

◆ 報 文 ◆

火山活動の推移に伴う泥流発生規模の推定手法に関する研究

山越隆雄* 田方 智** 栗原淳一***

1. はじめに

火山噴火時には、噴火活動の推移に応じて、降灰範囲や厚さ、火山灰の特性などが変化するため、泥流の発生やその規模は経時的に変化すると考えられ、火山活動の推移に伴う流域特性の経時変化を考慮した泥流発生規模の予測手法に関する研究が必要とされている。

本研究は、平成13年から17年にかけて重点プロジェクト研究として実施した研究成果で、①降灰の影響による流域の降雨流出、土砂流出特性の変化を評価した泥流ハイドログラフ予測手法の検討と、②溪流の移動可能土砂量推定手法の検討を行い、これらの検討成果を総合して泥流の発生危険度と規模の予測手法を提案することを目的とした。

これまで、泥流発生規模や氾濫計算を行う上で必要な噴火後のハイドログラフを求める際には、合理式によりピーク流量を求める方法や、単位図法(中安等)により求めることが多かった。このような計算は簡便であり、緊急的な対応としては有効であるが、降灰による流出特性の変化の影響を考慮した泥流ハイドログラフにはなっておらず、噴火後の状況変化を反映したものになってはいない。したがって、降灰の影響による泥流の発生規模を予測するためには、流域における降雨に対する水と土砂の流出を物理的に追跡できる流出解析モデルが必要であると考えられる。本研究では、雨水の浸透・流下過程、表面流の発生・流下過程、斜面上および河道の土砂流出過程を物理的に追跡する分布型モデルを開発した。このモデルを用い、現地観測や現地の試料を用いた試験結果を基に各物性値を与えて解析を実施し、2000年の噴火後の三宅島における泥流ハイドログラフを算定した。

また、噴火後の斜面におけるガリーの形成は、雲仙普賢岳、有珠山、桜島などこれまでに噴火した火山においても調査されており、特に噴火後に流出する土砂の主な生産源となることが既往の研究でも報告されている^{1),2)}。本研究では、三宅島

において空中写真判読やレーザー測量結果を用いた解析を用い、噴火後のガリー形成の場所・規模・期間について整理し、移動可能土砂量を推定する方法を提案した。

2. 降灰の影響を考慮した泥流ハイドログラフ推定モデルの検討

2.1 解析モデルの概要

一般に、流出解析モデルは集中型と分布型に分けられる。集中型は従来から用いられている方法で計算が比較的容易であるという長所をもつが、降雨に対する流出量の応答関係から必ずしも物理的でないパラメータが決定されることが多い。特に火山噴火後の流域においては、噴火前と水文環境が大きく変化しているため、その適用精度が高いとは言い難い。一方、分布型モデルは計算が煩雑で時間がかかるといった短所をもつものの、近年では計算機の進歩によりその問題は解消されつつある。また、流域内の土壌や地質条件等の物理的な特性を組み込むことができるため、降灰の影響により場の特性が空間的・時間的に変化する噴

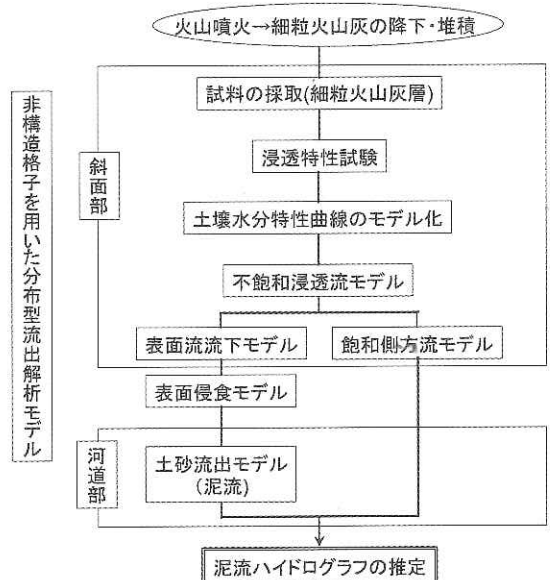


図-1 泥流ハイドログラフ推定モデルの概要

Study on the Estimation Method of the Potential of Lahar at the Volcanically Disturbed Watersheds

火後の火山においては非常に有効な手法であるといえる。そこで本研究では、図-1に示すような火山噴火により降下・堆積した火山灰の物性を考慮したモデルの検討を行った。

地形モデルについては、本研究で扱うような火山地域の地形は、過去の噴火による溶岩流や火砕流の流下に伴い、複雑な形状を示すため、より地形を詳細に表すことができる非構造格子を用いてモデル化した。

そして、流域を斜面部と河道部にわけて、それぞれの物理現象をモデル化した。斜面部は雨水の浸透現象と表面流の発生過程を境界条件の与え方に工夫を施した1次元不飽和浸透流で表現し³⁾、発生した表面流ならびに浸透した雨水の流下過程をKinematicWave法で追跡した。また、表面流の流下による斜面侵食は掃流砂量式と浮遊砂量式で求めている。河道部については、斜面部からの水と土砂を横流入として与え、1次元の不定流計算を用いた。流砂量として、芦田・道上式(掃流砂量式)およびItakura and Kishiの式(浮遊砂量式)を与えた。

2.2 解析結果

2.2.1 計算対象地の概要

上記までに説明した解析モデルを用い、2000年に大量の火山灰噴出を伴う噴火をした三宅島のカニガ沢流域を対象として計算を行った(図-2)。カニガ沢は三宅島の東側に位置しており、流域面積は約0.88km²、流路長は約3km、平均勾配1/5の流域である。2000年の噴火により、流域内に細粒火山灰が厚く堆積し、現在でも流域の上流側は火山灰に覆われたままである。

2.2.2 計算条件

対象地の地形モデルは、2001年9月作成のレー

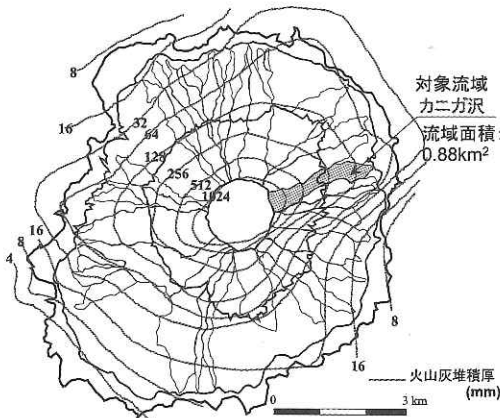


図-2 対象流域の概要

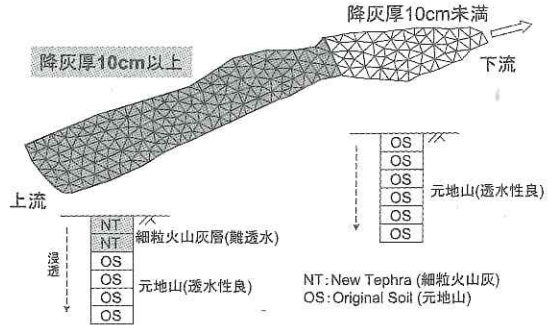


図-3 浸透特性を分布させたイメージ

表-1 計算条件一覧

表面流発生域 (火山灰層)		表面流非発生域 (元地山層)	
飽和透水係数 (cm/s) k_{s1}	Run1~3	飽和透水係数 (cm/s) k_{s2}	1.0×10^{-3}
飽和体積含水率 θ_s	0.491	飽和体積含水率 θ_s	0.43
最小水分容量 θ_r	0.281	最小水分容量 θ_r	0.045
van-Genuchten α	0.1835	van-Genuchten α	0.145
van-Genuchten n	1.6	van-Genuchten n	2.68

飽和透水係数 k_{s1}	粗度係数 (斜面部) n_s	0.1
Run1 1.0×10^{-4} (cm/s)	粗度係数 (河道部) n_b	0.022
Run2 2.0×10^{-4} (cm/s)	平均粒径 (河道部) D_{50}	3mm
Run3 1.0×10^{-5} (cm/s)		

ザープロファイラデータ(以下、「LPデータ」という。)を用いてメッシュ平均幅約30mの非構造格子で作成した。

また、本解析では図-3に示すように浸透特性の空間分布を考慮した。平面的には、難透水性であり表面流の発生に大きく影響する細粒火山灰層と、比較的透水性のよい元地山層を設定する。ここでは、現地観測結果およびこれまでの研究結果⁴⁾や各火山におけるハザードマップの検討により土石流やガリーの発生条件の目安とされている降灰厚10cmが表面流の発生に影響を及ぼす境界と仮定し、降灰厚10cm以上と以下の区域に分割した。また、降灰厚10cm以上の範囲では、鉛直方向にも細粒火山灰層と元地山層を想定して鉛直セルの浸透特性を分割した。

計算に用いた各種パラメータを表-1に示すが、細粒火山灰層の浸透パラメータについては、現地不攪乱試料を用いた土壌水分特性試験を行い、van-Genuchtenの式を用いて土壌水分特性曲線をモデル化して求めた。一方、元地山層については様々な材料で構成されており場の均一性がなく、一概に決めることはできないと考えられるため、ここでは、一般的な砂の浸透特性⁵⁾を参考に設定

した。粗度係数については、観測結果に基づき、斜面部は0.1、河道部は0.022とした。計算は、細粒火山灰の透水係数を変化させたRun1～Run3の3ケースで実施した。

2.2.3 計算結果

まず、水の流出計算を行い、観測結果との再現性を検討した。ここでは、2004年12月14日の降雨（連続雨量102mm）を与え、細粒火山灰の透水係数を変化させた3ケースの流域下流端における実測値と計算値のハイドログラフを比較したものを図-4に示す。Run1～Run3を比較すると、表面流の流量は細粒火山灰の透水係数に敏感に反応し、Run1の透水係数 $1.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ のケースでピーク流量が実測値とよく合う結果を示した。また、透水係数の変化により流出量が大きく変化しており、透水係数を適切に把握できれば、流出量を精度良く予測することが明らかとなった。

次に、土砂流出現象を考慮した計算を実施した。降雨の浸透や流下に関するパラメータは2004年12月14日の再現計算のRun1と同条件として、ここでは、台風による比較的大きな降雨があり、カニガ沢における流出土砂量が把握されている2002年8月19日の降雨を与えた。その結果、下流端における流出土砂量の総量は約500 m^3 と算定され、このときの流出土砂量は180 m^3 以上であったと報告されていることから⁶⁾、概ね良い結果であるといえる。

2.3 まとめ

火山灰の影響を考慮した泥流の規模を推定するために、流出解析モデルを開発し、三宅島を対象として解析を実施した。以下に、解析結果のまとめを記す。

- 1) 三宅島の流域に堆積した細粒火山灰層の浸透特性試験結果をパラメータとして計算した結果、実測値と良く適合する結果を得た。
- 2) 2002年の台風に伴う降雨を対象に土砂流出計

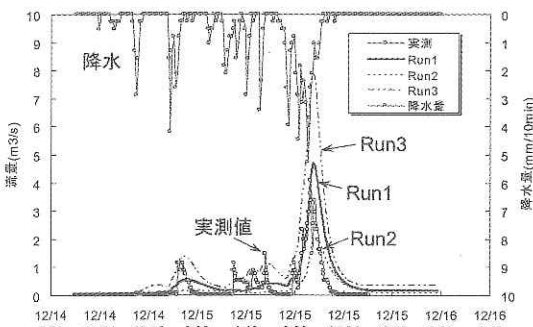


図-4 水の流出の再現計算結果

算を実施した結果、これまで報告されている流出土砂量と概ね合う結果を得た。

3. 移動可能土砂推定手法の検討

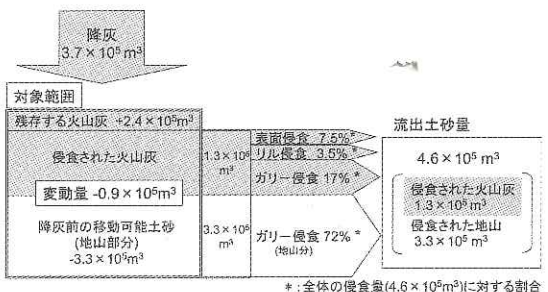
2000年に噴火した三宅島において、各侵食形態別の流出土砂量を見積り、どの形態による侵食が卓越しているかを把握した。このうち、主な生産源となるガリーの形成特性について検討をおこない、移動可能土砂量を推定する際に課題であり、これまで不明な点が多かったガリーの形成場所・規模・期間について整理した。

3.1 各侵食形態による土砂生産量

まず、噴火後の火山においてどの侵食形態が卓越するかを把握するために、表面侵食、リル侵食（降雨時の雨水流により斜面に生じる縦方向の浅い溝）、ガリー侵食（リルがさらに発達することでできる溝状侵食で、急傾斜の側壁をもつ）による生産土砂量の概算の検討をおこなった。リルとガリーについては必ずしも明確に区分されていないが、本研究では、斜面上に形成され侵食深が50cm程度で元地表まで達していないものをリルとし、複数のリルが集中し、主に谷地形に沿って発達しており侵食深が1m以上となり元地表まで達しているものをガリーとして区分した。三宅島東側に位置するカニガ沢の上流域0.39 km^2 を対象に、ガリー侵食量はLPデータを用いた解析、リル侵食ならびに表面侵食量は現地調査にて算定した。

ガリー侵食量の算定は、噴火直後の2000年7月と噴火から11ヶ月後の2001年6月のLPデータを用い、2時期の標高データの差分をとることで地形変化量を算出し、侵食量とした。その結果、対象範囲におけるこの期間中の侵食量は $4.1 \times 10^5 \text{m}^3$ と見積もられた。

リル侵食量の算定は、現地調査により横断形状とリル長、単位面積あたりのリル本数を計測することで単位面積あたりのリル侵食量とした。その



*: 全体の侵食量($4.6 \times 10^5 \text{m}^3$)に対する割合

図-5 対象範囲における噴火後1年間の土砂収支図

量にリルが発生している面積を乗じることで対象範囲のリル侵食量となる。なお、現地調査を実施したのが2004年4月であるので、噴火した2000年7月から2004年4月までのリル侵食量を求めていることになり、 $1.6 \times 10^4 \text{m}^3$ と見積もられた。

表面侵食量の算定は、現地にて火山灰堆積層を地表面から垂直に掘削し、堆積している火山灰の厚さを直接計測する方法とした。ここで、尾根部などの平坦面は全く侵食されていないものと仮定し、これと計測箇所における堆積深との差を侵食深とした。なお、表面侵食についてもリル侵食と同様、噴火から2004年4月までの侵食深を表している。その結果、 $3.4 \times 10^4 \text{m}^3$ と見積もられた。

ここで、ガリー侵食量は約1年間のものを示しているのに対し、表面侵食及びリル侵食は噴火後約4年間の値であり、各侵食量を算出している期間が異なる。ここでは、リル侵食および表面侵食量を多く見積もることになるが、表面侵食およびリル侵食量が初めの1年間で発生したと想定し、噴火後1年間での侵食量割合を比較した。表面侵食およびリル侵食を極端に多く見積もっているにも関わらず、ガリー侵食が89%と大部分を占めており、噴火後の三宅島における数年間の侵食形態としてガリー侵食が量的に卓越していることがわかる。有珠山などでもガリー侵食が卓越することが報告されており²⁾、三宅島でも同様の傾向を示していることがわかった。

また、現地におけるガリー侵食の状況の観察により、2000年噴火に伴って降下・堆積した火山灰のみならず、その下層の地山層を侵食していることが明らかとなった。そこで、2000年噴火による新規火山灰と古い火砕物やスコリアなどで構成される元々の地山分がどのような割合で侵食されたかを調べたところ、ガリー侵食では侵食量のおよそ80%が地山層を侵食しているという結果を得た。これらの結果から、2000年噴火後の主な土砂生産源は地山分のガリーによる侵食であったといえる。これは、火山灰が堆積することにより浸透能が著しく低下した斜面では、降雨時に表面流が発生して谷部に集中する。そして、谷部に集中した流れによる侵食営力に伴

い、ガリー侵食が進む。一旦、流路が固定されると、流水はその部分に集中するために急激に縦侵食が進行する。これにより、谷部に堆積した火山灰層のみならず、地山分を大幅に侵食したというメカニズムが考えられる。地山層が脆弱で侵食されやすい場合に生じる現象と考えられるが、火山灰だけでなく地山層も相当に侵食されることが特筆される。図-5に上記までの結果を整理し、2000年噴火後1年間の土砂収支図を示す。灰色部分が2000年噴火による火山灰を表している。対象範囲に降下・堆積した火山灰量は約 $3.7 \times 10^5 \text{m}^3$ と見積もられる。この範囲より各侵食形態によって流出した量はガリー侵食 $4.1 \times 10^5 \text{m}^3$ 、リル侵食 $1.6 \times 10^4 \text{m}^3$ 、表面侵食 $3.4 \times 10^4 \text{m}^3$ と算定され、総流出土砂量は $4.6 \times 10^5 \text{m}^3$ と見積もられた。

3.2 ガリー形成場所と形状の特徴（場所と規模の検討）

上記の検討で、噴火後の侵食形態としてガリー侵食が卓越することが確認された。ここでは、そのガリー侵食の特徴について検討した。

三宅島上部斜面に同心円を描き、その円周に沿って地形断面とガリー幅を示したものを図-6に示す。噴火前の地形で凹地形を呈した場所にガリーのほとんどが形成されていることがわかる。すなわち、三宅島上部斜面のガリーは噴火前に谷地形を呈していた場所に形成されたといえる。

また、この時点のガリー形状は北西～東側の斜面では太いガリーが疎に形成されているのに対し、西～南斜面には細いガリーが密に形成されている。北西～東側斜面は100～500mおきに谷と尾根が繰り返す断面形状を呈するが、西～南側斜面では高まりを一つもつだけの緩やかな起伏と、数十m程度の間隔で谷と尾根が繰り返す起伏を重ね合わ

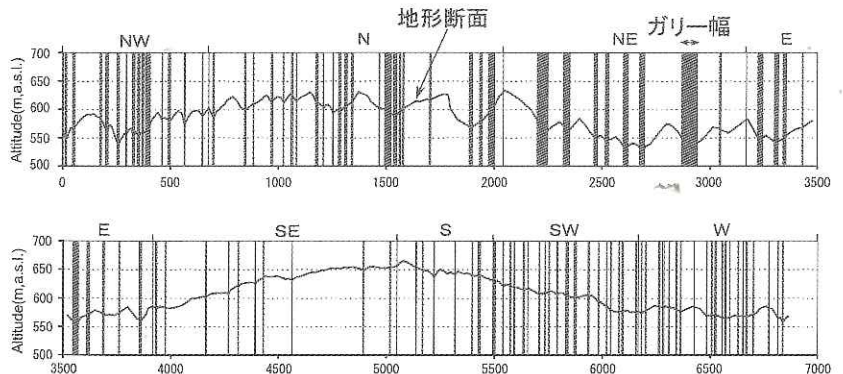


図-6 三宅島上部斜面の地形断面と2001年6月時点のガリー形成状況
(横軸：地形断面をとる円周上における西斜面と北西斜面の境界から時計回りに積算した距離 (m)、縦軸：地形断面の標高 (m)、図中の縦線はガリーの位置と幅を表す)

せたような断面形状を有している。この地形的な特性がガリーの形状や幅の違いに影響していると考えられる。

図-7にガリー集水面積とガリー幅の関係を示す。この図によると、集水面積とガリー幅の間には正の相関がみられる。ここでは、火口から約1kmの同心円を描き、その上流側の集水面積を読みとっているため、集水域の長さほどの溪流もほぼ同じであると考えられ、集水面積の大小は谷地形の幅の大小とほぼ比例するため、幅が広い谷地形に幅の広いガリーが形成されているといえる。

ガリー侵食の規模は概ねガリー幅と深さで決まる。そこで、次にガリーの深さについて検討を加えた。カニガ沢上流域におけるガリー侵食深は5m～20m程度に及ぶが、現在のカニガ沢の溪床には強固な溶岩層が露出している。ガリーによる縦侵食はこの層で規制されていると考えられ、噴火後のガリーによってこの層の上部に存在していた地山層が削られたものと推測される。すなわち、このような強固な層が露出するまではガリーによる縦侵食が進行する可能性があると考えられる。このように、縦侵食が規制される層を把握することで、ガリー侵食深の推定が可能となるものといえる。

以上のとおり、噴火後の三宅島を対象に解析を行った結果、山腹斜面におけるガリーの形成箇所は噴火前の谷地形と相関性が高く、規模はその谷地形の幅が大きいほど大きいことが示された。

3.3 ガリー形成推移（期間の推定）

図-8に上部斜面におけるガリー面積割合（火口外周円より500m半径より上流部に占めるガリーの面積）の時系列的な推移と雨量を示す。ガリー面積率は、時期Ⅰで5%程度、時期Ⅱで10%程度に達し、時期Ⅲではほとんど増加していない。この時期の降雨量をみると、時期Ⅰでは降雨量が格段に少なかったにもかかわらず、ガリー侵食の進行が顕著であったことがわかる。

Chinen & Kadomuraは、1977年8月～1978年

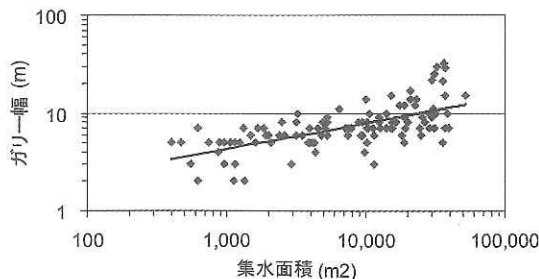


図-7 三宅島上部斜面におけるガリー幅と集水面積の関係（2001年6月）

9月にかけて噴火した北海道有珠山の第4火口側壁斜面におけるガリーの形成特性について報告している²⁾。それによると、噴火終了後に同斜面下流端に形成され始めた主ガリーは、拡幅を伴いつつ上流へと伸長し、その流路網は1979年9月の時点でほぼ完成したが、ガリーの拡幅はその後も治山工事が始まる1982年まで継続したとしている。また、寺本らは、雲仙普賢岳湯江川流域および水無川流域で噴火後の流域に占めるガリー面積の割合の経年変化を追跡しており、噴火から3年間はガリー面積が増加し、その後は増加割合が減少することを報告している^{7),8)}。三宅島においても噴火後に形成されたガリーは、流路網が完成した後も拡幅がしばらく続くという点で、有珠山の例と共通しているが、ガリーの発達速度という点では有珠山や雲仙普賢岳と大きく異なっており、非常に短期間でガリーの形成が終息したという特徴がある。火山噴火を経た流域において、流出土砂量が経年的に変化する理由として、流域の水文環境の変化や不安定な土砂の減少が挙げられるが⁹⁾、両火山と三宅島で発達速度が異なる点については、

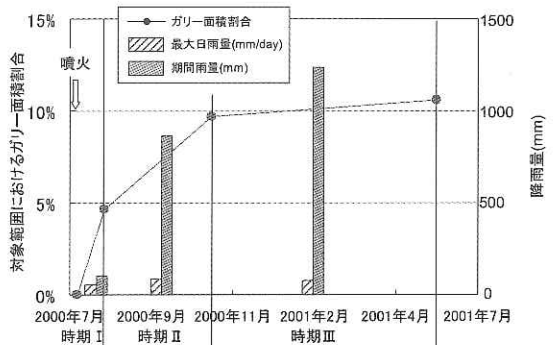


図-8 三宅島上部斜面におけるガリー面積割合の推移

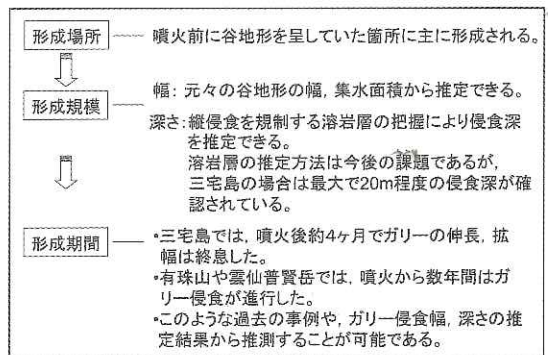


図-9 三宅島のガリー形成特性をふまえた移動可能土砂量の推定法

地形や噴火形態、気象条件など多くが異なるため不明であり、今後の課題である。

以上のような三宅島のガリー形成特性をふまえた移動可能土砂量の推定法について図-9に整理した。

3.4 まとめ

三宅島において、噴火後の侵食実態を調査し、以下の知見が得られた。

- 1) 噴火後数年間の侵食形態としては、ガリー侵食が卓越し、侵食量の約90%を占める。
- 2) 三宅島では一旦流路が固定されたガリーは縦方向への侵食が進み、新規に堆積した火山灰のみならず下層の地山部を侵食し、強固な溶岩層まで達すると侵食は抑えられる。三宅島カニガ沢の場合、ガリー侵食量全体のおよそ80%が元地山分であった。
- 3) ガリーは噴火前の地形図で谷地形とみられる場所に形成されており、ガリーの幅は元地形の谷幅に規定されていること、集水面積と相関がみられることが明らかとなった。
- 4) 三宅島の場合、噴火後約4ヶ月でガリーの伸長、拡幅は終息した。
- 5) ガリー侵食深の推定や発達速度の支配的な要因などは今後の課題である。

4. おわりに

本研究では、火山活動の推移に伴う泥流の発生規模の予測手法を提案することを目的とし、①降灰の影響を評価した泥流ハイドログラフ予測手法の検討、②溪流の移動可能土砂量推定手法の検討を実施した。主に、2000年に噴火した三宅島を対象として、噴火後の流域で支配的な Horton 型表面流の発生に着目した総合的な流出解析モデルを構築した。そして、そのモデルにより、現地観測データを精度良く再現することができた。また、空中写真判読やLPデータを用いた解析により、噴

火後の主な土砂生産源であるガリー侵食の形成特性を検討し、移動可能土砂量の推定手法を整理した。今後は、三宅島のみならず他火山における適用性の検討を進め、今後の火山噴火時にこれらの知見や解析モデルを総合的に活用していきたい。

参考文献

- 1) 池谷 浩・米沢谷誠悦：有珠山西山川流域における土砂移動について、砂防学会誌, Vol.32, No.2, pp.22-27, 1979
- 2) Chinen, T. and Kadomura : Post-eruption sediment budget of a small catchment on Mt. Usu, Hokkaido, Z.Geomorph, N. F., Suppl.-B.d.60, pp.217-232, 1986
- 3) 若林栄一・山越隆雄・笹原克夫・西本晴男・小山内信智・石田哲也・竹島秀大：三宅島新規細粒火山灰堆積地における雨水浸透モデル、平成16年度砂防学会研究発表会概要集, pp.466-467, 2004
- 4) 平川泰之・安養寺信夫・鈴木 崇・今野雄悟：三宅島の噴火後の二次泥流発生条件、平成14年度砂防学会研究発表会概要集, pp.16-17, 2002
- 5) (社)地盤工学会編：不飽和地盤の挙動と評価, p.37, 2004
- 6) 峰岸正孝・村上 治・松井宗広・安養寺信夫・脇山勘治：2002年における三宅島の泥流発生状況と発生雨量について、平成15年度砂防学会研究発表会概要集, pp.342-343, 2003
- 7) 寺本行芳・下川悦郎・地頭蘭隆：雲仙普賢岳水無川流域における土石流の流出過程の経年変化、砂防学会誌, Vol.56, No.3, pp.3-11, 2003
- 8) 寺本行芳・下川悦郎・地頭蘭隆：雲仙普賢岳湯江川流域における侵食および土砂流出過程、砂防学会誌, Vol.57, No.4, pp.15-25, 2004
- 9) 寺本行芳・地頭蘭隆・下川悦郎・安養寺信夫：雲仙水無川流域における流出土砂量の経年変化、砂防学会誌, Vol.50, No.3, pp.35-39, 1997

山越隆雄*



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所土砂管理研究グループ
火山・土石流チーム主任研究員、農博
Dr. Takao YAMAKOSHI

田方 智**



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所土砂管理研究グループ
火山・土石流チーム交流研究員
Satoshi TAGATA

栗原淳一***



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所土砂管理研究グループ
火山・土石流チーム上席研究員
Junnichi KURIHARA