

桜島の荒廃斜面における表面流および土砂流出観測結果の検討

寺本 行芳¹⁾・下川 悦郎¹⁾・地頭蘭 隆¹⁾

1) 鹿児島大学農学部生物環境学科

Investigation into observations of surface runoff and sediment discharge on the slopes of Sakurajima volcano

TERAMOTO Yukiyo¹⁾, SHIMOKAWA Etsuro¹⁾ and JITOUSONO Takashi¹⁾

1) 鹿児島大学農学部生物環境学科

Department of Environmental Sciences and Technology, Faculty of Agriculture, Kagoshima University, Korimoto, Kagoshima 890-0065

平成16年9月8日 受理, Accepted Sep 8, 2004

Summary

We investigated the surface runoff process on the flank of Sakurajima volcano, based on field experiments and runoff analysis. The results were as follows:

- (1) Sediment discharge by sheet erosion, surface runoff, and the area contributing to the occurrence of Hortonian overland flow became larger with increased rainfall. SD/SR decreased due to armoring of the surface layer volcanic ash.
- (2) It is suggested, based on the field experiments, that the area contributing to the occurrence of Hortonian overland flow depends on the grain size of the surface layer volcanic ash, slope inclination, and rainfall conditions.
- (3) The surface runoff process was examined with a runoff model. It was shown that Manning's coefficient of roughness increases with armoring of the surface soil. This result is in keeping with changes in grain size distributions of the surface layer volcanic ash. Moreover, the calculated area contributing to the occurrence of Hortonian overland flow fitted well with the observed area contributing to the occurrence of this flow.

Key words: Sakurajima volcano, volcanic activity, runoff process

キーワード: 桜島, 噴火活動, 流出過程

はじめに

桜島の斜面では、噴火活動に伴う火山灰の地表面被覆によってホートン型地表流（表面流）が発生し（地頭蘭・下川, 1987, 1989; 地頭蘭ら, 1998）、それに伴い表面侵食による多量の土砂が生産されている（下川・地頭蘭, 1987a, 1987b）。

本論では、桜島の火山灰被覆斜面で行った表面侵食による流出土砂量および表面流出量の測定、ホートン型地表流（表面流）の発生場に関する調査、および流出解析の結果に基づき、表面流の流出過程について検討する。

調査地と方法

1 調査地の概要

調査地は引ノ平川流域内の支谷の八谷沢上流域である（図-1）。降下火山灰に被覆された荒廃斜面における表面流の流出過程を明らかにするための微小集水試験地を、八谷沢上流域の裸地斜面に1箇所設けた（図-1）。試験地の地形と概要をそれぞれ、図-2（a）、表-1に示す。試験地にはリルは刻まれていない。図-2（b）は、試験地内における表層火山灰層の試料を採取して粒度分析を行い、中央粒径の分布を示したものである。試料の採取層厚は表層から5 mm程度である。

試験地の地質は、表層から順に、現在から1914年大正噴火以降までの噴火活動による降下火山灰の堆積層、土壌層、大正噴火による降下軽石層から成る。

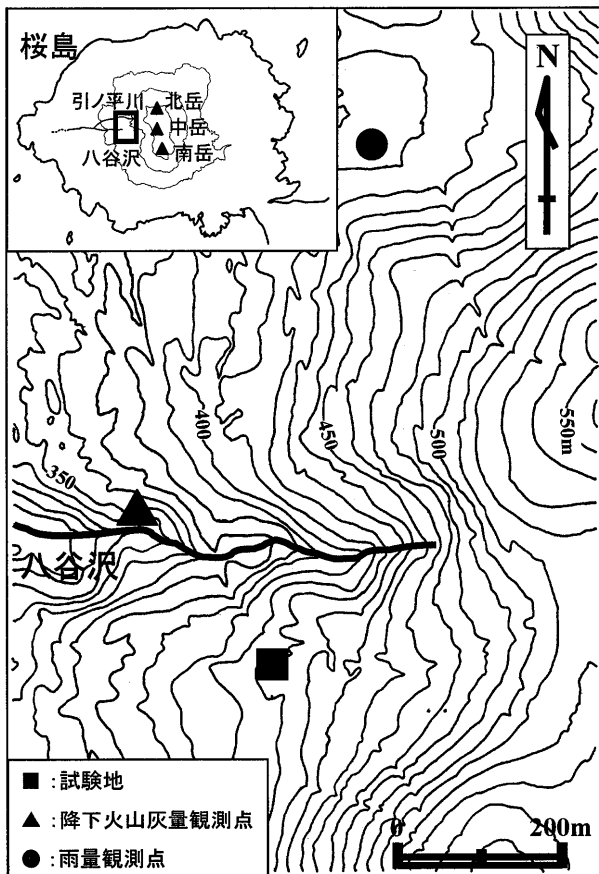


図-1 調査地の位置と地形
Fig.1 Location and topography of the study area.

表-1 試験地の概要
Table 1 Outline of the experimental area.

標高 (m)	412
集水面積 (m ²)	3.1
斜面長 (m)	2.2
斜面の平均勾配 (°)	21.0

2 測定方法

試験地の最下端に表面侵食による流出土砂と、表面流出を捕捉するためのプラスチック容器（長さ1m×幅0.6m×深さ0.4m）を設置し（写真-1）、表面侵食による流出土砂量および表面流出量の測定を一雨ごとに行った。なお、測定は2004年1月21日から開始した。降下火山灰量および雨量の観測も併せて実施している（図-1）。

また、表面侵食による流出土砂量および表面流出量の測定と併せて、試験地内のどのような区域がホートン型地表流（表面流）の発生に寄与しているのかを確認するため、試験地全体が白色で覆われるように、スプレー式の白ペンキを薄く散布した（写真-1）。雨の後白ペンキが水流によって洗い流された部分、すなわちホートン型地表流の発生に寄与した区域（以下、流出発生域という）を、現地測

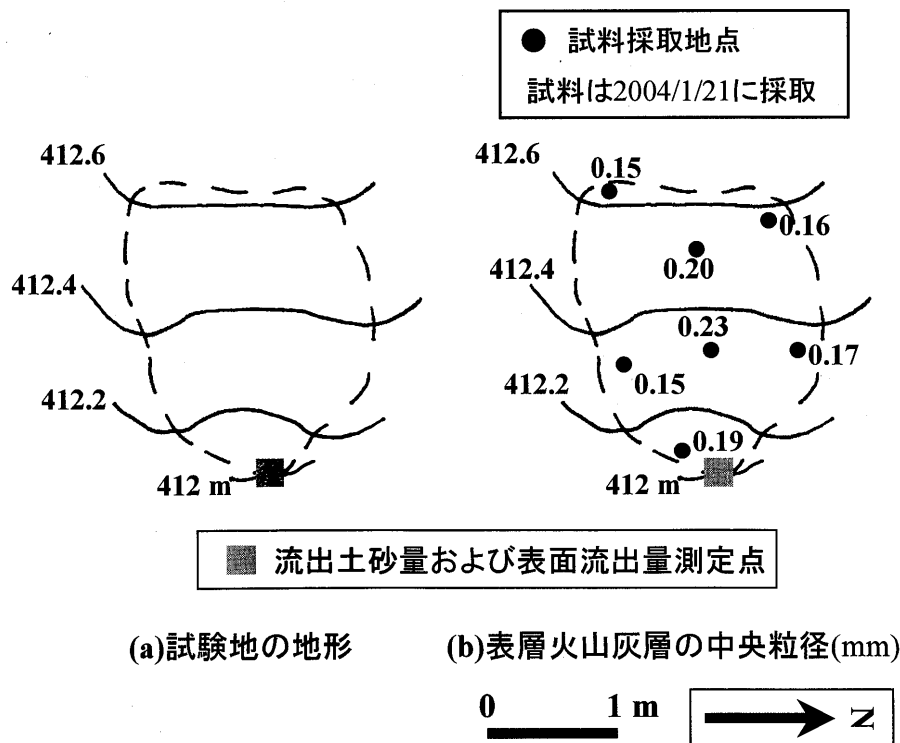


図-2 試験地の地形および表層火山灰層の粒度分布
Fig.2 Topography of the experimental area and grain size distributions of the surface layer volcanic ash.

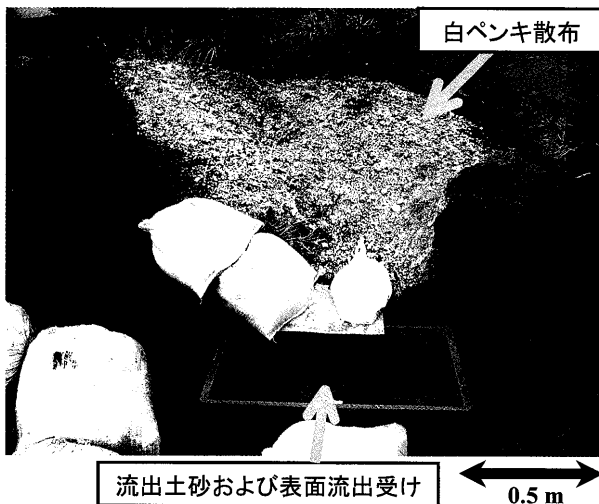


写真-1 試験地の状況 (2004年1月21日撮影)
Photo 1 Condition of the experimental area (taken on January 21, 2004).

量および試験地全体を撮影した写真測定の結果に基づいてスケッチし、試験地における流出発生域の分布図を作成した。さらに、この流出発生域面積が試験地の集水面積に占める百分率（以下、流出発生域面積率という）を求めた。

表面侵食による流出土砂量、表面流出量および流出発生域の変化

図-3は、測定期間ごとの総雨量（以下、期間雨量という）と表面侵食による流出土砂量（a）、および表面流出量（b）の関係を示したものである。流出土砂量および表面流出量は集水面積で割った値である。図によると、流出土砂量および表面流出量は期間雨量が大きくなるほど大きくなる傾向にある。

図-4は、測定期間に得られた表面流出量当たりの表面侵食による流出土砂量の値（以下、SD/SRという）を、期間雨量と併せて示したものである。SD/SRは侵食が進むにつれて減少傾向にある。ところで、測定期間の2004年1月21日から同年5月10日までの噴火活動は非常に穏やかであり、この期間に得られた降下火山灰量から降灰の堆積深を求めると0.007mmとなる。このことから測定期間中における降下火山灰の影響は非常に少ないと考えられる。小川ら（2003）は、噴火活動終息後の雲仙普賢岳の火砕流堆積物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い、SD/SRの値は火山灰被覆後、侵食が進むにつれて減少していくことを示した。今回得られた結果は小川ら（2003）のそれと同様な傾向を示す。

図-5は、試験地における流出発生域（実測値）の分布図の例を示したものである。流出発生域は雨量の違いによっ

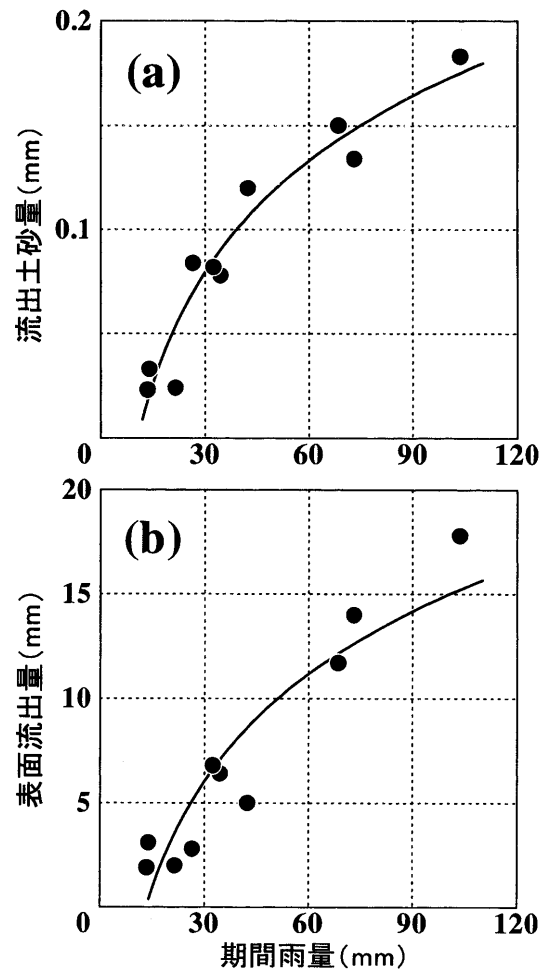


図-3 期間雨量と流出土砂量（a）、および表面流出量（b）の関係

Fig.3 Relationship between periodical rainfall and sediment discharge (a), and surface runoff (b).

て変化している。凹部だけでなく、粒径の細かい斜面や尾根部近くもホートン型地表流の発生に寄与した区域となっている。

図-6は、期間雨量と試験地における流出発生域面積率（実測値）の関係を示したものである。この図は、期間雨量の増加に伴い流出発生域、すなわちホートン型地表流発生に寄与する場が拡大することを表現している。流出発生域面積率（実測値）は期間雨量の増加に伴い拡大する傾向にある。図-5および図-6の結果は、流出発生域が表層火山灰層の粒径、斜面勾配などの土質条件や地形条件および雨量条件の違いに関係していることを示唆している。

図-7（a）は、表面侵食による流出土砂量と流出発生域面積率（実測値）の関係を、図-7（b）は、表面流出量と流出発生域面積率（実測値）の関係を示したものである。流出発生域面積率（実測値）は、流出土砂量および表面流出量が大きくなるほど大きくなる傾向にある。

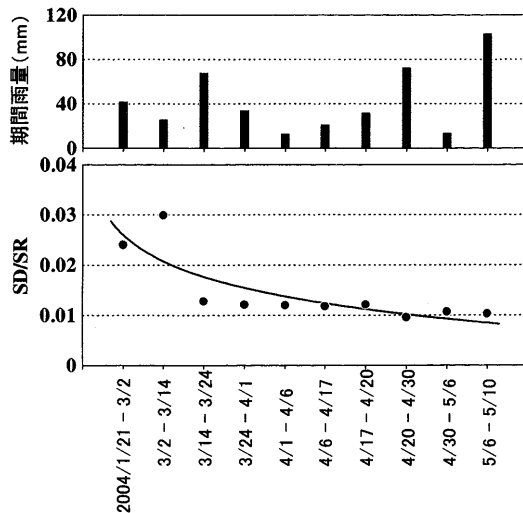


図-4 SD/SR および期間雨量の変化
Fig.4 Changes in SD/SR and periodical rainfall.

表面流の流出過程の検討

2004年1月21日から同年5月10日までの測定期間に得られた表面流出量のデータを用いて流出過程を検討する。

雨水の流出過程を次のようにモデル化した。斜面に降った雨のうち、初期損失雨量と浸透能値の和、すなわち損失雨量を超えた部分がホートン型地表流（表面流）を発生させる。表面流は火山灰層表面を削り取り土砂を下流に運搬する。流出モデルとして kinematic wave 法を用いる。このモデルでは、雨水の流出過程を損失雨量、マンニングの粗度係数および流出発生域面積（計算値）の3パラメータで表し、流出量の計算を行う。

有効雨量は次式で表す。

$$\Sigma R < R_L \text{ の場合 } R_{e(i)} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\Sigma R < R_L \text{ の場合 } R_{e(i)} = R_{(i)} - I, \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $R_{e(i)}$ ： i 時における有効雨量（mm/hr）， ΣR ：雨量の開始から i 時までの連続雨量（mm）， R_L ：初期損失雨量（mm）， $R_{(i)}$ ： i 時における雨量（mm/hr）， I ：浸透能（mm/hr）である。連続雨量は6時間の中断をもって算出する。

斜面の表面流がマンニング則に従うとすると、斜面流の連続式および運動式はそれぞれ次式で表せる。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = Re \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$A = n^{3/5} I^{-3/10} q^{3/5} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 A ：単位幅あたりの流水断面積， t ：時間， q ：単位幅あたりの流量， x ：上流端を原点とした場合の斜距離， n ：マンニングの粗度係数， I ：斜面の平均勾配， Re ：有効雨

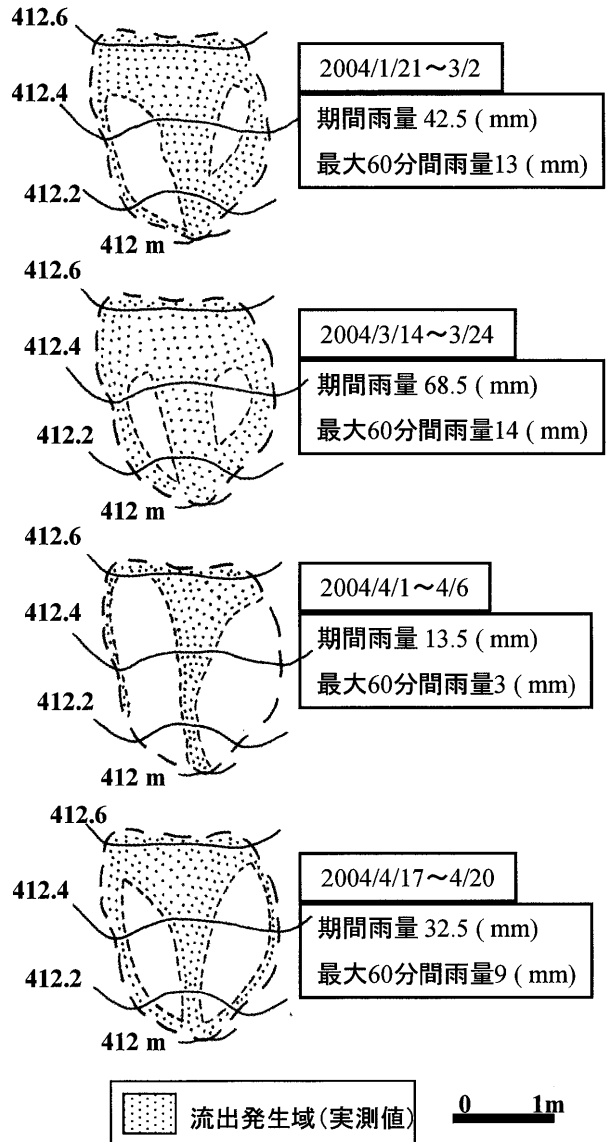


図-5 試験地における流出発生域（実測値）
Fig.5 The observed area contributing to the occurrence of Hortonian overland flow in the experimental area.

量強度である。なお、表面流の継続時間は有効雨量が生じている期間と仮定した。計算条件を表-2に示す。河道横断面は幅広矩形断面で近似する。損失雨量は、連続雨量から表面流出量（実測値）を差し引いた値とする。マンニングの粗度係数 n と流出発生域面積（計算値）の2パラメータについては現実に取りうる範囲（表-2）で変化させ、(5)式で定義される相対2乗偏差 E が最小となるものを最適値とした。

$$E = \frac{(Q_o - Q_c)^2}{Q_c^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 Q_o ：表面流出量（実測値）， Q_c ：表面流出量（計算値）である。

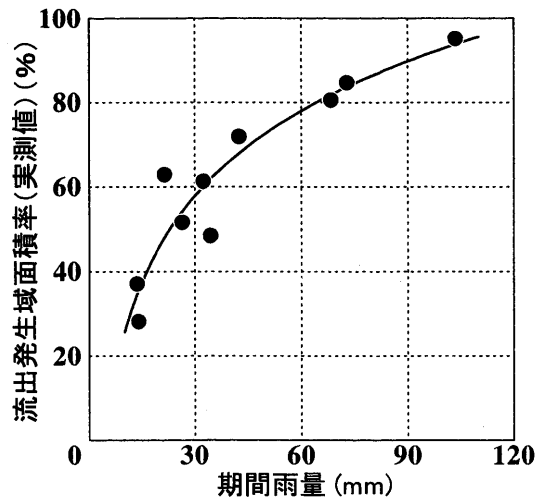


図-6 期間雨量と流出発生域面積率（実測値）の関係
Fig.6 Relationship between periodical rainfall and the observed area contributing to the occurrence of Hortonian overland flow in the experimental area.

図-8は、損失雨量および流出解析により求めたマンニングの粗度係数の変化を、期間雨量と併せて示したものである。損失雨量は測定ごとにばらついている。この理由として、先行雨量が測定期間ごとに違うため、土壌の水分条件が異なっていることが関係していると考えられる。マンニングの粗度係数は侵食ステージが進むにつれて増加傾向にある。

図-9は、試験地における表層火山灰層の中央粒径の分布を経時的に示したものである。試料の採取地点および採取方法は図-2（b）と同様である。試料の採取は2004年1月21日、同年3月24日および同年5月10日の3回行った。図によると試験地内の表層火山灰層は侵食が進むにつれて粗粒化している。この結果は、流出解析により求めたマンニングの粗度係数が経時的に増加傾向にあること（図-8）と調和的である。粗粒化は凹部だけではなく尾

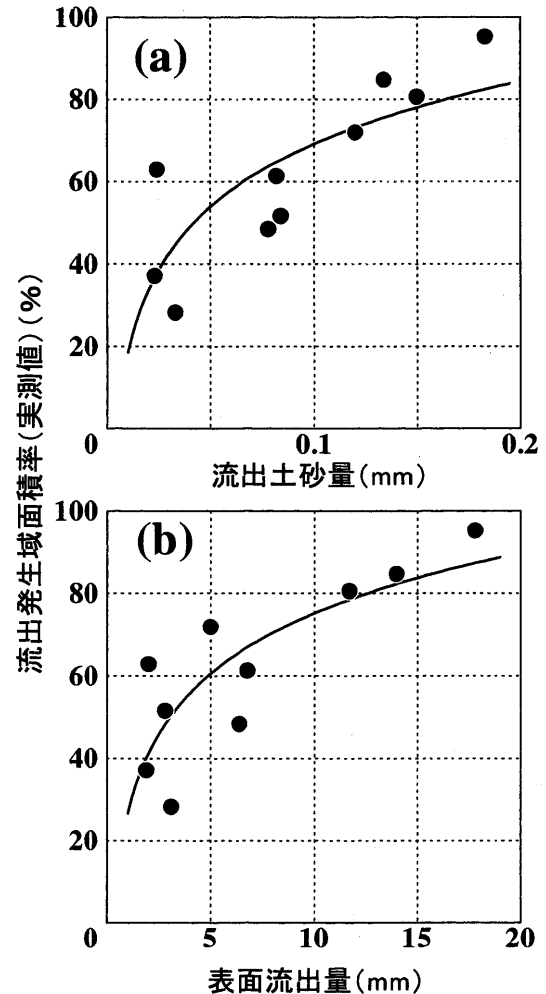


図-7 流出土砂量と流出発生域面積率（実測値）（a）、および表面流出量と流出発生域面積率（実測値）（b）の関係

Fig.7 Relationship between sediment discharge and the observed area contributing to the occurrence of Hortonian overland flow (a), and surface runoff and the observed area contributing to the occurrence of Hortonian overland flow (b) in the experimental area.

表-2 計算条件
Table 2 Conditions of analysis.

斜面の平均勾配 I	0.36
河道幅 (m)	0.2
損失雨量 (mm)	連続雨量 - 表面流出量(実測値)
マンニングの粗度係数 n ($\text{sec}/\text{m}^{1/3}$)	0.01~0.5
流出発生域面積(計算値) (m^2)	最大で区画の集水面積(3.1 m^2)まで

注: 「マンニングの粗度係数」および「流出発生域面積」は最適化している。

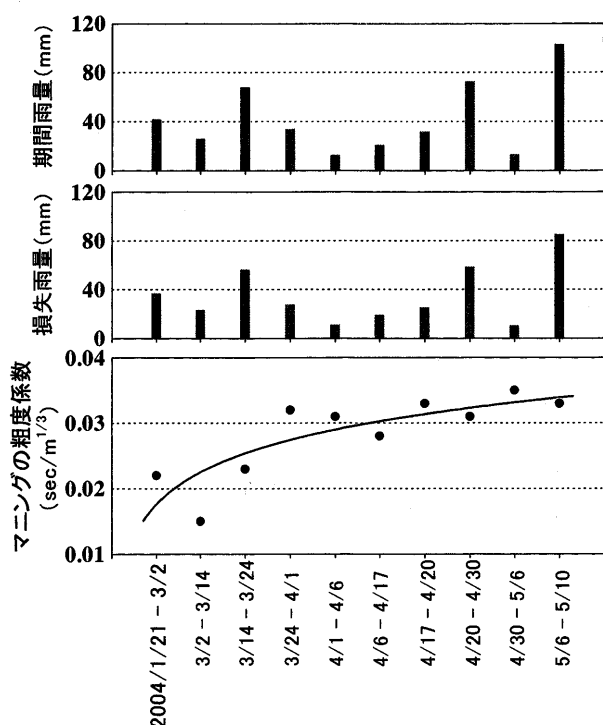


図-8 損失雨量, マニングの粗度係数および期間雨量の変化

Fig.8 Changes in rainfall loss, Manning's coefficient of roughness, and periodical rainfall.

根部付近でも進んでいることから、これらの区域も流出発生域になったことが示唆される。

図-10は、期間雨量と流出発生域面積率の関係を、実測値と計算値に区分して示したものである。流出発生域面積率(実測値)および同(計算値)は期間雨量が大きくなるほど大きくなる傾向にある。期間雨量に対する両者の変化は同様な傾向を示す。測定期間に得られた流出発生域面積率(実測値)と同(計算値)から、両者の相対2乗偏差 E の範囲を(5)式から求めると0.02~0.18(平均0.07)となり、計算値は実測値を比較的良好に再現している。

謝辞

本研究の実施にあたっては、九州森林管理局鹿児島森林管理署ならびに(財)林業土木コンサルタンツ九州支所に多大なるご支援をいただいた。また、試験地設置の際には、当時鹿児島大学農学部砂防・水文学研究室の4年生であった宇都敬太君ならびに福納直樹君にご協力頂いた。ここに記して心から謝意を表する。

引用文献

地頭蘭隆・下川悦郎(1987):桜島山腹斜面における表面流出特性。鹿大農演報, 15, p.51-61

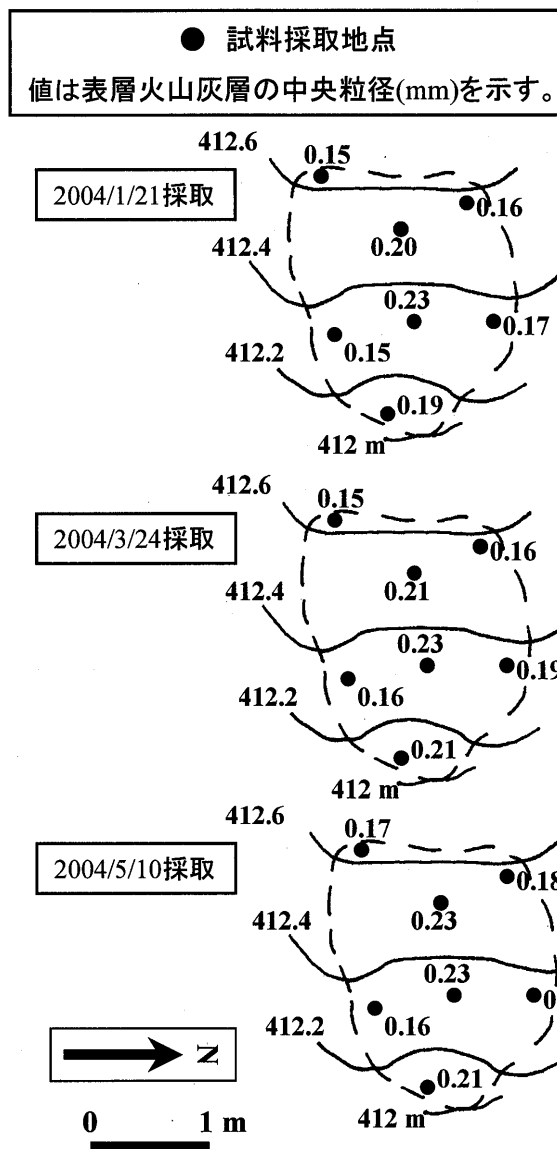


図-9 表層火山灰層の粒度分布の変化

Fig.9 Changes in grain size distributions of the surface layer volcanic ash in the experimental area.

地頭蘭隆・下川悦郎(1989):火山灰に覆われた桜島山腹斜面における表面流出。砂防学会誌(新砂防), Vol.42 No.3, p.18-23

地頭蘭隆・下川悦郎・永田治・寺本行芳(1998):桜島における表面流の観測。鹿大農演報, 26, p.1-8

小川泰浩・清水晃・清水貴範・宮縁育夫(2003):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。砂防学会誌, Vol.55 No.5, p.22-30

下川悦郎・地頭蘭隆(1987a):桜島における表面侵食による土砂生産。砂防学会誌(新砂防), Vol.39 No.6, p.11-17

下川悦郎・地頭蘭隆(1987b):火山灰の被覆が火山体の侵

食速度に及ぼす影響－桜島火山を中心にして－，地形，
Vol.8 No.4, p.269-286

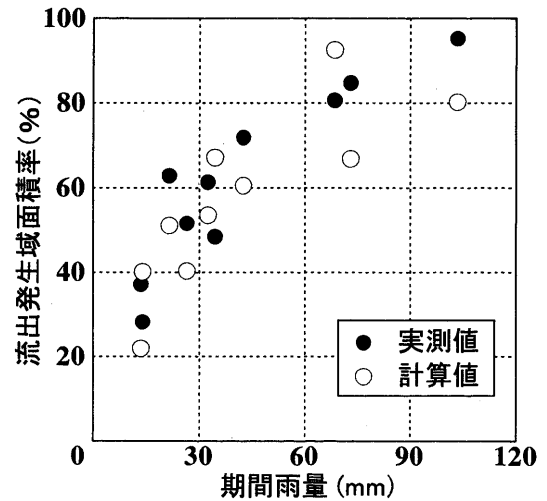


図-10 期間雨量と流出発生域面積率（実測値）および流出発生域面積率（計算値）の関係

Fig.10 Relationship between periodical rainfall and the observed area contributing to the occurrence of Hortonian overland flow, and the calculated area contributing to the occurrence of Hortonian overland flow in the experimental area.

抄 録

桜島の荒廃斜面で発生する表面流の流出過程について、現地調査および流出解析の結果に基づき検討した。得られた結果は次の通りである。

- (1) 表面侵食による流出土砂量，表面流出量および流出発生域面積は雨量強度の増加に伴って大きくなる傾向にある。また，表面流出量当たりの表面侵食による流出土砂量の値（SD/SR）は侵食が進むにつれて減少傾向にある。
- (2) 現地調査の結果，試験地における流出発生域は表層火山灰層の粒径，斜面勾配および雨量条件などの違いによって変化することが示唆された。
- (3) 表面流の流出解析を行い，モデル中のパラメータ値の変化を通じて流出過程の検討を行った。その結果，マンニングの粗度係数は侵食が進むにつれて大きくなる傾向を示した。この結果は表層火山灰層の粒径分布の変化とも符合した。さらに，流出発生域面積（計算値）は同（実測値）を比較的良く再現した。