

三宅島火山降灰地帯の土壌侵食実態に関する実証的研究

阿部和時¹・黒川 潮¹・浅野志穂¹・岡本 隆¹・松山康治¹・落合博貴¹
寺嶋智巳¹・島田和則¹・野口宏典¹・大丸裕武²・宮縁育夫²・小川泰浩²

摘要 :2000年6月から始まった三宅島の火山活動による多量の降灰で雄山山腹の植生は壊滅的被害を受けた。この影響で泥流災害が島全域で発生し、現在も危険性は非常に高い状態にあると考えられる。本研究では、このような火山降灰地帯が形成された直後の激しい土壌侵食の実態を実証的に明らかにすることを目的とした土壌侵食の発生状況は降灰による森林被害の程度と相関性があると推察されるので、空中写真による森林被害区分を行い、それぞれの区分において現地水路侵食実験で侵食特性を検討した。その結果、降灰が堆積し形成された地表面は流速が20~35cm/secと早く、浸透性が低いこと、しかし流出土砂量は降灰層中に枝葉が混入した地区よりも少ないこと等が示された。このデータをもとに汎用土壌侵食式(USLE)によって相対的な面状侵食の危険度を、火口を中心とした14.5km²の範囲について示した。

キーワード :三宅島, 火山灰, 侵食, 面状侵食, 森林被害, 2000年噴火活動

Abe, Kazutoki, Kurokawa, Ushio, Asano, Shiho, Okamoto, Takashi, Matsuyama, Kouji, Ochiai, Hirotaka, Terajima, Tomomi, Shimada, Kazunori, Noguchi, Hironori, Daimaru, Hirotake, Miyabuchi, Ikuo and Ogawa, Yasuhiro: Corroborative study on the condition of soil erosion in the volcanic ash deposited area, Miyake Island

Abstract : A great amount of volcanic ash erupted from Miyake Island in 2000 destroyed vegetation on hill-slope, and mud-flows occurred in almost all torrents. A purpose of this study is to make soil erosion conditions of the deposited ash layer just after the eruption clear, empirically. A map of forest damage classes in 14.5 km² study area were drawn by an interpretation of aero photography. In each forest damage class, features with respect to sheet erosion were studied by a channel erosion experiment. As the experiments result for the most seriously damaged area in which only ash was deposited, 20 to 30 cm/sec of the surface flow, lower infiltration rate, and less eroded sediment than secondary damaged forest area in which ash containing with leaves and twigs was deposited were shown. A hazard area of the sheet erosion was simulated and mapped by the experiment data and Universal soil loss equation.

Key words : Miyake Island, volcanic ash, erosion, forest damage, volcanic activity in 2000

1. はじめに

三宅島では2000年6月26日から地震活動が活発化し、7月8日には島の中央部に位置する雄山山頂から噴火活動が始まった。以降、山頂噴火が頻繁に発生し多量の火山灰が雄山山頂を中心に堆積した。7月26日以降、豪雨があると降灰によって浸透性が低下した山腹から泥流が発生するようになった。泥流は雄山山腹に形成されているほとんど全ての谷で発生し、海岸沿いの住居地区に甚大な被害を及ぼした。9月4日には全島民避難が実施された。

近年、火山噴火に伴う火山灰の堆積で土砂流出が発生した例は桜島⁷⁾、雲仙普賢岳^{1,3)}、有珠山^{2,8,10)}等でみられ、侵食に関する詳細な研究が行われている。一般的に、噴火直後の表面侵食や泥流は堆積した火山灰層の透水性が低いために地表流が生じて発生すると考えられているが、火山灰の粒径分布や化学組成等や火山灰堆積量、地形条件にも影響を受けるた

め、それぞれの火山ごとに、また同じ火山でも噴出物の性質により表面侵食や泥流の発生状況に違いがみられる。したがって、それぞれの火山において火山活動や火山堆積物の特徴と侵食過程の調査研究を行うことは、火山地域における土砂災害防止対策や将来の植生回復を図る上で意義があると考えられる。

三宅島における近年の火山活動は1874、1940、1962、1983年に発生しているが、いずれも山腹噴火が中心で、多孔質の溶岩流と多孔質の玄武岩質スコリアの噴出を伴うものであった⁴⁾。しかし、今回の噴火活動では約220万m³に及ぶ細粒火山灰が雄山山頂を中心に堆積し、森林植生にも壊滅的被害を与えたために以前の火山活動とは異なった多量の土砂流出現象が生じ、今後も土砂災害の危険性が危惧される状況となっている。本稿では、このような三宅島の細粒火山灰堆積地域における面状侵食の実態を森林植生の被害状況と関連させて、定量的に検討することを目的とした。

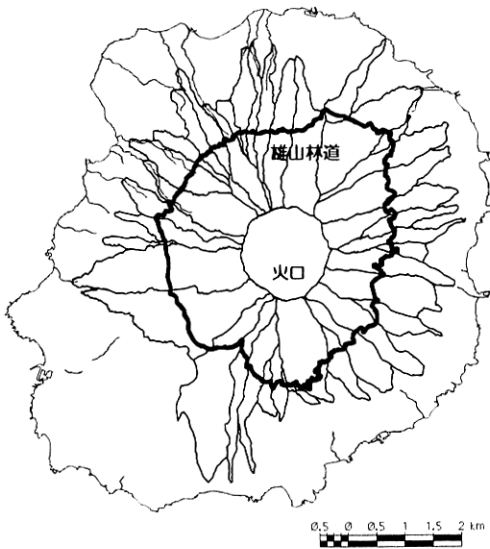
¹独立行政法人森林総合研究所, For. & For. Prod. Res. Inst.

²独立行政法人森林総合研究所九州支所, Kyusyu Res. Center, For. & For. Prod. Res. Inst.

2. 調査地の概要

三宅島は東京の西南西約180kmに位置し、面積約55km²、玄武岩よりなる火山島である。図1に示すように島の中央部に主成層火山の雄山が第四紀後期更新世からの火山活動で形成され、火口を中心に放射状に谷が発達している。

2000年の火山活動は雄山山頂からの火山灰の噴出が中心で、7、8月に約220万m³の噴出があり、9月以降は極めて少ないと推定されている。火山灰層の堆積厚さの等厚線を描くと火口付近の約1mを最高に、北東から南西方向に扁平な楕円形の分布となる。今回の調査では降灰量が大きく森林被害が顕著で、リル・ガリーの発達が多くみられた雄山林道（雄山の中腹にある周回林道）より山頂側の約14.5km²とした。



図一1 三宅島における調査地域と主要な流域
(雄山林道より山頂側を調査対象とした。)

Fig.1 Study area in Miyake-island and main watersheds.

3. 調査方法

調査は以下に示す項目について実施した。

3.1 森林被害区分調査

三宅島の植生は、海岸沿いから山麓部に掛けてスダジヤやタブノキを主林木とする照葉樹林が発達し、それより標高の高い地域ではオオバヤシャブシを中心とした先駆性樹種の森林が多くなり、山頂部には噴火活動と風衝作用により成立した草原群落や低木林群落が存在していた⁵⁾。また、雄山林道から海岸沿いではスギ・ヒノキの造林地もある。しかし、噴火活動による多量の降灰によって、これらの植生は広範囲で壊滅的な被害を受けた。森林被害の程度は火口からの距離や方向によって違いがあり、その違いが面状侵食の発達に影響を与えることが考えられるため、2001年2月撮影の空中写真判読によって森林被害程度を以下の4段階に区分し、面積を測定した。

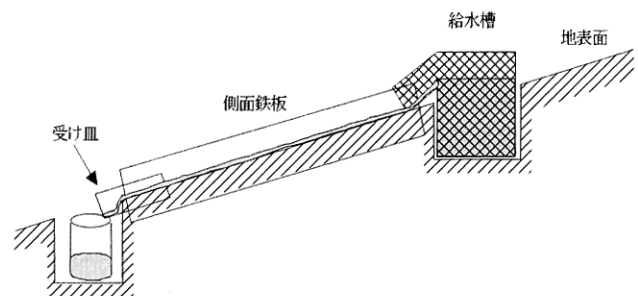
- ① 裸地化地域：降灰の堆積によって植生が完全に埋没した地域
 - ② 枯損1地域：降灰堆積面上に枯損した樹幹のみが残された地域
 - ③ 枯損2地域：降灰堆積面上に枯損した樹幹・枝が残された地域
 - ④ 半枯損地域：生きている葉を付けた樹木が存在する地域
- 現地では半枯損地域を調査したところ、火山灰層が約5cm堆積し、その上にA₀層の堆積がみられた。枯損2地域では火山灰層が約15~20cm堆積し、その中に落枝落葉が多く含まれていた。枯損1地域は枯損2地域より厚い火山灰層の堆積が存在するとみられるが、安全のために立ち入りが禁止されており現地での確認はできなかった。裸地化地域は火口に接する地域に形成されているが、立ち入り禁止のため現場の状況は不明である。しかし、火口より南西方向の牧場・牧草地にも裸地化地域が形成されており、ここでの火山灰厚さは約10~20cmであった。

3.2 面状侵食特性調査

面状侵食の発達状況は地表面の土壌の状態と地表面を被覆する植生の状況によって異なる。そこで、前述した各森林被害区分地域の面状侵食に対する特性を、図2に示した現地水路侵食実験⁶⁾で求めることができる流速、浸透量、流出土砂量、粗度係数の各因子によって検討した。

この装置は、高さ20cm、長さ100cmの側面鉄板2枚を20cmの間隔をあけて斜面傾斜方向に深さ10cm打ち込み簡易な水路を作り、この水路の上部から一定量の水を給水し、流路の下端で地表面を流出してくる流水を採取するものである。採水は、流水が定常状態になってから一定時間行った。流速は水路上端に黒インキを滴下して、これが水路下端に到達する時間を計測して求めた。実験後に、採水した水量と含まれている土砂量、簡易水路上のA₀層の乾燥重量を測定した。実験斜面の条件を表1にまとめた。

実験を実施した斜面は、牧場に形成された裸地化地域、枯損2地域、半枯損地域の3種類の森林被害区分域と、2001年6月に実施された外来草本種による緑化試験地と降灰堆積層が形成された後にリル侵食で元の地表が現れた地点(表1の



図一2 現地水路侵食実験装置

Fig.2 Apparatus of a field flume erosion experiment.

表-1 現地水路侵食実験の斜面状態と給水・採水量

Table 1 Condition of field flume erosion experiments

試験番号	森林被害区分	長さ	斜面傾斜 (°)	供給量 (cc/min)	採水量 (cc/min)
No.4	裸地化地域	89	9	3100	3020
No.5	裸地化地域	90.5	18	3040	2990
No.9	緑化試験地 急	85	14	3060	2434
No.14	緑化試験地 緩	83	12	1910	1775
No.18	半枯損地域	91.5	16.5	2780	1225
No.19	枯損2地域 緩	92	15	2900	2644
No.22	枯損2地域 急	89	28	3000	2970
No.25	裸地化地域リル内	92	23	3000	2498
No.29	常緑樹林 (域外)	83	34	6000	全て浸透

裸地化地域リル内)、さらに降灰による被害をほとんど受けなかった常緑樹林内の斜面である。

3.3 面状侵食危険度評価調査

降灰地域では豪雨時によって面状侵食が容易に発生する状況にあるため、的確な土砂流出防止対策をとる必要がある。このため、面状侵食の発生危険度を農地の面状侵食量を推定するために開発された汎用土壌侵食式⁹⁾ (Universal Soil Loss Equation, 以下USLEとする)と、現地水路侵食実験で得られた結果を組み込んで求める調査を実施した。調査対象地域は、雄山林道より山頂側の全域で、ここを10mグリッドに区分して、各グリッドで危険度を評価し、結果を地図で表した。以下に危険度算出方法を示す。

USLEは次式によって表せる。

$$A = R \cdot K \cdot C \cdot L \cdot S \cdot P$$

A: 年侵食流亡土砂量, R: 降雨係数,

C: 作物 (森林) 係数 K: 土壌係数,

L: 斜面長係数, S: 傾斜係数 P: 保全係数

Rは年間の降雨による土壌の侵食性を示している。Cは農作物による侵食防止効果を示しているが、森林が成立している場合にはその侵食防止効果をCによって表すことになる。Pは人工的な侵食防止対策による効果を表す係数である。Kは土壌の種類による受食性を表し、斜面長約22m、傾斜9%、耕作された裸地の基準斜面で測定された年流出土砂量の値から算出される。この基準斜面ではC、L、S、Pの各係数は1.0の値をとるので、年間の降雨データから計算されるR値と測定される年侵食流亡土砂量のA値からK値を算出できる。今回の調査で三宅島の降灰堆積層のK値を測定できないため、年侵食流亡土砂量も算出できないが、他の係数を用いて以下に示すように、相対的に侵食量を評価することは可能である。

- 対象地域内では降雨状態と土壌状態は均一と見なし R 係数、K 係数は一定と仮定する。また、侵食防止のための対策はとられていなかったため保全係数 P は一定 (1.0) とする。
- 侵食量の相対的評価値: E を次式によってグリッドごとに算出する。

$$E = C \cdot S \cdot L$$

- S 値は次式で算出する。式中の傾斜度 θ はレーザー測量で得られた数値標高地図から計算する。

$$S = 65.41 \cdot \sin^2 \theta + 4.56 \cdot \sin \theta + 0.065$$

- L 値は次式で算出する。式中の斜面長 l は図1に示した流域別に面積をガリーの長さで割った値である。

$$L = (1/22.1)^{0.5}$$

- C 値は、現地水路侵食実験結果をもとに算出する。

降灰裸地を基準斜面 (b の添え字を付した) として、そのC値 (Cb) を1.0とすると他の斜面 (f の添え字を付した) のC値 (Cf) は次のように求められる。なお、Ab, Af, は現地水路侵食実験で得られた流出土砂量, Sb, Sf は傾斜度である。Lb, Lf は水路の長さであるが各実験とも約90cmであったので等しいとして処理した。

$$\text{降灰裸地: } Ab = Cb \cdot Sb \cdot Lb \cdot (R \cdot K \cdot P)$$

$$\text{他の斜面: } Af = Cf \cdot Sf \cdot Lf \cdot (R \cdot K \cdot P)$$

$$Ab/Af = (Cb \cdot Sb) / (Cf \cdot Sf)$$

$$Cf = (Af \cdot Sb) / (Ab \cdot Sf)$$

- グリッドごとに算出したE値は、傾斜10度、斜面長100m、C係数1.0の斜面 (比較基準斜面) と比較した場合の相対値に変換し、図化した。

4. 調査結果

4.1 森林被害区分調査結果

降灰による森林被害の程度によって、雄山林道より山頂側の調査地域を4区分した結果を図3に示した。

森林被害の最も激しい裸地化地域は火口の北東側と南西側に接する地域と南西側の牧場で形成され、合計193haになった。枯損した樹幹だけが残されている枯損1地域は、裸地化地域を取り囲むように北東側と南西側に分布している。北東側では地獄谷に沿って、雄山林道より下流側まで広がっている。面積は215haになった。枯損2地域と半枯損地域は火口の北西側と南東側に多い。北東側は枯損2地域が火口と接し、半枯損地域が最も広く分布するなど、森林被害は相対的に小さい地域であった。面積は枯損2地域が375ha、半枯損地域が476haであった。

4.2 面状侵食特性調査結果

現地水路侵食実験結果から、面状侵食に関する地表流の流速、浸透量、及び侵食土砂量、マニングの平均流速式で用いられる粗度係数について検討した。

4.2.1 地表流の流速

図4に実験斜面ごとの流速を示した。裸地化地域の地表面は火山灰層が硬く固結し、凹凸がなく、流速は最も早かった。枯損2地域も火山灰層で覆われているが、火山灰層中には落枝落葉が混入し地表面にも枯れた落ちた枝が多く散らばっており、流速を低下させる要因となっている。緑化試験地では外来草本が密に生育しており、流速は火山灰層の上にA₀層が

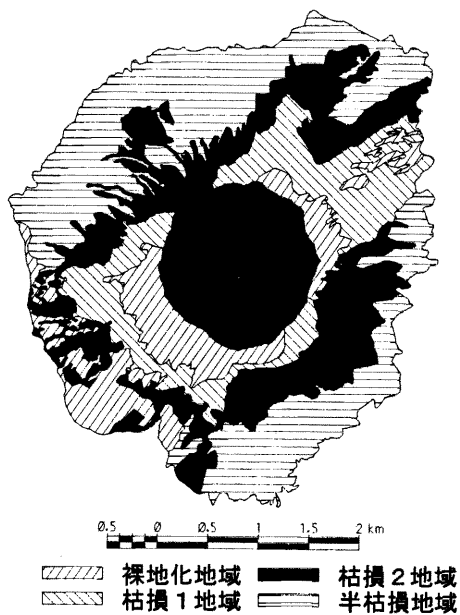


図-3 森林被害区分地域分布図

Fig.3 Map of forest damage divided into four classes.

堆積している半枯損地域とほぼ同じ値を示した。

図5はA₀層の乾燥重量と流速の関係を示しており、緑化試験地を除くと高い相関性が示される。緑化試験地では草本類が10~20cmの丈に密な状態で成長していたので、その地上部の乾燥重量を使って図5にプロットした。このような状態に草本が生育していれば、A₀層の乾燥重量で約1.0kg/m²に匹敵する流速低減効果が得られることになる。また、斜面勾配と流速の間には相関性は示されず、A₀層の量の方が流速に強い影響を与えることが示された。

4.2.2 地表流の浸透率

地表流の浸透率は水路への給水量と水路からの流出量の差を水路面積で割って1時間当たりの水高に換算した値である。図6に試験斜面ごとの浸透率を示した。半枯損地域の浸透率が最も高く50mm/hr以上になった。裸地化地域の浸透率が最も悪く3mm/hr以下で、降灰層が侵食されて地山が現れたリルや緑化試験地(リルの中で播種した草本が生育)の方が浸透率は高かった。A₀層の乾燥重量と浸透率の関係をみると、半枯損地域を除いた他の試験斜面の乾燥重量は0.26kg/m²以下と少なく、この場合相関性はみられず、火山灰層の密度や孔隙量などの浸透性に関わる要因も強く影響するものと思われる。

4.2.3 流出土砂量

単位流出土砂量は、現地水路侵食実験で採取した水路からの流出水に含まれている土砂の重量を測定し、1m²面積当たりからの流出土砂量に換算して求めた。図7に実験斜面ごとの単位流出土砂量を示すように、枯損2地域で最も多く、次

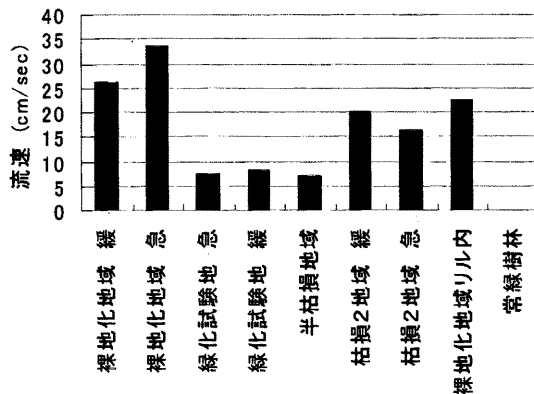


図-4 実験斜面ごとの流速

Fig.4 Velocity of the water flow on the experimental slope surface.

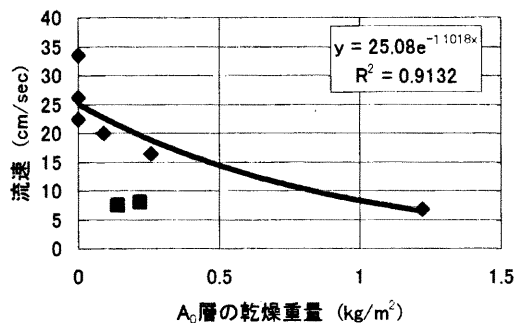


図-5 A₀層の乾燥重量と流速の関係

(■: 緑化試験地の値で草本の乾燥重量を示した。)

Fig.5 Influence of the humus layer on the water flow velocity.

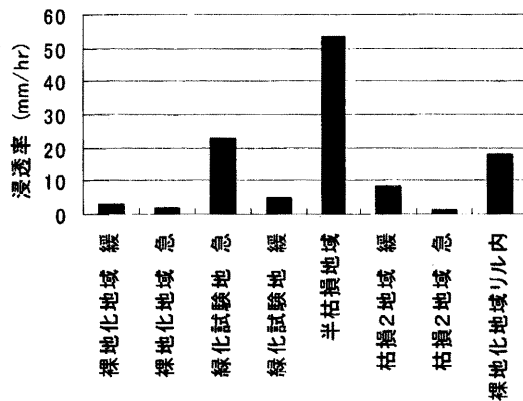


図-6 実験斜面ごとの浸透率

Fig.6 Infiltration rate for five different surface covers.

いで裸地化地域であった。半枯損地域と緑化試験地での単位流出土砂量は極めて僅かであり、緑化試験地に導入された草

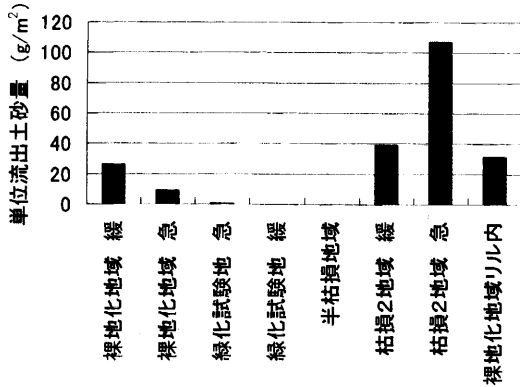


図-7 実験斜面ごとの単位流出土砂量

Fig.7 Sediment discharge from five different slopes.

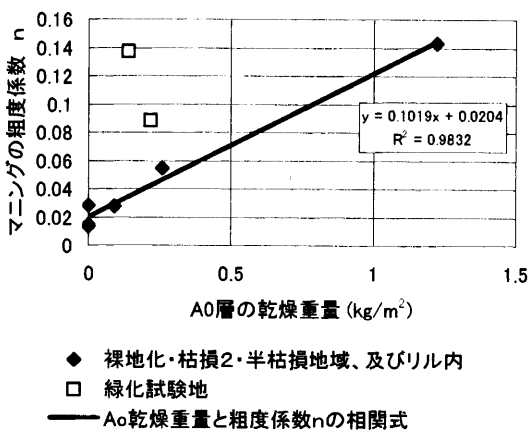


図-8 A0層の乾燥重量とマニングの粗度係数の関係

Fig.8 Influence of the humus layer on Manning's roughness.

表-2 現地水路実験から得たUSLEのC (作物管理) 係数
Table 2 Coefficient of C in USLE derived from the field flume erosion experiments

地被状況	単位流出土砂量 (g/m ²)	θ (°)	S係数	C係数
裸地化地域	8.815	18	7.72	1
緑化試験地急	0.2568	14	5	0.045
緑化試験地緩	0.0164	12	3.84	0.0038
半枯損地域	0.0529	16.5	6.64	0.007
枯損2地域緩	38.8849	15	5.63	6.0523
枯損2地域急	106.792	28	16.62	5.6267

本種と半枯損地域における落葉層が面状侵食防止に有効であることが示された。枯損2地域で流出土砂量が多いのは、裸地化地域と比較した場合に火山灰層の固結度が低く流水に対する耐侵食性が弱いためと考えられる。枯損2地域では火山灰層中に落枝落葉が多く含まれていて、これが火山灰層の固結を抑制しているためと推定できる。

4.3.4 マニングの粗度係数

現地水路侵食実験結果から、流水の平均流速を表すマニング式で用いられる粗度係数を求め、A0層の乾燥重量との関係を図8に示した。緑化試験地のデータを除くと高い相関性が認められる。A0層が無い裸地化地域と極めて少ない枯損2地域の粗度係数は0.02~0.04と非常に小さく、流速を抑える働きは小さい。半枯損地域の粗度係数は0.14まで増加するが一般的な林地と比較すると若干小さい傾向が見られた⁶⁾。

4.4 表面侵食危険度評価調査結果

現地水路侵食実験で得られたデータを用いて、USLEのC値 (作物管理係数) を求めたところ表2に示す結果を得た。

ここでは裸地化地域のC値を1.0に設定して他の地域のC値を算出した。現地水路侵食実験で流出土砂量の多かった枯損2地域のC値は約6.0に、半枯損地域と緑化試験地のC値は0.007~0.045と算出された。枯損2地域の侵食量は裸地化地域より6倍多くなると見込まれる。なお、実験を実施できなかった枯損1地域は枯損2地域のC値と同じ値を持つと仮定して、雄山林道より山頂側の全域を対象に10mグリッド単位で侵食危険度を求めた。

その結果を図9に示した。この図から、侵食量が多く見込まれる地域は火口の北東側から時計回りに南側にかけて分布している枯損1、及び枯損2地域であり、その山麓側に分布する半枯損地域での侵食量は非常に少ないと見込まれる。また、火口の南西側でも侵食量は比較的少ないと見込まれる。

5 考察

5.1 森林被害

上條⁵⁾は2001年2、3月に現地調査を行い森林の被害程度を裸地化部、倒伏・埋没部、全面落葉部、全面落葉部混交部の区分し植生被害図を作成した。この図も今回作成した森林被害分布図 (図3) が示すように火口に近いほど、また北東から南西方向に被害が大きかったといった傾向を表している。

この森林被害の分布は火山灰の降灰量分布 (東大火山研究所) とほぼ一致しており、森林地域への降灰の堆積が直接森林に被害を与えた原因と考えられる。現場の観測では、火山灰堆積厚さが約20cmのところでは、葉を落とし枯損したとみられる樹木が残っている森林被害区分の枯損2地域の状況がみられた。また、火山灰堆積厚さが10cm程度になると緑の葉を付けた樹木が多くみられ、被害の程度は比較的軽くなっていた。したがって、火山灰堆積厚さで約10~20cmのところには森林が生死に関わる境界があると考えられる。

5.2 面状侵食

現地水路実験結果から求めたUSLEのC値が示すように、被害の小さかった半枯損地域と森林がほぼ壊滅したとみられる枯損2地域を比較した場合、予想される侵食量の違いは0.007 : 6.052で、枯損2地域の方が約850倍多くなった。こ

れは、半枯損地域では数cmの火山灰層の堆積はみられるものの、下層植生の被害が少なく、調査を実施した2001年9月にはAo層が既に形成されていて、健全な森林が持つ表面侵食に対する抵抗性を維持しているためである。しかし、枯損2地域では火山灰層が林内の地表を一面に覆い、表面侵食に対する森林の抵抗性はほぼ消滅してしまった。

実験結果によると、枯損2地域が裸地化地域より表面侵食量が多く計測された。これは前述したように、火山灰層中に枝葉が含まれることが原因と考えている。つまり、枝葉が含まれても火山灰層の浸透率は低いので地表流は容易に発生するようにはなるが、火山灰だけで形成される一様に硬い地表面と比べると、不均一で比較的軟らかい部分もあり侵食に対する抵抗性が低いため、表面侵食量が多くなるものと考えられる。今回の調査で示したように、枯損1地域、枯損2地域は合わせると590haにも及ぶので、今後この地域における表面侵食の状況を注意深く監視していく必要がある。

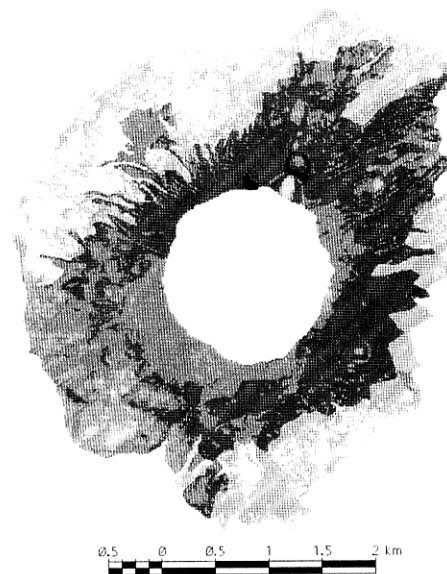
6. おわりに

本研究では森林の被害状況、泥流源になったとみられるリル侵食の分布状況、火山灰堆積層の表面侵食に対する特性等の実態を明らかにしてきた。近年、三宅島では多量の火山灰噴出を伴った活動がなかったため、本研究の成果は降灰後の山地の実態を明らかにした貴重な資料であり、今後の泥流対策・侵食防止対策等に活用できるものと考えている。なお、本調査を実施した時点では火山活動のために立入を制限した地域が多く、十分なデータ数が得られていない調査もあるので、本研究を継続してより詳細に、高精度に三宅島の実態を明らかにしていく予定である。

本研究は、平成13年度内閣府災害対策総合推進調整費において実施した。現地調査に当たっては、林野庁治山課、東京都林務課、東京都三宅支庁、三宅村の担当の方々にご協力をいただいた。また、国土交通省国土地理院からレーザースキャナー計測データ、1/5,000正射写真図の使用許可をいただき使用した。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- 1) 地頭園隆・下川悦郎・寺本行芳・永田治 (1996) 雲仙普賢岳周辺における火山灰の分布と浸透能, 砂防学会誌, 49(3) : 33-36.
- 2) 池谷浩 (1979) 有珠山周辺に発生した泥流災害について, 砂防学会誌, 31(3) : 31-33.



0 (105869)	100 (29557)
10 (25262)	150 (41239)
50 (7278)	200 (452)

斜面長100m、傾斜10°、C=1.0の比較基準斜面の侵食量に対する倍率

図-9 表面侵食の相対的危険性を表した地図

Fig. 9 Map of relative possibility for the sheet erosion.

- 3) 池谷浩・石川芳治 (1992) 平成3年雲仙普賢岳で発生した火砕流, 土石流災害, 砂防学会誌, 44(2) : 46-56.
- 4) 一色直也 (1960) 5万分の1地質図幅「三宅島」及び同説明書, 地質調査所.
- 5) 上條隆志 (2001) 三宅島噴火と植生, 生物科学, 53(2) : 82-87.
- 6) 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学的解明, 日林論, 104 : 747-750.
- 7) 下川悦郎・地頭園隆 (1987) 火山灰の被覆が火山帯の侵食速度に及ぼす影響, 地形, 8(4) : 269-286.
- 8) 寺嶋智巳, 田中永春, 白井知樹, 中井裕一郎, 北村兼三, 鈴木覚 (2001) 有珠山2000年噴火の噴出物が堆積した斜面における初期の地形変化, 地形, 22(5) : 857-872.
- 9) Wischmeier, W. H., and Smith, D.D. (1978) Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537, Washington, D. C., pp.58.
- 10) 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, 5(2) : 111-124.

(2000.6.30受理)