粒径で 1.5~5.1 程度の値をとる(摩擦速度( $u^*$ )は、ビデオから判読した流速を対数法則に代入して求めた。カルマン定数( $\kappa$ )は、浮遊土砂濃度の増加とともに減少することが知られているが、ここでは、清水流の値(0.4)を用いた)。  $u^*/w$  が小さくなると Rouse 数は大きくなる傾向を示す。浮遊砂では、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。熱風部は、本体部から分離した後は流れが急激に減衰して  $u^*/w$  が小さくなると、Rouse の土砂濃度分布を想定した場合、上層部の土砂濃度分布は、流動深方向に大きく変化すると考えられる。

次いで、各プロットごとに、摩擦速度( $u^*$ )が代表粒径 (60%粒径) の沈降速度( $w$ )と等値となる状態を浮遊限界として、限界摩擦速度 ( $u^*c$ ) を求め、(2) 式から限界流速 ( $Uc$ ) を求めた(表 - 3)。ここで、下層部の流動深は、前述の 3m、上層部の流動深は、熱風部の流れ先端部の流動深と同じ 20m とした。相当粗度は、0.2m (前述) とした。得られた浮遊限界流速は、約 7~34m/sec となった。ビデオから判読した熱風部先端の流速は、17~37m/sec (流速 37m/sec という値が得られた区間では、減速しつつある流れがその後続の火砕流によって急激に押し出したために加速されたと考えられる) であり、浮遊限界流速よりも多少大きめである。

表-3 浮遊限界流速の試算結果(中尾川)  
table-4 calculated critical suspension velocity

・下層部			
調査プロット	D60(m)	$U^*c(D60)$ (m/sec)	$Uc$ (m/sec)
1	0.00067	0.7	10
2	0.00079	0.9	13.6
3	0.00018	0.4	6.7
・上層部			
調査プロット	D60(m)	$U^*c(D60)$	$Uc$
1	0.00025	1.2	23.9
2	0.00038	1.6	31.8
3	0.0002	1.2	23.7
4	0.00014	1.1	21.6
5	0.00023	1.4	27.7
6	0.00034	1.7	33.7

次に、各調査プロットの下層部 (流動深 3m と仮定) の 60%粒径の移動限界流速を、以下に示す飛砂についての Bagnold の式(4)と対数法則式(2)を用いて試算した。

$$u^*c = A \sqrt{g \cdot D \cdot \frac{\sigma - \rho}{\rho}} \dots (4) \quad u^* \cdot D / \nu > 3.5, A = 0.1$$

ここに、 $u^*c$ : 限界摩擦速度、 $g$ : 重力加速度、 $D$ : 粒径、 $\sigma$ : 砂の密度、 $\rho$ : 空気の密度、 $\nu$ : 空気の動粘性係数

計算結果を表-4 に示す。移動限界流速は、4.5~9.5m/sec 程度となり、下層部の浮遊限界流速 (6.7~13.6m/sec(表-3)) よりも若干小さいが、大きくは変わらない。このことから、下層部での粒子の移動形態においても、浮遊が卓越して、流れが減衰すると直ちに停止・堆積することが想定される (堆積構造の特徴とも調和的である)。

ちなみに、水無川において、熱風部に追いつかれながらも辛うじて生きながらえたある住民は、「・・・熱風の先端に追いつかれ、黒い煙にすっぽり覆われました。外は真っ暗で何も見えず、その中を真っ赤な石が飛んでいました・・・」と証言している<sup>9)</sup>。

表-4 移動限界流速(60%粒径) (中尾川)  
table-4 calculated critical traction velocity

プロット	$u^*$ (m/sec)	$u^* \cdot D60 / \nu$	$u^*c(D60)$ (m/sec)	$U$ (m/sec)
1	0.9	20.1 > 3.5	0.57	8.7
2	1.86	49 > 3.5	0.62	9.5
3	1.86	11.2 > 3.5	0.3	4.5

$\nu$ : 動粘性係数(m<sup>2</sup>/sec) 0.00003

一方、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、熱風部が本体部から外れた直後は、流れの流動深とほぼ等しい大きなスケールの渦と流れの底部に無数の小さな渦が存在する(写真-6)。大きな渦のスケールは小さな渦の約2~3倍であり、先端部の流動深に近い。熱風部の流れの先端を構成している小さな渦の回転速度(上向きの移動速度)は、5~15m/sec程度である。Alainは、渦の回転速度が粒子の沈降速度より大きければ、粒子は浮遊すると考えた<sup>6)</sup>。渦の回転速度と沈降速度(各プロットの60%粒径)との比は、下層部で9.2~17、上層部で3~12.7程度の値をとり、これだけから判断すると、粒子は浮遊状態であると考えられる。Allein<sup>13)</sup>は、摩擦速度と沈降速度の比が0.8以上という浮遊条件を提示した。流れの摩擦速度と沈降速度(各プロットの60%粒径)との比で見ると、下層部では2以下、上層部で、0.5~1.5程度の値をとり、熱風部内の粒子が浮遊しながらも沈降・堆積した実態を考えやすい。



写真-6 熱風部の流れの先端を構成している渦  
(住民が撮影したビデオ(撮影者不明)から転用)  
(図-1の撮影区間⑧~⑨の間)

fig-6 eddys in the flow front of hot ash cloud

以上のことから、本体部から分離した後の熱風部の流れについては、下層付近に粗粒分を主体とした粒子が高密度で主に浮遊形態で移動しており、またその上層部は、低密度で細粒分を主体とした粒子が浮遊しながら移動する二層構造と考えられる。類似の現象として火砕サージの流れ構造は、高い密度の下層部と上層部の二層構造からなることが報告されているが<sup>14)</sup>、ここでいう上層部とは、熱風の拡散後に自由沈降による堆積物を形成する流れであり、本論文で示した上層部とは異なる。

## 5. 火砕流熱風部の対策工の可能性について

雲仙普賢岳で発生した火砕流は、溶岩ドーム崩落型の火砕流であり、広義の火砕流の中では、極めて規模が小さい「小規模火砕流」に分類される。そのタイプの火砕流については、重力により流れる「本体部」と流体内部の圧力勾配によって流下する「熱風部」から構成されるモデル<sup>1)</sup>が既に提案された。本研究では、熱風部のより詳細な流れ構造として、粗粒分を主体とした粒子が高密度で主に浮遊形態で移動する「上層部」と低密度で細粒分を主体とした粒子が浮遊しながら移動する二層構造からなることが現地調査などから推察された。

本体部と熱風部は、その運動メカニズムが異なるので、対策工の考え方も分けて考える必要がある。

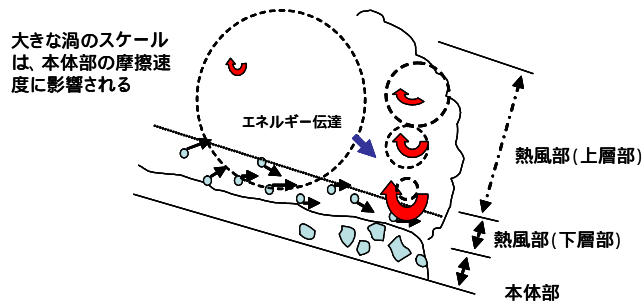
本体部は、重力(勾配が重要なパラメーター)によってその運動が規定され、一般に、勾配が緩くなり始める谷出口下流において、土石流や泥流と同様、氾濫・堆積を開始し、ローブや扇状地を形成する。したがって、谷出口下流での氾濫・堆積を制御(捕捉、横方向への運動量拡散)する遊砂地やそれなりの規模を有する砂防ダムが有効であると考えられる。谷出口よりも上流域では、たとえば、砂防ダムを施工してもすぐに埋没する、火砕流は、速度が土石流や泥流よりも大きい場合が多く、流体力や衝撃力(流下区間のこれらの値については、現時点でデータはない)が大きいために施設の破壊が想定される、などの理由で効果は期待できないと考えられる。谷出口下流の氾濫・堆積区間では、勾配が緩くなるため火砕流本体部は減速していくと考えられる。従って、遊砂地と横工などを組み合わせて施工することにより、土砂の捕捉促進や流下距離の低減などの効果を期待できると考えられる。前述の中尾川流域で発生した火砕流は、下流域の扇状地に施工されていた治山ダムによってその一部が

捕捉され、治山ダムは特に大きな損傷を受けなかった。治山ダムに作用した流体力は、約  $7.7\text{ton/m}^2$  以下であることが推測された<sup>11)</sup>。

熱風部は、基本的には、本体部に引きずられて運動するが、流路の屈曲部や本体部が停止した後も、流体の密度が大きくなっているために直進し、結果として本体部よりも広範囲に影響をもたらす場合が多々ある。本研究においても、本体部から分離した直後と想定されるプロット1での平均密度は、約  $100\text{kg/m}^3$  程度と高いことが推察された。

図-9に、熱風部の流れ構造の概念を示す。本体部が熱風部を牽引しているときは、本体部表面と大気との境界部でのせん断、「下層部」の運動による乱れの生成により、熱風部内では、大きな渦が形成され、次第に小さな渦へとエネルギーが伝達する。小さな渦は、その粘性により、受け取ったエネルギーが散逸していく。また、熱風部が本体部から遊離し、単独で流下する場合は、本体部から運動量の補給が絶たれてしまうので、乱れエネルギーの減少、下層部の運動の抑制により、大きな渦を作りづらくなる。その結果、小さな渦へのエネルギー伝達がなされなくなり、流れは急激に減衰すると考えられる。

**本体部が熱風部を牽引している場合**



**熱風部が本体部から遊離し、単独で流下する場合の流れ構造**

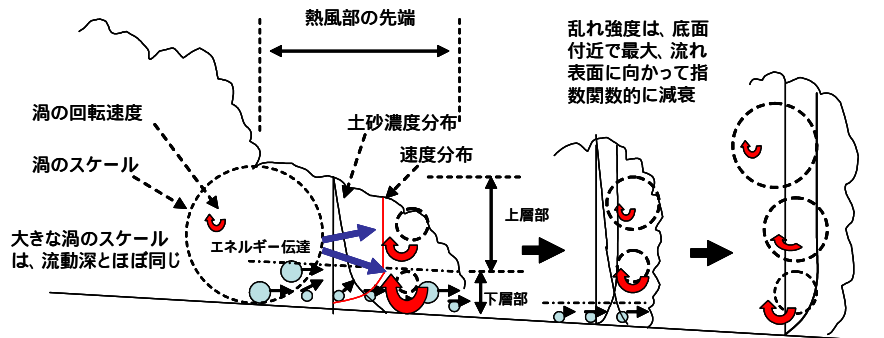


図 9 火砕流熱風部の流れ構造の概念

Fig-9 schematic figure of hot ash clouds

熱風部を減勢させるためには、本体部から供給される流れの乱れエネルギーを小さくする（流下速度を小さくする）ことが重要である。本体部が熱風部を牽引しているときは、本体部を減勢することが、結果として、熱風部の発達を制御することにつながると考えられる。熱風部が本体部から分離して独自で運動しているときは、熱風部の流れの境界層(速度勾配が大きいため、大きなせん断力が作用している部分)を、例えば、突起物で減勢すればよいと考えられる。突起物としては、フェンス工(たとえば、飛行機のジェットが減勢に使用されているブラストフェンス)などが考えられ、その高さも、流れの境界層の厚さを考慮すると、数十メートル程度でよいと考えられる。

写真-7に、雲仙普賢岳噴火時に、長崎県が水無川支川の赤松谷に施工したフェンス工を示す（世界的にみても、このような対策がなされた現場は雲仙普賢岳以外にはない）。

写真-8に、米国セントヘレンズ火山の山体崩壊時（1980年5月18日）に発生したブラストの内部の浮遊粒子の一部がダンプトラックの側面の格子部に捕捉された事例を示す。

飛散粒子とフェンス工のネットの間隔などを適当なサイズに調整することで、熱風部内の飛散粒子

を捕捉することも可能と考えられる。雲仙普賢岳のフェンス工については、火砕流が施工地まで流下することはなかったため、施設効果は検証されていないが、このような施設により、火砕流熱風部の流れの乱れを低減し、浮遊粒子を捕捉、沈降・堆積させることが期待できると考えられる。



写真-7 雲仙普賢岳に施工された火砕流熱風部対策用の柵工(矢印)

Photo-7 iron fence against hot ash clouds from pyroclastic flow built in the Unzen Volcano in 1993



写真-8 ブルドーザーに捕捉されたプラスト内の浮遊粒子の一部(米国セントヘレンズ火山、1980年、USGS 写真提供)

Photo-8 bulldozer trapping suspended materials of the 1980 blast occurred in the St.Helens Volcano(courtesy of the USGS)

## 6 . 結論

本研究により、以下のことが明らかにされた。

- 1)熱風部堆積物の一つのユニットは、砂を主体とする層（下層部）に火山灰を主体とする層（上層部）が被覆した構造を示す。いずれの層も、粒子は密に詰まった平滑床を呈する。
- 3)熱風部が本体部から分離した箇所から近いところは、下層部のみ、それより下流では、下層部と上層部の双方、さらにそれより下流では上層部のみの堆積構造を呈する。
- 4)熱風部の本体部からの分離後、下層部の堆積厚は急激に小さくなる。上層部の堆積厚は増加した後、流下末端付近では小さくなる。流れによる粒径の変化も堆積厚と同様の傾向を示す。
- 5)千本木地区での熱風部を対象として、堆積物の粒径などから、その移動限界流速、浮遊限界流速を試算すると、両者の値にはそれほど大きな違いはない。下層付近に粗粒分を主体とした粒子が高密度で主に浮遊形態で移動しており、またその上層部は、低密度で細粒分を主体とした粒子が浮遊している二層の流れ構造と考えられる。
- 6)熱風部の対策工としては、流れの乱れエネルギーを低減し、浮遊粒子の沈降を促進し、流れの飛散粒子を捕捉できるフェンス工のようなものが、効果的であると考えられる。

国土交通省九州地方整備局雲仙復興事務所の関係各位には、砂防指定地内での調査にあたり、便宜を図って頂いた。(独)森林総合研究所九州支所の宮縁育夫主任研究官には、堆積物観察の際に、有意なご意見を賜った。北海道大学大学院農学研究院の染谷哲久氏には調査を手伝って頂いた。記して謝意を表します。本研究を実施するうえで、(財)北海道河川防災研究センターの助成を受けた。

## 参考文献

- 1) Y. Ishikawa, T. Yamada and K. Ido : Mechanism of the Hot Ash Clouds of Pyroclastic Flows and its Numerical Simulation Methods, J. Erosion Control Engineering Society, 47-1, 14~20, 1994.
- 2) 山田孝・石川芳治・矢島重美 : 雲仙普賢岳で発生した小規模な火砕流の運動特性, 砂防学会誌 44-4, 41~45, 1991.
- 3) 水山高久・山田孝 : 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 43-3, 13~19, 1990.
- 4) 石川芳治・山田孝・川下茂樹・松本俊雄・緒統英章 : 雲仙普賢岳で 1991 年 6 月 8 日に発生した火砕流の堆積構造とその物性, 砂防学会誌 46-4, 16~22, 1993.
- 5) 高橋保・里深好文・金銅将史・竹内竜太 : 火砕流の流動機構に関する研究(2), 京都大学防災研究所年報, 38B-2, pp.423-446, 1995.
- 6) 例えば, Alain Burgisser, George W. Bergantz: Reconciling pyroclastic flow and surge: the multiphase physics of pyroclastic density currents, Earth and Planetary Science Letters 202, 2002.
- 7) William J. Fritz, Johnnie N. Moore, 原田憲一訳: 層序学と堆積学の基礎, 愛智出版, p.218, 1999.
- 8) Walker, G.P.L. and L.A. McBroom: Mount St. Helens 1980 and Mount Plee 1902-flow or surge? Geology 11, 571-4, 1983.
- 9) 杉本伸一 : そのとき何がー雲仙普賢岳噴火 住民の証言と記録, p.162-164, 2001.
- 10) 石川芳治, 山田孝, 矢島重美, 下田義文 : 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, 1993.
- 11) 石川芳治・山田孝 : 構造物に作用する火砕流流体力, 土木技術資料 37-1, 46~51, 1995.
- 12) F. Pasquill: Wind structure in the atmospheric boundary layer, A discussion on architectural aerodynamics, Phil. Trans. Roy. Soc. London, A, 269, 430-456, 1971.
- 13) Pierfrancesco Dellino, Luigi La Volpe(2000): Structures and grain size distribution in surge deposits as a tool for modelling the dynamics of dilute pyroclastic density currents at La Fossa di Vulcano(Aeolian Islands, Italy), Journal of Volcanology and Geothermal Research 96(2000) 57-78
- 14) Allen, J.R.L. : Developments in sedimentology. Vols 30A & B: sedimentary structures. Their character and physical basis. Amsterdam: Elsevier, 1982.