

細粒火山灰被覆を行った斜面の降雨流出に関する実験的研究

An experimental study on surface runoff and sediment discharge on
a slope covered with fine-grained volcanic ash

小川 泰浩* 清水 晃**
Yasuhiro OGAWA Akira SHIMIZU
清水 貴範* 宮 縁 育 夫*
Takanori SHIMIZU Yasuo MIYABUCHI

Abstract

The purpose of this study is to clarify changes in surface runoff characteristics and sediment discharge on a granule ash-covered slope. Three years after the latest eruption of Unzen volcano, we made an observation of surface runoff and sediment discharge on a slope of the volcano. We scattered fine-grained volcanic ash in one-third area of the slope in June, 1999. As a result of the ash-covered treatment the following points were found.

- (1) It was considered that the volcanic ash covered on the study slope was washed away from the slope by surface runoff as suspended sediment.
- (2) The peak discharge and total amount of surface runoff after the treatment increased under the approximately similar rain conditions.
- (3) The decrease in the surface runoff and sediment discharge resulted from disappearance of the volcanic ash on the surface of the slope.

It is concluded that the runoff characteristics of the study slope had changed with the covering and the movement of fine-grained volcanic ash.

Key words : surface runoff, sediment discharge, fine-grained volcanic ash, Unzen volcano

1. はじめに

1990年から1995年にわたる雲仙普賢岳の噴火活動は、周辺地域に深刻な災害をもたらした。この間に山腹を流下した火砕流は9400回以上におよび、森林に覆われていた山腹は火山噴出物が堆積した状態になった。火砕流が山体に度重なり堆積した結果、1995年5月時点の火砕流堆積物総量は約1億2000万 m^3 となり、堆積物の層厚は最大で150mに達した(石川ほか, 1996)。そのため、火山噴出物が堆積した斜面では、土砂流出が活発になり、比較的少ない雨量で多数の土石流が発生した。

噴火活動中に土砂流出が活発であった山腹では、噴火活動が沈静化に向かうようになると、流出土砂量や侵食量が急速に減少することがこれまでに明らかになっている。この現象は、有珠山, Mount St. Helens, Mount Merapiなどの噴火活動に伴う土砂流出および斜面侵食に関する

研究(山本, 1984; Collins and Dunne, 1986; 水山・宮本, 1993; Jitousono et. al., 1996)によって報告されている。有珠山の報告によると、斜面侵食量の減少は難透水性の細粒火山灰が地表から取り除かれた結果、表層の浸透能が上昇して表面流発生が抑えられたためであると推定されている(山本・今川, 1983; 山本, 1984)。一方、雲仙普賢岳では、火砕流堆積斜面における降雨流出特性の解明を目的とした表面流出・土砂流出観測が地頭蘭ほか(1997)、西田ほか(1998)、山越・諏訪(1998)、小川ほか(2000)により行われている。

しかしながら、雲仙普賢岳における研究でこれまでに明らかにされた知見は、最後の火砕流が発生して1年以上が経過した後の観測結果に基づいているので噴火活動時に見られるような細粒火山灰が地表に堆積した斜面における降雨流出実態ならびに降雨流出特性が変化する過程の解明には至っていない。そこで、本研究では、地表

* 独立行政法人森林総合研究所九州支所山地防災研究グループ ** 独立行政法人森林総合研究所水土保持研究領域水保全研究室
* Environmental Conservation Group, Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute
** Forest Hydrology Laboratory, Department of Soil and Water Conservation, Forestry and Forest Products Research Institute

に細粒火山灰が堆積した斜面の降雨流出実態ならびに降雨流出特性が変化する過程を解明するために噴火活動が終息して約4年が経過した火砕流堆積斜面に対して噴火活動時の火山灰堆積状況を想定した野外実験（細粒火山灰を地表に被覆する）を行うことによって、細粒火山灰の被覆が斜面の降雨流出特性に与える影響を検討した。

2. 試験地の概要

雲仙普賢岳の火砕流堆積斜面では、1996年から1998年にかけて九州森林管理局および長崎県がそれぞれ施工区域を設けて大規模な航空緑化を実施した（例えば吉田，2000；長崎県山地災害対策室・島原振興局山地災害復興課，2000）。赤松谷流域の火砕流堆積斜面では、九州森林管理局が1996年4月から5月に施工した区域と長崎県が1997年5月および1998年3月に施工した区域に航空緑化が行われた。細粒火山灰の被覆実験を行った試験地は赤松谷流域の赤松谷支溪にあり、1991-1995年火砕流堆積の範囲図（Miyabuchi, 1999）によると、火砕流堆積域に位置している（図-1）。試験地は長崎県の施工区域であったが、航空緑化は行われず地表はほぼ裸地状態であった。設定当時の試験地には主に高さ数十センチのイタドリが点在していた（写真-1）。また、試験地の標高は335~339 m、集水面積は220 m²であり、斜面傾斜は試験地の上部が10度、下部が4度である（図-2）。試験地周辺の斜面は火砕流堆積物の厚さが10~20 mで、この堆積物がかつての谷地形に埋積しており（石川ほか，1996）、試験地付近の地表には火砕流によって運搬された直径約6 mの溶岩塊が残留している。試験地上流端の流域界（図-2の点線）は、ガリが試験地と試験地上流の斜面を分断しているため、試験地は上流の斜面から水が流入しない流域となっている。地表には厚さ約2 cmの砂礫層が見られ、この層は直下の火砕流堆積物に比べて細粒土砂を欠き、直径が数cmの砂礫で構成されていた（小川ほか，1999）。竹下（1998）は、火砕流堆積物のマトリックスを構成していた細粒火山灰が地表から流出して比較的粗い礫が地表に取り残された結果、このような粗粒化した砂礫層が形成されたと推察している。

3. 調査方法および実験方法

本研究の観測期間は、試験地を設定した1998年8月26日から1999年11月16日であり、試験地の観測施設は0.5 mm 転倒ます型雨量計と流出量観測施設で構成されている。雨量観測は観測期間に雨量計を移動したため観測開始から1999年10月28日は試験地の下流端で行い、10月29日から11月16日は試験地から西へ350 m離れた緑化試験地（小川ほか，2000）の下流端で行った。

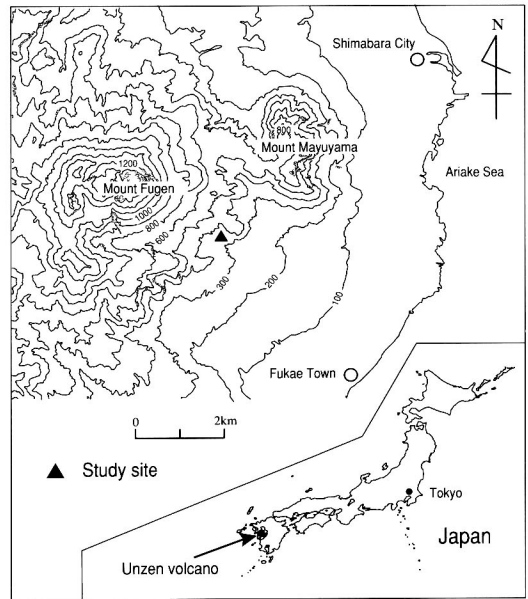


図-1 試験地の位置
Fig.1 Location of the study site

そして試験地が治山工事の対象地となったため11月16日には流出量観測施設を撤収し、試験地の降雨流出観測は終了した。試験地を設定する際に緩傾斜部分では流域界の区分が困難な場所があった。このような場所には、流域外から水が流入しないように仕切り板を設置した（図-2の実線）。流出量観測施設は、試験地の下流端に設置した沈砂池（長さ1.8 m、幅0.44 m、深さ0.5 m）と三角堰で構成されている（写真-2）。沈砂池と三角堰の接合には塩化ビニル管を使用し、沈砂池と流路下流端の接合部分にはコンクリートを打設して表面流をもれなく観測施設に流入するようにした。三角堰の角度は、流量観測の精度を上げるため西田ほか（1998）や山越・諏訪（1998）の三角堰よりも鋭角である15度を採用した。

表面流出量は三角堰に設置した水圧式水位計（コーナシステム社製KADEC-MIZU）で測定した水位を流量に変換する方法により求めた。三角堰の流量を q (l/sec)、水位を H (cm)とすると、室内で行った流量検定の結果、水位流量曲線は(1)式で表された。

$$q = 0.0022 H^{2.5} \dots\dots\dots(1)$$

上記の流量観測で得られた表面流は、流路下流端と沈砂池の接続にコンクリートを使用したため、水の浸透しないコンクリート打設部分（面積1.3 m²）で発生した表面流が含まれていると推定される。そこで、観測結果からコンクリート打設部分のみで発生した表面流を除外するため、(2)式に従って試験地で発生した表面流の総流出量を求めた。

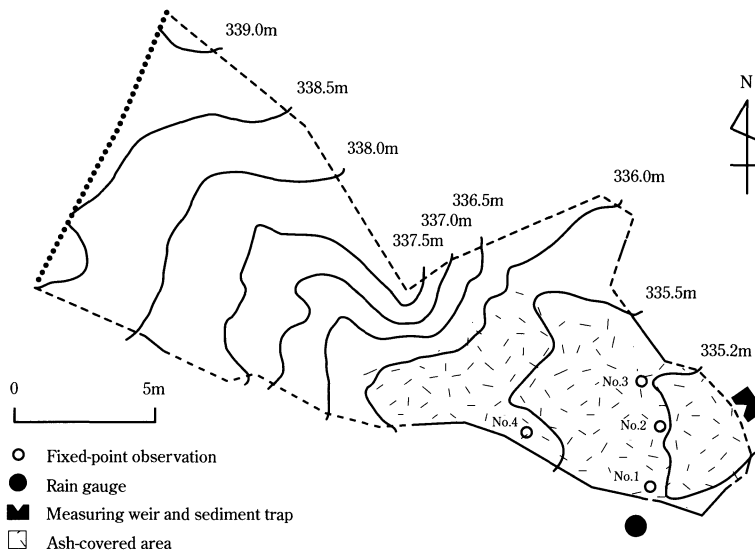


図-2 試験地の地形
Fig.2 Topographic map of the study site

$$Q = Q_0 - 1.3R \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 Q ：試験地で発生した表面流の総流出量 (m^3)、 Q_0 ：観測された表面流の総流出量 (m^3)、 R ：表面流発生期間の雨量 (m) である。本研究では試験地に発生した表面流出は(2)式が $Q > 0$ となる表面流出であると定義し、これを満たしていない表面流出は解析から除いた。

観測開始から1999年6月10日までの約9ヶ月間は、自然状態の斜面における表面流出・土砂流出観測を行った。1999年6月11日に細粒火山灰を被覆する実験を行うため、全面積の約3分の1(面積68 m^2)におよぶ試験地の地表に細粒火山灰を散布した(図-2、写真-3(a))。実験に使用した細粒火山灰は、雲仙普賢岳が噴火していた1993年に溶岩ドームから南東へ約2km離れた岩床山の山頂付近で採取し、実験前に0.42mmふるいでゴミや粗粒土砂を取り除いたものである。以後、本研究では試験地の地表に被覆した細粒火山灰を「火山灰」と表記する。火山灰の被覆は以下の手順で行った。まず、火山灰の被覆前に点在していたイタドリなどの草本を全て刈り取って地表を植生のない裸地状態にした。次に、斜面の下部から上部にかけて、できる限り厚さが均一となるように火山灰を被覆した。火山灰の厚さは0.2~0.5cmとなり、火山灰総重量は135.1kgとなった。

火山灰被覆後の降雨や表面流で火山灰が移動する実態を把握するため、火山灰被覆域の地表面観察を行った。火山灰被覆域全体の地表面観察と同時に火山灰被覆域の4カ所に定点観察地点(図-2のNo.1~No.4)を定めて火山灰堆積状況のスケッチと写真撮影を行い、火山灰堆積状況の変化を追跡した。観測期間を通じて定点観察

表-1 定点観測地点の表面礫の粒径
Table 1 Grain size of cobbles and boulders around fixed-point observations

Point	Grain size
1	5-40 cm
2	5-50 cm
3	5-20 cm
4	<5 cm

地点の地表に見られた礫の状況を表-1に示す。地表面観察は1~3週間の間隔で実施した観測データの回収時に行い、火山灰を被覆した直後の1999年6月11日から観測終了までに合計10回行った。

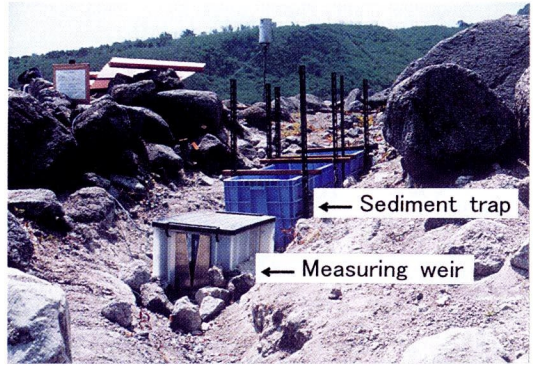
4. 結果

4.1 火山灰堆積状況の観察

火山灰被覆実験後の地表面観察結果を時系列に沿って述べる。1回目の地表面観察は火山灰を被覆した6月11日から10日が経過した6月21日に行った。このときの試験地における火山灰堆積状況を写真-3(b)、写真-4に示す。この間に発生した表面流は1流出イベントのみであり、その総流出量は0.32mmであった。6月21日に試験地で観察された火山灰は、地表面に見られる礫のなかでは比較的大きい直径20~50cmの礫の周囲(定点観察地点No.1, No.2付近)に、厚さ1cm程度の火山灰層がパッチ状に堆積していた(写真-4のa)。これに対し、直径20~50cmの礫が地表に見られない場所では、パッチ状に火山灰が堆積している部分(写真-4のb)とパッチ状に堆積していない部分(写真-4のc)に区分された。火山灰のパッチ状堆積は、地表面の微少な凹地



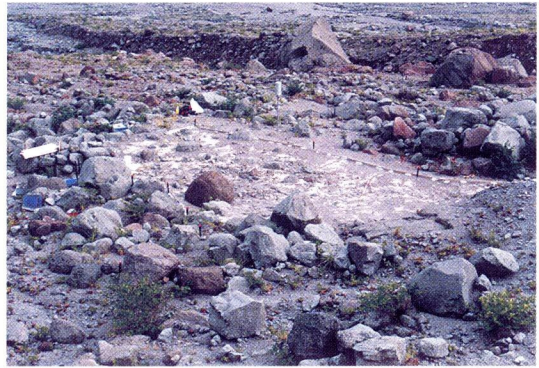
写真一1 火山灰散布前の試験地 (1998年7月29日撮影)
 Photo 1 Upstream view of the study site before the ash-covered treatment. Photograph was taken on July 29, 1998



写真一2 観測施設の概要
 Photo 2 Measuring weir and sediment trap

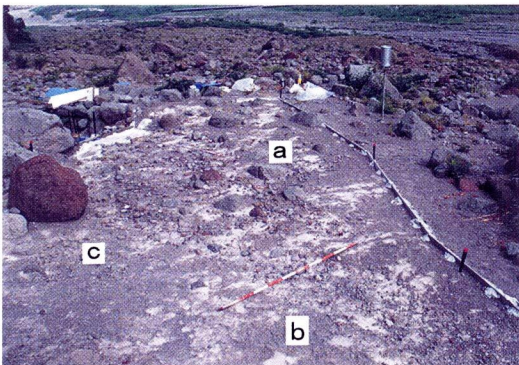


(a)火山灰散布後 (1999年6月11日)
 (a)Immediately after the treatment (June 11, 1999)



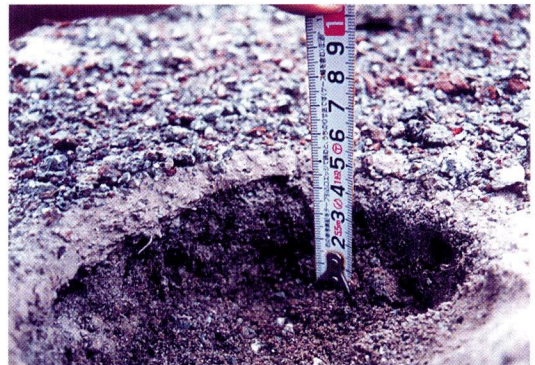
(b)1999年6月21日
 (b)June 21, 1999

写真一3 火山灰散布後の試験地
 Photo 3 View of the study site after the ash-covered treatment



写真一4 1999年6月21日の火山灰堆積状況
 a: 直径20-50cmの礫が堆積した場所
 b: 微少な凹地の火山灰
 c: 直径5cm以下の礫が堆積した場所

Photo 4 The surface of the study site on June 21, 1999
 a: The surface covered with boulder 20-50 cm in diameter
 b: The ash in a pit
 c: The surface covered with gravel less than 5 cm diameter



写真一5 定点観測ピン No.1の火山灰堆積状況 (1999年7月21日)
 Photo 5 The surface at the fixed-point observation No.1 (July 21, 1999)

に見られた。これに対し、パッチ状に堆積していない部分では、火山灰被覆域を概観すると火山灰散布以前に見られた地表面状態と同様であり、直径が5cmより小さい砂礫が地表に現れていた。しかし、表層断面を観察すると、砂礫で覆われた表層堆積物のなかに厚さ0.5cm程度の火山灰の堆積が見られた。以上の観察により降雨強度が低い場合でも表面流が発生するようになり、さらに火山灰が表面流とともに移動して火山灰が一様に堆積した状態から微少な凹地を中心に堆積する不規則な状態に変化している実態が明らかになった。

6月30日から8月31日の地表面観察は、合計5回行われた。この期間はパッチ状の堆積火山灰は既に見られなくなり、火山灰被覆域を概観しても火山灰が地表に堆積していないように見えた。しかし、表層断面を観察したところ、6月21日に見られたパッチ状に火山灰が堆積していない場所と同様に火山灰が地表の砂礫層に入り込んだ状態で堆積していた。7月21日の断面観察では、比較的大きな礫が分布している場所(写真-4のa)の火山灰堆積厚は0.7~1.5cm程度であり(写真-5)、この期間は火山灰の堆積厚の変化が少ない状態であった。これに対し、直径5cm以下の砂礫が地表に現れている場所(写真-4のb)では、厚さ約0.5cm前後の火山灰が地表から深さ1cm程度の砂礫層の間隙を埋めるような状態で堆積していた。この層は地表面観察を重ねるにつれて、砂礫層内にある火山灰と砂礫の区別が次第に困難になった。

8月31日以降の地表面観察は、9月23日が最初であった。8月31日に火山灰堆積が見られた場所(定点観察地点No.1, No.2周辺, 写真-4のa)においても地表の砂礫層に見られた火山灰堆積がこの日には確認できなくなっていた。このような地表面の状態は11月16日に

行われた最後の観察まで続いた。

以上の結果は次のようにまとめられる。火山灰被覆実験開始から8月31日の火山灰散布域では、大きな礫の周辺および砂礫層内に火山灰の堆積が認められ、9月23日から11月16日は火山灰被覆域に火山灰堆積が見られなくなった。このことから8月31日から9月23日の降雨で発生した表面流とともに火山灰被覆域に残存していた火山灰のほとんどが地表から消失している実態が明らかになった。

4.2 試験地の土砂流出・表面流出特性

観測期間の総雨量・表面流出量の結果を図-3に示す。この図で横軸はデータ回収日を表している。図-3のなかで表面流が発生した期間の観測結果を表-2に整理し、表面流出特性と土砂流出特性の解析を行った。

4.2.1 観測期間の土砂流出

火山灰被覆による土砂流出の時系列変動を明らかにするため、表面流出量当たりの捕捉土砂量(単位kg/mm)を用いて検討を行った。以降はこれをS/Qと記す(図-3, 表-2)。S/Qは火山灰被覆前に0.03~0.08(kg/mm)を示したが、被覆直後である1999年6月11日から6月21日のS/Qは1.4(kg/mm)となり、被覆前に比べ急激に増加した。その後、6月21日から9月23日のS/Qは0.5~1.1(kg/mm)の範囲となり、被覆前よりも高い値であった。9月23日以降の観測期間のS/Qは0.3(kg/mm)前後となり、被覆前より依然として高い値を示していたが、6月21日から9月23日の値よりも低下していた。8月31日から9月23日には表面流発生期間の雨量が40mmを上回る表面流出が5回観測されていたのに対し、この前後の観測期間(8月12日から8月31日, 9月23日から10月13日)では、表面流発生期間の雨量が40mmをこえる表面流は9月23日か

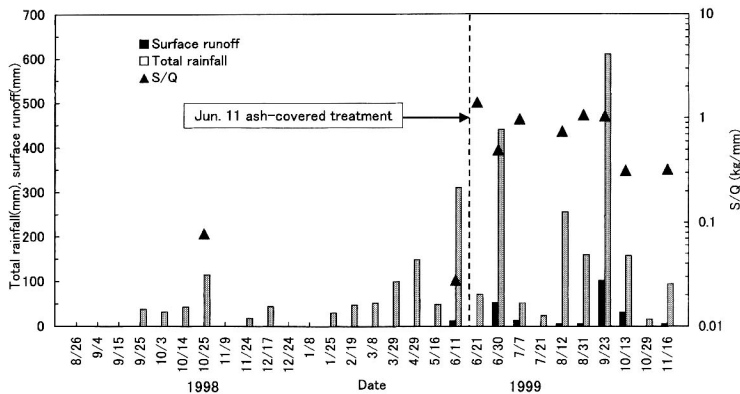


図-3 観測期間の降雨流出結果

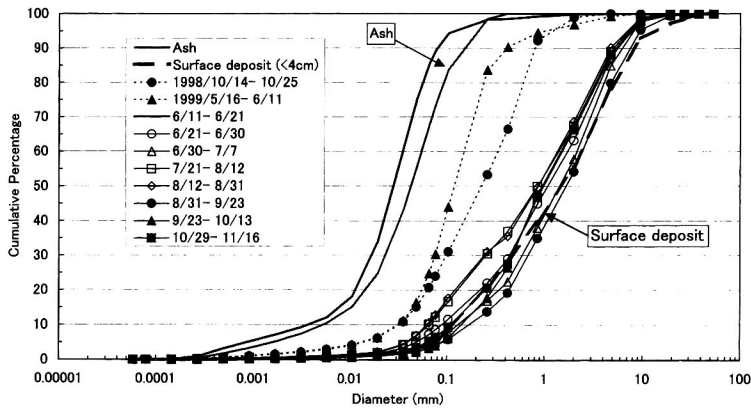
Fig.3 Temporal changes in total rainfall, surface runoff and S/Q

Note: Total rainfall is total amount of rainfall in each duration of observation
 $S/Q = (\text{Sediment discharge}) / (\text{Surface runoff})$

表一2 表面流が観測された期間の降雨流出結果
Table 2 Observation results concerned with surface runoff

Date	Rainfall R: (mm)	Surface runoff Q: (mm)	Sediment discharge S: (kg)	Median diameter d ₅₀ : (mm)	S/Q (kg/mm)
1998					
Oct. 14 - Oct. 21	18.5	0.39	0.03	0.21	0.08
1999					
May 16 - Jun. 11	61.0	12.63	0.35	0.11	0.03
Jun. 11, ash-covered treatment on the surface of the study site					
Jun. 11 - Jun. 21	6.5	0.32	0.45	0.02	1.41
Jun. 21 - Jun. 30	254.5	53.26	26.29	1.00	0.49
Jun. 30 - Jul. 7	33.0	13.66	13.30	1.20	0.97
Jul. 21 - Aug. 12	109.0	5.58	4.14	0.80	0.74
Aug. 12 - Aug. 31	55.0	6.06	6.46	0.80	1.07
Aug. 31 - Sep. 23	358.0	102.02	105.68	1.30	1.04
Sep. 23 - Oct. 13	104.5	31.49	9.87	0.90	0.31
Oct. 29 - Nov. 16	42.5	5.78	1.85	0.90	0.32

Note ; Rainfall means a total amount of rainfall concerned with surface runoff in an observation period
 $S/Q = (\text{Sediment discharge}) / (\text{Surface runoff})$



図一4 火山灰、表層堆積物、沈砂地に堆積した土砂の粒度分布
Fig. 4 Grain size distributions of the ash, surface deposit and sediment at the sediment trap

ら10月13日の期間に1回記録されただけであり、これは8月31日から9月23日に降雨が集中的に発生していたことを表している。また、図-3により8月31日から9月23日の降雨が集中した期間の総雨量・総表面流出量は、その前後の期間よりも大きい値であることがわかる。

次に捕捉土砂の粒径分布を検討した(図-4)。火山灰被覆直後の1999年6月11日から6月21日の捕捉土砂の粒径分布(図-4の太い実線)は、火山灰被覆前(図-4の細い破線)および6月21日以降の捕捉土砂(図-4の細い実線)よりも細粒の分布を示し、試験地に被覆した火山灰とほぼ同様な粒度分布を示した。4.1で述べたように6月11日から6月21日に発生した表面流の総流出量は少なく、しかもこの期間の捕捉土砂は実験に使用した火山灰と同じ傾向の粒度分布を示していること

から、少量の表面流であるにもかかわらず火山灰が試験地から流出している実態が明らかになった。6月21日以降の捕捉土砂の粒度分布は火山灰散布前よりも粗く、地表から4cmまでの表層堆積物の土砂(図-4の太い破線)に近い粒度分布を示した。

4.2.2 観測期間の表面流出

火山灰被覆前後の表面流出を詳細に調べるため、表面流発生先行降雨ならびに流出継続時間が類似している2つの表面流出を比較した。表-3に火山灰被覆前の1999年6月7日、被覆後である同年6月24日の降雨流出の結果を示し、図-5(a), (b)に6月7日、6月24日のハイドログラフをそれぞれ示した。これらの図により火山灰被覆後のピーク降雨に対するピーク流出の応答が火山灰被覆前に比べ早くなっていることがわかる。また、表-3では6月24日の流出期間の最大5分、最大10分雨量

が6月7日の58%, 76%となり火山灰被覆前よりも小さい値であるにもかかわらず, 6月24日のピーク流出量や総流出量は6月7日の1.4倍, 2倍となった。以上の結果, 火山灰を被覆した試験地では表面流発生に必要な雨量が減少し, 火山灰被覆前よりも表面流が発生しやすい環境になっていることが明らかになった。

火山灰被覆後における表面流出発生期間の雨量(以後, 流出期間雨量とよぶ)について解析を行った。表面流出継続時間が表面流出毎に異なるため, 火山灰被覆後の流出期間雨量・表面流出量を1時間当たりに換算し, その値を図-6に示した。図-6に日付を記した7つの表面流出(1999年6月24日, 6月25日, 6月29日, 7月2日, 8月31日, 9月1日, 9月2日)のように火山灰被覆期間の前半は, 比較的小さい雨量にもかかわらず流出量の大きい表面流が発生していた。これらは4.1で述べた地表の火山灰堆積状況に変化が観察された日(1999年9月23日)までに発生した表面流出であった。さらに火山灰被覆期間(1999年6月11日から11月16日)の表面流出を詳しく調べると, 図-6に示したよう

日, 8月31日は各1つ, 9月1日は2つ)のように火山灰被覆期間の前半は, 比較的小さい雨量にもかかわらず流出量の大きい表面流が発生していた。これらは4.1で述べた地表の火山灰堆積状況に変化が観察された日(1999年9月23日)までに発生した表面流出であった。さらに火山灰被覆期間(1999年6月11日から11月16日)の表面流出を詳しく調べると, 図-6に示したよう

表-3 1999年6月7日と6月24日の表面流出発生時の降雨と流出

Table 3 Hydrological conditions on June 7, 1999 and June 24, 1999

	June 7	June 24
Rainfall conditions		
Rainfall (mm)	18.0	20.5
60 min. antecedent rainfall (mm)	18.0	15.0
30 min. antecedent rainfall (mm)	8.5	9.5
20 min. antecedent rainfall (mm)	6.5	7.0
10 min. antecedent rainfall (mm)	4.5	4.0
5 min. antecedent rainfall (mm)	3.0	3.0
Maximum 1 min. rainfall (mm)	1.5	1.5
Maximum 3 min. rainfall (mm)	3.5	3.0
Maximum 5 min. rainfall (mm)	6.0	3.5
Maximum 10 min. rainfall (mm)	8.5	6.5
Runoff conditions		
Duration of runoff (min)	48	55
Peak runoff (mm/min)	0.33	0.46
Total surface runoff (mm)	2.80	5.51
Runoff coefficient (%)	15.6	26.9

Note ; Rainfall means total amount of rainfall generating the surface runoff

$$\text{Runoff coefficient} = (\text{Total surface runoff}) / (\text{Rainfall})$$

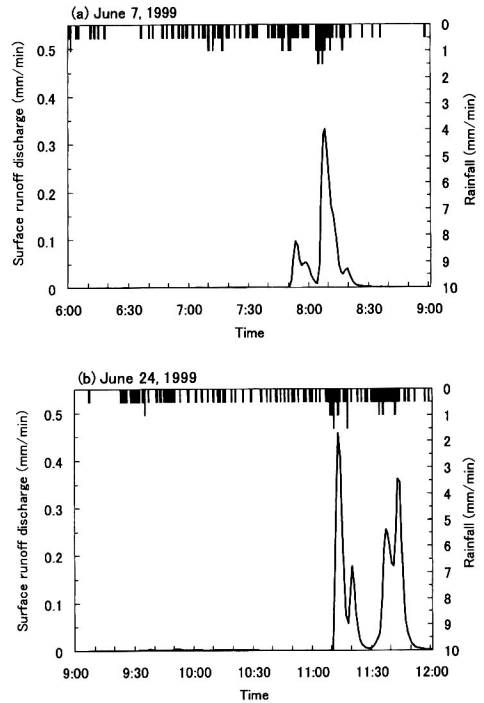


図-5 降雨と流出の結果

(a)火山灰散布前(1999年6月7日)

(b)火山灰散布後(1999年6月24日)

Fig. 5 Hydrograph of surface runoff

(a)Before the ash-covered treatment (June 7, 1999)

(b)After the ash-covered treatment (June 24, 1999)

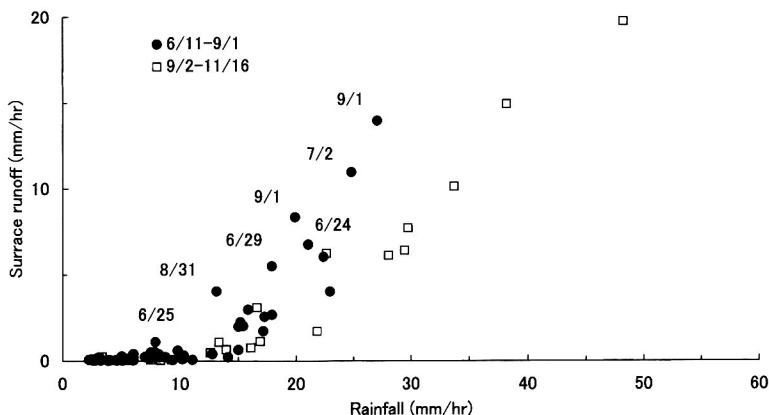


図-6 火山灰散布後の降雨量と表面流出量の関係

Fig. 6 Relationship between rainfall and surface runoff

に1999年6月11日から9月1日は、比較的少ない雨量で比較的大きい出水が試験地で観測されていた。この観測結果により比較的大きい表面流出が見られた日は、4.1で述べた火山灰堆積に変化が確認された日(9月23日)より以前の9月1日であると推定された。したがって、火山灰被覆による表面流出の詳細な実態を明らかにするため、火山灰被覆後の表面流出に対し、比較的小さい降雨量で大きな出水が観測された期間とそれ以降の期間に分けて解析を行った。前者の期間(以降、前期と呼ぶ)は6月11日から9月1日とし(図-6の●印)、後者の期間(以降、後期と呼ぶ)は1999年9月2日から11月16日とした(図-6の□印)。両者を比較すると、後期は前期よりも大きい降雨強度による表面流出が記録されているにもかかわらず、前期に比べ表面流出量が減少しており、火山灰被覆期間の表面流出特性に変化が生じている実態が明らかになった。

5. 考察

5.1 火山灰の移動実態

火山灰被覆後の地表面観察および流出土砂の粒度分析結果は、以下のように整理することができる。①地面に被覆した火山灰は、非常に少ない表面流出で容易に移動して主として微少な凹地に厚く堆積していた。そのときの捕捉土砂は、被覆した火山灰とほぼ同じ粒径分布であった。②比較的大きい礫がある場所に被覆した火山灰は、小さい砂礫で構成された場所に被覆した火山灰よりも堆積状況に変化が少なく安定していた。③火山灰被覆域で火山灰堆積状況が比較的安定している場所でも大きな出水を伴う降雨が集中した時期を過ぎると、地面に火山灰の堆積が見られなくなる。

①、②で述べた地表における火山灰の堆積実態は、細粒火山灰がパッチ状に堆積した状態(西田・水山, 1998)に類似していた。これは、西田・水山(1998)が報告したような硬化状態(クラスト)ではなかった。

試験地に被覆された火山灰がその後の降雨で移動する過程には、2つの過程が考えられる。ひとつは雨滴や浸透水によって地面から地下へ鉛直移動する過程であり、もうひとつは表面流とともに下流域の斜面に移動する過程である。火山灰被覆域は4度程度の緩傾斜地であり、降雨は急傾斜地の斜面に比べると地面に浸透する機会が多いと考えられる。よって、地表に見られる火山灰層は、雨滴や浸透水とともに火山灰が堆積物層を鉛直移動した結果、形成されたとも考えられる。しかし、②に述べた比較的大きい礫がある場所の火山灰は、降雨が集中していた時期まで比較的安定した状態で地表に堆積していたことを考慮すると、②は降雨が集中していない時期に大礫が斜面下流方向への火山灰の移動を抑えていたことを

裏付ける結果である。また、③に述べた降雨の集中する時期を過ぎると地表に堆積していた火山灰が消失した現象は、降雨が集中した時期に発生した表面流により斜面下流方向に火山灰が移動した結果であると推察される。以上により被覆した火山灰は、雨滴や浸透水によって鉛直方向へ移動しているというより表面流によって斜面下流方向に移動していると推定することができる。

細粒土砂が流水中で移動する形態は、江頭・芦田(1981)により粒径が0.1mm以下の土粒子は浮遊の運動形態をとると報告されている。実験に使用した火山灰は0.1mm以下の粒径が約90%を占めており(図-4)、火山灰が表面流とともに移動する場合は、砂礫が移動する際に見られる掃流の運動形態とは異なり浮遊の運動形態であったと推察される。浮遊砂はいったん流水に入ると途中の溪床に堆積しない(水山, 1993)ので、沈砂池に捕捉された土砂は主に掃流砂であると考えられる。火山灰被覆後の捕捉土砂の主成分が掃流砂であることは、表-2により6月21日から11月16日の火山灰被覆期間の捕捉土砂の中央粒径が0.1mmよりも大きいことによっても確認することができる。ただし、火山灰被覆直後の6月11日から6月21日の捕捉土砂は4.2.1で述べたように主に火山灰であると認められることから、このときの流出土砂は浮遊砂であったと推察される。この期間の火山灰は地表に被覆された直後であったため、地表の砂礫層に入り込んだ状態(写真-5)ではなく、地表面上に被覆されただけの移動しやすい状態で堆積していたと考えられる。よって、6月11日から6月21日に浮遊砂だけを流出させた表面流が地表に堆積した大量の火山灰を取り込んで流出し、その一部が沈砂池に取り残された結果、火山灰に類似した粒径分布の土砂が沈砂池に残留していたものと推察された。

5.2 火山灰被覆が降雨流出に与える影響

火山灰を被覆した斜面の降雨流出観測の結果は以下のようにまとめられる。①ほぼ同じ先行降雨で発生した火山灰被覆前後の表面流出を比較したところ、被覆後の表面流発生時の降雨量は被覆前に比べ少ないにもかかわらず、被覆後の表面流出量は被覆前に比べ増加した。②火山灰の堆積が地表に見られる期間(前期)の表面流出は、火山灰の堆積がほとんど見られない期間(後期)よりも少ない雨量で流出量の大きい表面流が発生した。③表面流出量当たりの捕捉土砂量(S/Q)の変動は、火山灰被覆した時期ならびに火山灰堆積が消失した時期の地表状態と良い対応を示した。後期のS/Qは前期よりも減少していたが、火山灰を被覆する前と比べると大きい値であった。

①により地表を火山灰で被覆すると表面流が発生しやすくなるとともに表面流量が増加する実態を把握するこ

とができた。よって、火山灰の被覆厚が数 mm 程度でも表面流出は変化することが明らかになり、細粒火山灰の堆積が斜面の降雨流出特性に影響を与えていることを本実験で実証することができたと考えられた。②により火山灰が地表に堆積状態の変化が表面流出の増減に関与している実態を把握できることが明らかになった。これは、地表が細粒火山灰に覆われると地表の浸透能が低下する現象を裏付けるものである。また、S/Qは③により火山灰被覆域における土砂流出特性の変化を示す指標として有効であると考えられた。すなわち、試験地における火山灰被覆後の表面流出・土砂流出の発生場は主に火山灰被覆域であると考えられ、S/Qの時系列変化は火山灰被覆域における土砂流出特性の変化を反映したものであるといえる。

6. まとめ

雲仙普賢岳の火砕流堆積斜面において細粒火山灰を地表に被覆する野外実験を行った。火山灰被覆域における細粒火山灰の移動・堆積状況の観察ならびに降雨流出の観測を行い、細粒火山灰被覆が降雨流出特性に与える影響を検討した。今回の実験によって得られた知見を以下に列挙する。

- 1) 地表に被覆した細粒火山灰は少量の表面流でも容易に移動し、その多くが表面流とともに浮遊砂となって試験地から流出していると推察された。
- 2) 火山灰被覆実験前後の類似した降雨条件で発生している表面流を比較した結果、細粒火山灰被覆後は細粒火山灰被覆前よりも最大流量・総流出量の大きい表面流が発生した。
- 3) 表面流出量・土砂流出量が減少傾向になる時期は、降雨が集中して流出量の大きい表面流の発生した時期を経過してからであり、地表から細粒火山灰の堆積が消失した時期と一致した。

本研究では細粒火山灰が表面流により移動・流出する実態を解明できたが、噴火活動時の土石流発生に関与していると考えられる細粒火山灰の流出機構の解明には至らなかった。これについては今後の課題とした。

謝 辞

本研究を実施するにあたり長崎県島原振興局農林部林務課山地復興班の関係各位には試験地設定ならびに観測に際し、多大なご協力を頂いた。観測施設の設置に際し、森林総合研究所九州支所の野田巖氏、出田元起氏にご協

力を頂いた。森林総合研究所九州支所の大丸裕武氏には本研究をまとめる際に貴重なご指摘を頂いた。ここに記して皆様に謝意を表す。

引用文献

- Collins, B. D. and Dunne, T. (1986): Erosion of tephra from the 1980 eruption of Mount St. Helens, Geological Society of America Bulletin, Vol.97, p.896-905
- 江頭進治・芦田和男 (1981): 山地流域における微細土砂の生産場と流出過程に関する研究, 京大防災研究所年報, No. 24 B-2, p. 239-250
- 石川芳治・山田 孝・千葉達朗 (1996): 雲仙普賢岳噴火に伴う溶岩流出及び火砕流による土砂量と地形変化, 砂防学会誌, Vol. 49, No. 1, p. 38-44
- Jitousono, T., Shimokawa, E. and Tsuchiya, S. (1996): Debris flow following the 1984 eruption with pyroclastic flows in Merapi volcano, Indonesia, Journal of the Japan society of Erosion Control Engineering Vol.48 Special issue, p.109-116
- 地頭蘭隆・永田 治・寺本行芳・下川悦郎 (1997): 火砕流堆積物および火山灰に覆われた雲仙普賢岳山腹斜面における表面流出, 砂防学会誌, Vol. 49, No. 5, p. 42-48
- Miyabuchi, Y. (1999): Deposits associated with the 1990-1995 eruption of Unzen volcano, Japan, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol.89, p.139-158
- 水山高久・宮本邦明 (1993): 火山噴火後の土砂流出と植生の回復, 砂防学会誌 (新砂防), Vol. 46, No. 2, p. 45-47
- 水山高久 (1993): 渓流での土砂移動現象, 小橋澄治編 山地保全学, 文永堂出版, p. 179-229
- 長崎県山地災害対策室・島原振興局農林部山地災害復興課 (2000): 雲仙・普賢岳みどりへの一歩, 292 pp.
- 西田顕郎・小橋澄治・水山高久 (1998): 雲仙普賢岳火砕流堆積斜面における植生回復による表面流・土砂流出の変化, 日本緑化工学会誌, Vol. 23, No. 4, p. 249-255
- 西田顕郎・水山高久 (1998): 雲仙普賢岳火砕流堆積物の表面構造, 砂防学会誌, Vol. 51, No. 3, p. 44-46
- 小川泰浩・清水 晃・久保寺秀夫 (1999): 噴火活動停止後の雲仙普賢岳周辺斜面における噴火堆積物の浸透特性, 平成 11 年度砂防学会研究発表会概要集, No. 27, p. 304-305
- 小川泰浩・清水 晃・宮縁育夫・清水貴範 (2000): 雲仙普賢岳火砕流堆積斜面の緑化地・裸地における表面流・土砂流出観測, 日本林学会九州支部研究論文集, No. 53, p. 133-134
- 竹下敬司 (1998): 土壌 (浸透構造) の形成の面から見た裸地面緑化, 平成 9 年度雲仙岳・眉山地域治山事業総合調査報告書, 熊本営林局・勸林業土木コンサルタンツ, p. 95-109
- 山越隆雄・諏訪 浩 (1998): 雲仙普賢岳火砕流堆積斜面における植生回復に伴う降雨流出・土砂流出特性の変化, 砂防学会誌, Vol. 51, No. 3, p. 3-10
- 山本 博・今川俊明 (1983): 有珠山 1977-1978 年噴出物の堆積した斜面における表面流出について, ハイドロロジー, No. 13, p. 25-33
- 山本 博 (1984): 有珠山の一斜面における 1977-1978 年降下火砕堆積物の侵食, 地形, Vol. 5, No. 2, p. 111-124
- 吉田正一 (2000): 雲仙・普賢岳噴火災害地の航空緑化工, 第 35 回治山林道研究発表会論文集, 治山林道研究会, p. 315-319

(原稿受理 2002 年 8 月 5 日)