

桜島の緑化斜面における植物の生長に伴う土砂流出の経年変化

寺本行芳¹・下川悦郎¹

An effect of growth of revegetation on process of sediment discharge by sheet erosion on the revegetated slope at Mount Sakurajima

Yukiyoshi Teramoto¹ and Etsuro Shimokawa¹

Abstract: Sediment discharge by sheet erosion was measured on a revegetated hillside slope at Mount Sakurajima during February 2001 through February 2007. The effects of temporal changes in the growth of revegetation on the process of sediment discharge by sheet erosion were examined. The results are as follows. The value for the yearly sheet erosion rate during February 2002 and February 2003 on revegetated hillside slope was about 10 % of that during February 2001 and February 2002, and the value for the yearly sheet erosion rate during February 2003 and February 2004 was about 20 % of that during February 2002 and February 2003. Since February 2004, the values for the yearly sheet erosion rate have showed the same tendency. The yearly sheet erosion rate has greatly decreased along with the growth of revegetation on the revegetated hillside slope. The results of the hydraulic experiment showed that the temporal growth of revegetation on the revegetated hillside slope caused an increase in the infiltration capacity, Manning's coefficient of roughness and interception of rainfall, and a decrease of the dry density of the surface volcanic ash layer. As a result, the area contributing to Hortonian overland flow, surface runoff, and sediment discharge caused by sheet erosion was considered to have decreased.

1 はじめに

桜島では噴火活動により荒廃した山腹斜面の侵食防止と早期の植生回復をはかるため、2001年3月に航空緑化が試験的に実施された。その後も航空緑化が継続的に実施されている(鹿児島森林管理署, 2002)。緑化された山腹では表面侵食による流出土砂量は大幅に減少した(寺本ら, 2004)。しかし、流出土砂量の測定は緑化施工直後の短期間を対象として実施したものであり、植物の生長が表面侵食による土砂流出に及ぼす影響については検討していない。

本論では、植物体の生長の経年変化が土砂流出のそれにどのような影響を及ぼすか、6年間にわたって実施した流出土砂量の測定と植生調査に基いて検討する。本研究に関連した噴火活動に伴って荒廃した流域における植生の土砂流出抑制効果については、Collins and Dunne (1986)、西田ら (1998)、山越・諏訪 (1998)、Yamakoshi and Suwa (2000)、下川 (2001)、山越ら (2001)の研究例がある。

2 調査地と方法

2.1 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に位置する(図1)。噴火活動により荒廃した八谷沢上流域の山腹斜面における侵食防止をはかるため、鹿児島森林管理署は2001年3月に航空緑化を試験的に

実施した。2002年から2007年までの毎年3月には追肥を行っている。裸地化していた山腹斜面は緑化によってススキを中心とした草本の植物で覆われた。ススキの生長量は経年的に増加している(寺本, 2006)。

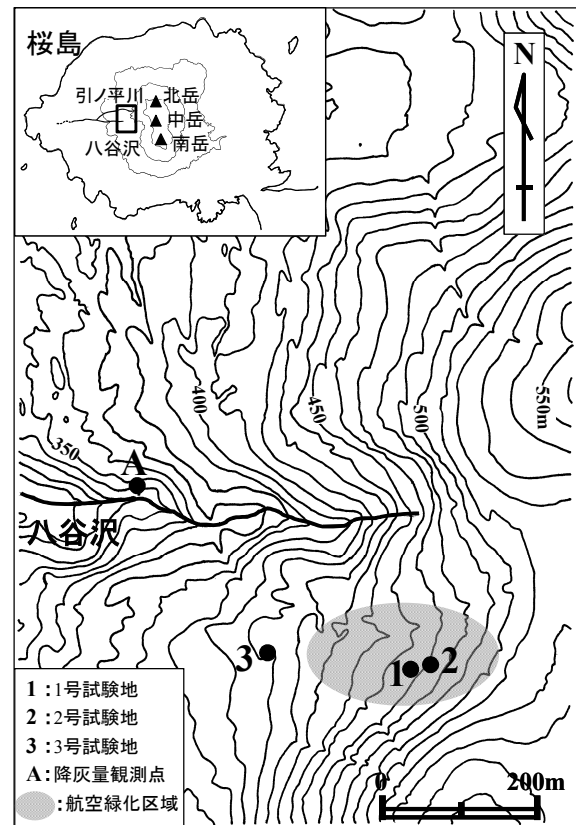


図1: 調査地

¹ 鹿児島大学農学部, Faculty of Agriculture, Kagoshima University, 1-21-24 korimoto, Kagoshima, 890-0065 Japan

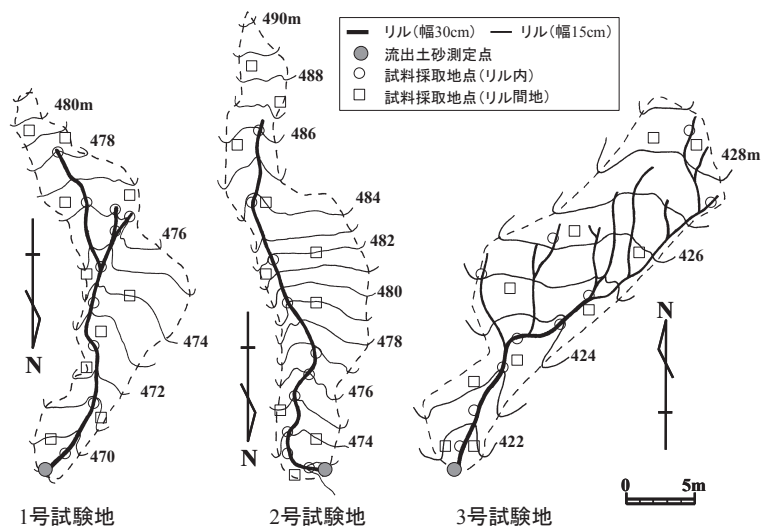


図2：各試験地の地形



写真1：試験地の様子（2002年7月撮影）

表1：試験地の概要

	1号試験地	2号試験地	3号試験地
標高 (m)	469	473	421
集水面積 (m ²)	141	170	192
斜面長 (m)	34.5	40.0	32.0
斜面の平均傾斜 (°)	21.9	25.7	14.9
リルの面積 (m ²)	14	12	20
リル内の中央粒径(平均値) (mm)	0.24	0.22	0.26
リル間地の中央粒径(平均値) (mm)	0.20	0.18	0.19

表面侵食による流出土砂量を測定するための微小集水試験地を八谷沢上流域の緑化斜面に2箇所（以下、1号試験地および2号試験地という）、対照試験地を裸地斜面に1箇所（以下、3号試験地という）設けた（図1、写真1）。流出土砂量は、2001年2月から2007年2月までの6年間にわたって測定した。各試験地の概要を図2および表1に示す。測定期間中、各

試験地の集水面積、リルおよびリル間地の面積に変化はみられなかった。なお、ここでいうリル間地とはリル侵食の及んでいない布状侵食（面状侵食）を受ける区域をいう。3号試験地は1号および2号試験地に比べリルの密度が高い。各試験地のリル内（10地点）およびリル間地（10地点）において火山灰表層の試料を採取し（図2）、粒度分析を行った。試

料の採取層厚は表層から5mm程度である。試料は同じ場所で2001年7月、2002年6月と同年10月、2003年から2007年までの毎年7月の計8回採取し、粒度分布に大きな違いはみられなかった。リル内およびリル間地の中央粒径（平均値）は8回の平均値で表した

（表1）。リル内およびリル間地の粒度分布は3つの試験地とも似たような傾向を示した。リル内はリル間地に比べ細粒火山灰が流出し粗粒化が進んでいる。なお、試験地の土層は、表層から順に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。

2.2 測定および試験方法

各試験地の最下端に流出土砂を捕捉するためのポケット（長さ1.6m×幅1m）を設け、一雨ごとに流出土砂量の測定を実施した（写真1）。流出土砂量の測定と同時に降灰量の測定も実施している（図1）。降灰量の測定は流出土砂量の測定日に実施している。雨量は、試験地から北東方向に約2.8km離れた地点で鹿兒島森林管理署によって測定された。

緑化斜面の優先種であるススキの葉は中途から外側に向かって反り返り、頂点から内側の茎・葉は全体として「漏斗」のような形状（以下、漏斗という）をなしている（図3、寺本ら、2004を改変）。ススキ1株を漏斗とみなして火山灰層のみかけの浸透能を測定した。浸透能の測定は2004年7月および2005年7月の2回実施した。測定方法は次の通りである。①漏斗の全面に如雨露で真上から散水し、漏斗から漏れて地表面に流出した量を計測する。②散水量（2000cc、雨量に換算して4mm）から流出量を差し引いて浸透量を求める。③浸透量を浸透に要した（散水開始から流出終了までの）時間で割って浸透能を求める。散水は流出量がほぼ一定値になるまで3～4回繰り返して行い、最終の測定値を浸透能とした。なお、浸透能を測定した斜面傾斜は約20度である。浸透能測定後、植物体地被量（地上部の植物体量）の風乾重量を求めた。浸透能の測定は、植物体地被量の異なるススキ24株について実施した。

また、火山灰層の乾燥密度を2004年7月および2005年7月の2回実施した。測定方法は次の通りである。ススキの地上部を刈り取った後、根系が分布している範囲の火山灰層をブロック状に採取し、体積置換法（土質工学会、1987）で火山灰層の乾燥密度を求めた。採取した植物体根系部は風乾重量を測定した。乾燥密度の測定は、植物体地被量の異なるススキ31株について実施した。

さらに、植物体生長量の差が斜面の浸透能および粗度に及ぼす影響を調べるため、八谷沢上流域において植物体地被量が異なる複数の区画を設定し浸透能試験および粗度試験を実施した。植物体地被量は、区画内にある植物体地上部の風乾重量である。試験

は2004年7月および2005年7月に2回実施した。浸透能は次のような簡易な方法で測定した。①仕切られた区画（斜面方向の水平長1m×幅0.5m、斜面傾斜約20度）の全面に如雨露で真上から散水し、その水が地中に浸透しないで地上を流出した量をその下端で計測する。②散水量（2000cc、雨量に換算して4mm）から流出量を差し引いて浸透量を求める。③浸透量を浸透に要した（散水開始から流出終了までの）時間で割って浸透能を求める。なお、散水は流出量がほぼ一定値になるまで3～4回繰り返して行い、最終の測定値を浸透能とした。マンニングの粗度係数は北原ら（1993）と同様の方法で算出した。①浸透能試験を実施した区画で流出量が一定になった後、区画の上端から一定流量を流下させ、その下端で地上を流出した量を計測する。上端と下端の流量を平均し、平均流量を算出する。②流速は、区画の上端より0、0.2、0.4、0.6および0.8mの各点で黄色インクを滴下させ、0.2m下流をインクが通過する時間を計測して求めた。さらに、区画の上端（0m）から下端（1m）までを通過する時間から流速を求めた。

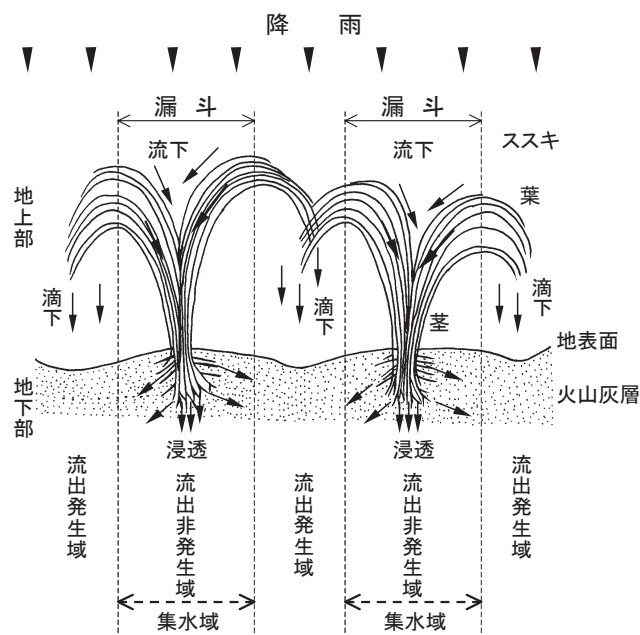


図3：植物体における雨水移動過程の概念図（寺本ら、2004を改変）

0.2mの各区間および1mの全区間で得られた流速の平均値を平均流速としている。③平均流量および平均流速から、マンニングの平均流速公式を用いて粗度係数を計算する。なお、マンニングの式中の勾配には、粗度試験を行った各区画の勾配を使用している。粗度試験終了後、区画内における植物体地上部を刈り取った後、前述した方法で再度浸透能試験を行った。浸透能試験および粗度試験を実施した区画（18地点）における表層火山灰層の粒度分布はほぼ同様な傾向を示しており、中央粒径は0.17～0.23mm（平均

0.20mm) である。

3 結果と考察

3.1 植物の生長に伴う表面侵食による流出土砂量の経年変化

図4は、表面侵食による流出土砂量と降灰量を、測定開始の2001年2月を起点にして経時的に累加させ表示したものである。図中には、鹿児島森林管理署が測定した日雨量（鹿児島森林管理署，2001～2007）も併せて示している。流出土砂量および降灰量は1m²あたりの量に換算した値である（以下、流出土砂量は比流出土砂量という）。1号および2号試験地（緑化斜面）の比流出土砂量は、3号試験地（裸地斜面）のそれに比べ著しく小さい。2001年2月から2007年2月までの6年間に於ける比流出土砂量の合計値と比較すると、1号および2号試験地は、3号試験地のそれぞれ約3%、約5%であり、植物は表面侵食による土砂流出を大幅に抑制している。

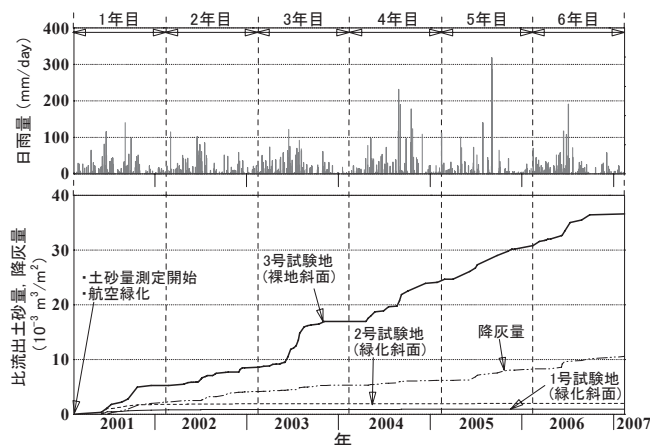


図4：表面侵食による流出土砂量，降灰量および雨量の経時変化

表2は、1号、2号および3号試験地における表面侵食による侵食速度の経年変化を、雨量（鹿児島森林管理署，2001～2007）および降灰量と併せて示したものである。侵食速度とは、流出土砂量を侵食深に換算した値である。1号および2号試験地（緑化斜面）の年侵食速度は、3号試験地（裸地斜面）のそれに比べ非常に小さい。1号および2号試験地における年侵食速度の経年変化は、緑化1年目から2年目にかけてはそれぞれ約89%、約94%減少し、さらに2年目から3年目にかけてはそれぞれ約76%、約79%減少している。3年目以降は変化はみられない。

図5は、緑化斜面における植物体地被量の経年変化である。緑化1年目は緑化直後の3月と、植物体地被量が最も大きい7月に測定した。2年目は数ヶ月ごとに、3年目以降は約1ヶ月ごとに測定した。植物体地被量は、1m²内にある植物体地上部の風乾重量である。植物体地被量は4月頃から増加し始め、7月頃

に最大となり、その後減少している。植物体地被量は緑化1年目から3年目まで経年的に増加し、その後同じようなレベルで推移している。植物体地被量の最大値は、緑化1年目0.4kg/m²、2年目1.1kg/m²、3年目以降5.2～5.6kg/m²（平均5.4kg/m²）であり、1年目から2年目にかけては約2.8倍、2年目から3年目にかけて約4.9倍（平均）増加している。2年目から3年目への増加割合が大きい。植物体地被量が経年的に増加したおもな要因として、噴火活動が穏やかなことと追肥が考えられる。植物体地被量の増加に伴いその効果で年侵食速度は大幅に減少している（表2）。この原因については次節で検討する。

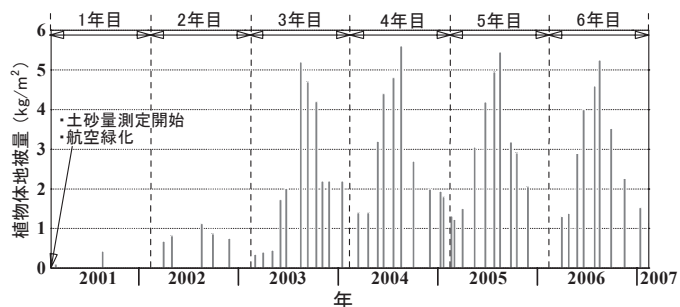


図5：緑化斜面における植物体地被量の経時変化

3.2 植物の生長の経年変化が流出過程に及ぼす影響

優先種としてのススキは株をなしており、株は多数の茎と葉から構成される。茎は、地上部では地表から地上に向かって放射状に広がっている。茎には節があり、そこから茎を包むように細長い葉が伸びている。葉は前述したように中途から外側に向かって反り返り、頂点から内側の茎・葉は全体として「漏斗」のような形状（以下、漏斗という）をなしている。茎の一部は地下に入り込み地下茎を形成している（写真2）。緑化斜面では、雨はまず植物体に到達する。そのうち漏斗内に到達した雨水は葉・茎に捕捉され、残りは葉・茎を伝って流下し、地下茎の間を通過して火山灰層中に浸透する。漏斗内から地表に滴下する雨水はごく一部である。漏斗の外側の葉の部分に到達した雨水は一部葉に補足されるが、大部分は地表に滴下する。なお、葉部は密に発達しており、それを通過する雨水はわずかである（図3）。



写真2：ススキの根系の一例

表2：試験地における表面侵食による侵食速度の経年変化

測定期間	侵食速度 (mm/year)			雨量 (mm)	降灰量 (kg/m ²)
	1号試験地 (緑化斜面)	2号試験地 (緑化斜面)	3号試験地 (裸地斜面)		
2001/2～2002/2 (緑化1年目)	0.78	1.78	5.24	2040	3.1
2002/2～2003/2 (緑化2年目)	0.09	0.11	3.26	2123	2.6
2003/2～2004/2 (緑化3年目)	0.02	0.02	8.37	2316	1.6
2004/2～2005/2 (緑化4年目)	0.02	0.02	7.14	2770	1.2
2005/2～2006/2 (緑化5年目)	0.02	0.03	6.72	2233	2.9
2006/2～2007/2 (緑化6年目)	0.02	0.02	5.83	2245	3.2

図6は、植物体地被量と漏斗におけるみかけの浸透能の関係である。みかけの浸透能は、土壌の浸透能と植物体による雨水遮断量をあわせたものである。植物体地被量の増加に伴ってみかけの浸透能は大きく増加している。この理由として、植物体の生長に伴い、漏斗を通した火山灰層内への雨水浸透量が増加したことと、植物体による雨水遮断量の増加の2つが考えられる。ちなみに、緑化1年目、2年目および3年目以降の地被量の最大値（図5）に対する浸透能はそれぞれ95mm/hr, 120mm/hr, 190mm/hrとなる。

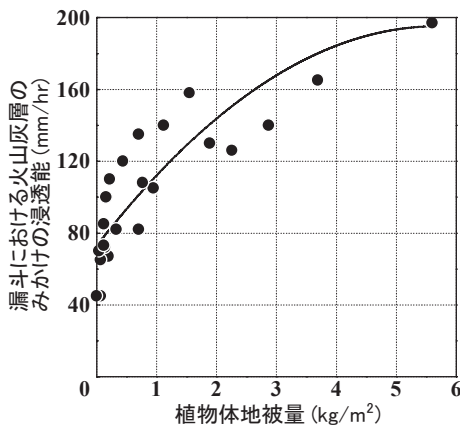


図6：植物体地被量と漏斗における火山灰層のみかけの浸透能の関係

図7は、植物体根量と根系部火山灰層の乾燥密度の関係である。裸地の火山灰層の乾燥密度は1.4g/cm³程度である。植物体根量の増加によって火山灰層の空隙率は大きくなり、根量約3.3kg/m²では0.5g/cm³程度まで減少している。

いる。土壌の浸透能の増加には根系の発達（図7）が、みかけの浸透能の増加には根系の発達に加えて植物体地上部の雨水遮断が寄与している。

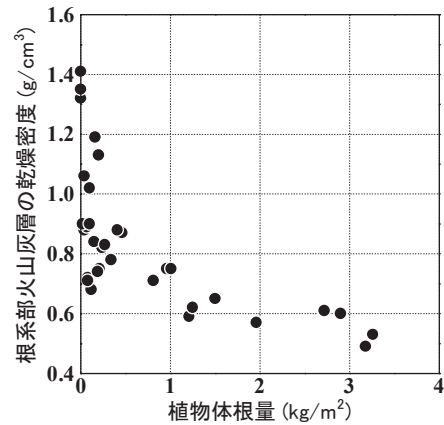


図7：植物体根量と乾燥密度の関係

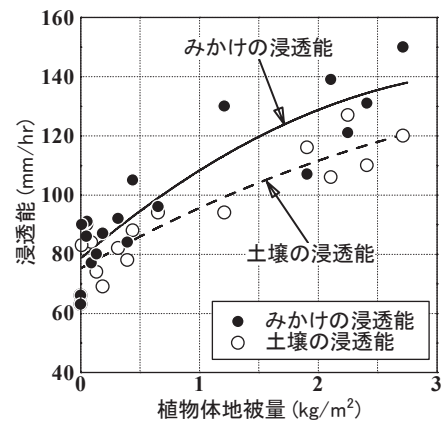


図8：植物体地被量と浸透能の関係

図8は、浸透能試験を実施した区画における植物体地被量と浸透能の関係である。図中●印は土壌の浸透能と植物体による雨水遮断量をあわせたみかけの浸透能を、○印は植物を刈り取ったのちの土壌の浸透能を示す。みかけの浸透能および土壌の浸透能は、植物体地被量が増加するにつれて大きくなって

図9は、粗度試験を実施した区画における植物体地被量とマンニングの粗度係数の関係である。マンニングの粗度係数は、植物体地被量が増加するに伴って大きくなる。これは、植物体地被量が増加するにつれて、表面流がその抵抗をより大きく受けるためである。ちなみに、緑化1年目、2年目および3年目

降の地被量の最大値（図5）に対するマンニングの粗度係数はそれぞれ、 $0.29\text{sec}/\text{m}^{1/3}$ 、 $0.37\text{sec}/\text{m}^{1/3}$ 、 $0.54\text{sec}/\text{m}^{1/3}$ となる。植物体地被量とマンニングの粗度係数の関係については、雲仙普賢岳（Yamakoshi and Suwa, 2000）および焼岳上々堀沢（山越ら, 2001）の測定例がある。それによると、雲仙普賢岳では植物体地被量 $0.04\text{kg}/\text{m}^2$ に対するマンニングの粗度係数は $0.05\sim 0.10\text{sec}/\text{m}^{1/3}$ 、焼岳上々堀沢では裸地斜面のマンニングの粗度係数は $0.04\text{sec}/\text{m}^{1/3}$ 、植物体地被量 $0.36\text{kg}/\text{m}^2$ に対するマンニングの粗度係数は $0.24\sim 0.40\text{sec}/\text{m}^{1/3}$ であり、植物体地被量の増加に伴いマンニングの粗度係数は大きくなっている。植物体地被量に対するマンニングの粗度係数は、既往の測定例と整合的である。

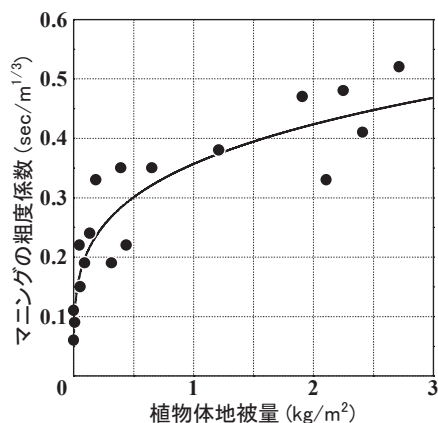


図9：植物体地被量とマンニングの粗度係数の関係

緑化斜面1号および2号試験地における表面侵食による侵食速度が経年的に減少した理由として、植物体地被量の増加（図5）に伴って根量が増加し、火山灰層の空隙率が増加したこと（図7）、および植物体地被量の増加に伴って雨水遮断量が増加したこと（図8）から漏斗における火山灰層のみかけの浸透能が増加すること（図6）で、浸透能の大きな区域が経年的に増加したことが挙げられる。これらに加え、植物体地被量の増加によって表面流に対する抵抗粗度が大きくなったこと（図9）も挙げられる。以上のことから、表面流の発生に必要な水の供給が抑制され、表面流の発生条件が緩和されたことにより、表面侵食による流出土砂量が減少したと考えられる。

4 まとめ

桜島の緑化斜面試験地における表面侵食による年侵食速度の経年変化をみると、緑化1年目から2年目にかけては平均で約90%以上減少、2年目から3年目にかけては平均で約80%減少、3年目以降はほぼ同じ値を示した。緑化斜面試験地における年侵食速度の経年変化は、植物体地被量の経年的な増加傾向とよく対応している。

緑化斜面試験地における表面侵食速度の経年的な減少は、植物体地被量の増加に伴って根量が大きくなったことで火山灰層の空隙率が増加したこと、および植物体地被量の増加に伴って雨水遮断量が増加したことから漏斗の火山灰層におけるみかけの浸透能が増加することで、浸透能の大きな区域が増加したこと、さらに、植物体地被量の増加によって表面流に対する抵抗粗度が大きくなったことによってもたらされたことが確認された。

末筆ではあるが、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の皆様に多大なるご支援を頂いた。また現地調査の際には、鹿児島大学農学部砂防・森林水文学研究室の学生諸氏に多大なご協力を頂いた。関係各位に心より謝意を表す。

引用文献

- [1]Collins, B. D. and Dunne, T.(1986) : Erosion of tephra from the 1980 eruption of Mount St.Helens. Geol. Soc. Amer. Bull. No.97, pp.896-905.
- [2]土質工学会編(1987) : 土質試験法, 社団法人 土質工学会, p.2-4-1 - 2-4-3.
- [3]鹿児島森林管理署(2001～2007) : 観測資料
- [4]鹿児島森林管理署(2002) : 桜島地区民有林直轄治山事業における航空実播工試験施工について. 治山, Vol.47 No.9, pp.208-211.
- [5]北原曜・張洪江・遠藤泰造(1993) : 中国黄土高原における森林の侵食防止機能の水理的な解明. 日林論, Vol.104, pp.747-750.
- [6]西田頭郎・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. 日緑工誌, Vol.23 No.4, pp.249-255.
- [7]下川悦郎(2001) : 火山性荒廃地の水文・侵食特性と緑化. 日緑工誌, Vol.26 No.4, pp.271-274.
- [8]寺本行芳・下川悦郎・田中信・地頭菌隆・稲元崇裕 (2004) : 桜島の荒廃斜面における表面侵食による土砂流出と植生の影響. 砂防学会誌, Vol.57 No.1, pp.3-12.
- [9]寺本行芳(2007) : 桜島火山の水文・侵食に関する調査・観測—鹿児島大学砂防・森林水文学研究室の調査・観測紹介—, 砂防学会誌, Vol.60 No.4, pp.71-74.
- [10]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, pp.3-10.
- [11]Yamakoshi, T. and Suwa, H.(2000) : Post-Eruption Characteristics of Surface Runoff and Sediment Discharge on the Slope of Pyroclastic-Flow Deposits, Mount Unzen, Japan. 地形, Vol.21 No.4, pp.469-497.
- [12]山越隆雄・水山高久・諏訪浩・奥西一夫・仲野公章 (2001) : 焼岳上々堀沢源流域斜面における降雨流出特性の20年間の経年変化. 砂防学会誌, Vol.54 No.4, pp.22-32.

〔受付 平成21年3月11日, 受理 平成21年6月10日〕