

②-2 火山噴火に起因した土砂災害に対する緊急減災対策に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：土砂管理研究グループ
（火山・土石流）

研究担当者：石塚忠範、山越隆雄、武澤永純、
清水武志

【要旨】

2011年1月に霧島山（新燃岳）が噴火する等、我が国は活発に噴火を繰り返す活火山を多く有する火山国であり、降灰等の後の土石流、火砕流、火山泥流等火山噴火に起因した土砂災害に対する緊急減災対策に関する研究が必要とされている。2012年度は、降灰等の後の土石流への緊急調査手法の高度化を目的として、①土石流ハイドログラフ推定手法の検討と、②短期的な降灰量の変化と土石流発生降雨量の関係の検討を進めた。その結果、①については、今なお噴火中の桜島において土砂を高濃度に含む土石流の高精度観測に成功するとともに、その結果を踏まえ、従来の土石流ハイドログラフ推定手法の適用可能範囲が明らかになるとともに、ピーク流量については、新たな推定手法の開発が必要であることが示された。一方、②については、2012年度の観測結果からは、短期的降灰量の変化と土石流発生に強くかかわる表面流の発生特性の間には明瞭な相関関係は認められなかった。
キーワード：土石流、火砕流、融雪型火山泥流、桜島、土石流ハイドログラフ、短期降灰量、土石流発生雨量、表面流

1. はじめに

2011年1月に霧島山（新燃岳）が噴火する等、我が国は活発に噴火を繰り返す活火山を多く有する火山国であり、火山噴火により引き起こされる様々な現象による土砂災害の脅威に晒されている。火山噴火に起因した土砂災害対策は、火山噴火の前兆が現れてから対応に充当できる時間が限られていることから、即時に状況を把握し、最適な判断をしなければ効果を上げることは難しい。そのため、緊急時の危機管理手法については、時間と精度のバランスを加味した被害範囲推定手法等の開発が必要である。2007年以降、全国の火山において火山噴火緊急減災対策砂防計画の検討が進められているが、実際の噴火に対してより円滑な緊急減災対策が実施可能となるよう、緊急時に実施する調査手法の更なる高度化が求められている。

そこで、本研究は、火山噴火に起因した土砂災害の緊急減災対策を実現するため、以下の達成目標を掲げて実施するものである。なお、火山噴火に起因した土砂災害現象には様々な種類の現象があるが、その中でも火砕流と火山泥流、そして、土石流は、人的被害を生じやすい現象であり、これら3現象を本研究では対象とする。

①火山灰・火砕流堆積後の土石流の緊急減災のための緊急

調査マニュアルの作成

②火砕流の緊急減災のための緊急調査マニュアルの作成
③火山泥流の緊急減災のための緊急調査マニュアルの作成

2012年度は、これらの内、①の目標に関連して、以下について研究を進めた。

- ・泥水密度の変化を考慮した土石流ハイドロ推定技術の検討
 - ・短期的な降灰量と土石流発生降雨量の関係検討
- 以下、それぞれの項目について第2章、第3章で報告する。

2. 土石流のハイドログラフについて

2.1 背景と概要

2001-2005年度に実施したプロジェクト研究（当時は重点プロジェクト研究）「火山活動の推移に伴う泥流発生危険度評価と規模の予測手法に関する研究」では、2000年に噴火した三宅島において降雨時に発生する表面流や溪流の出水の現地観測が実施された。その結果を踏まえ、降灰によって浸透を阻害された斜面から表面流が発生し、それが集中してハイドログラフが形成されるという考え方に基づきハイドログラフの

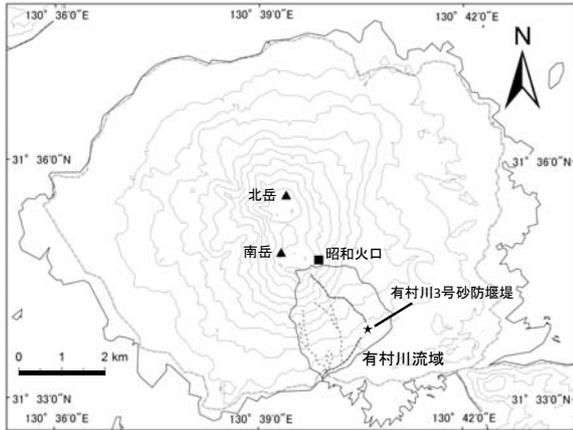


図1 桜島有村川流域

推定手法が提案された¹⁾。しかし、観測が開始された2002年時点では、降雨時には土砂を高濃度に含むような典型的な土石流は発生しておらず、そのような高濃度に土砂を含む流れについて、その検証が十分になされていなかった。

そこで、本研究では、昭和火口での噴火活動が活発になって以来、大量に火山灰が堆積しつつある桜島有

村川において、我が国で初めて、土石流の土砂濃度を連続観測に成功する等、降灰後の流域で降雨時に発生する土石流の高精度なハイドログラフを観測した²⁾。本節では、2012年に得られた結果に基づいて、2005年に提案したハイドログラフ推定手法の検証した結果について、報告するものである。

2.2 研究方法

有村川で発生する土石流の流量、流砂量については、土石流荷重計²⁾、測域センサー³⁾、ビデオ観測によって10秒単位で観測した値を用いるとともに、上流域の雨量については、XバンドMPレーダーによる流域平均の1分間雨量を用いた。また、流出解析時に有効降雨を与えるために必要な損失雨量については、有村川流域の代表的な降灰斜面に小規模な(約1.8m²)試験斜面を設置して降雨時の表面流等を観測することによって得られた損失雨量強度を用いた⁴⁾。地形解析には、平成24年11月に実施した航空レーザー測量結果と、平成23年11月に実施したレーザー測量結果の差分計算結果を用いた。

2.3 結果

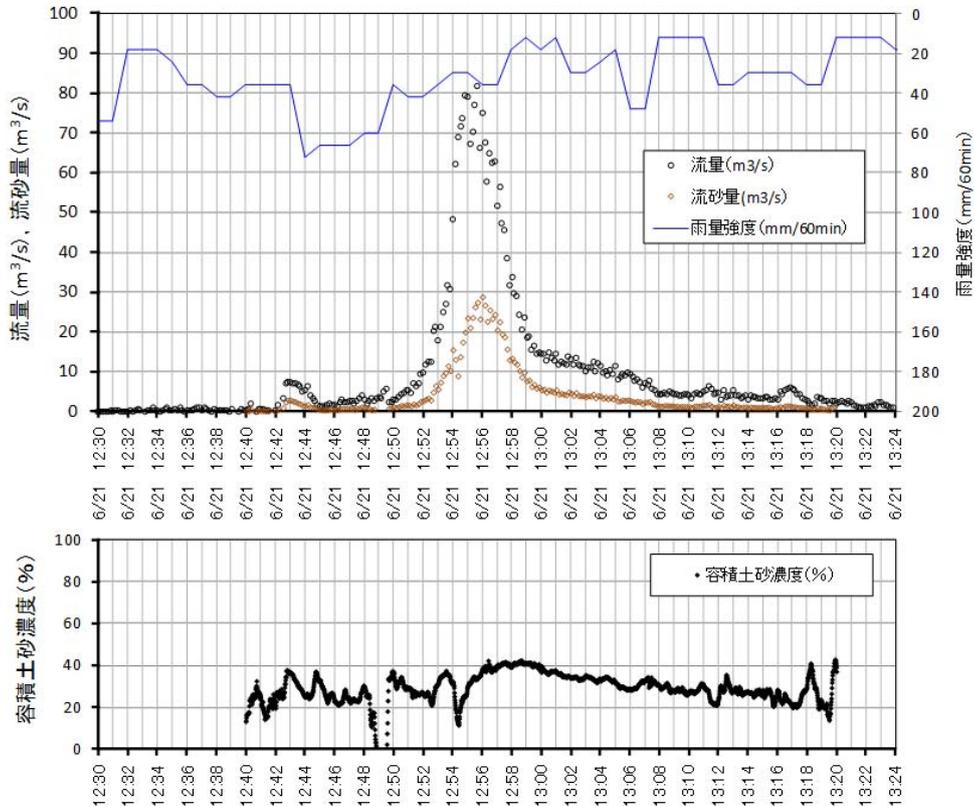


図2 2012年6月21日に観測されたハイドログラフ

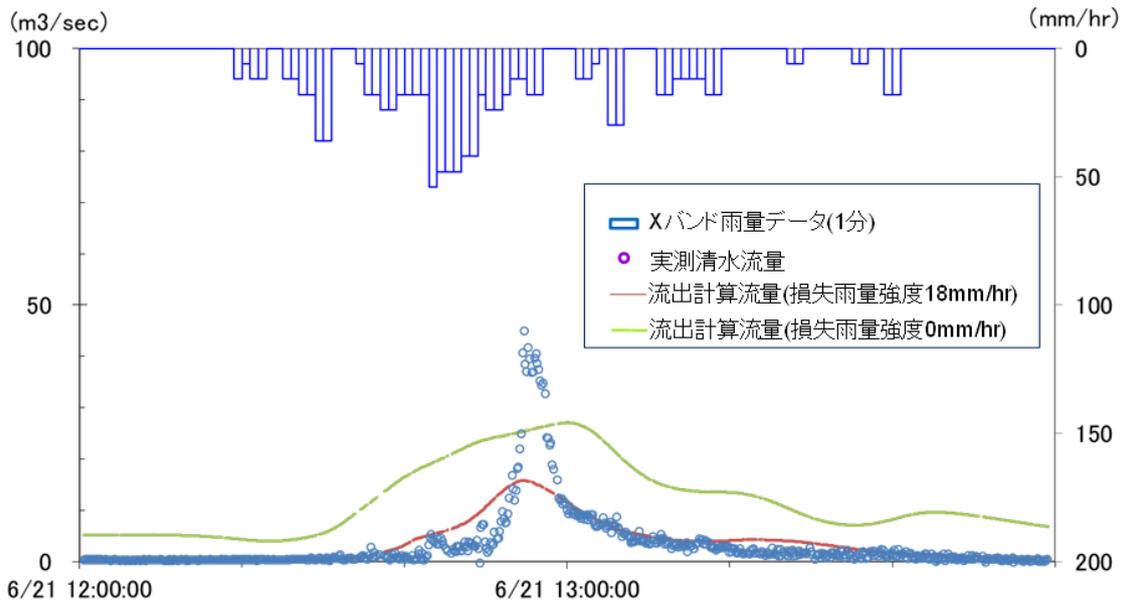


図3 流出計算結果

図-1 に、2012 年 6 月 21 日に発生した土石流のハイドログラフを示す。ピーク流量は $80\text{m}^3/\text{s}$ であり、容積土砂濃度は約 40% である。この結果から、清水のハイドログラフを作成した (図-2)。一方、同日の降雨時の表面流の発生状況から、 $3\text{mm}/10\text{min}$ を超えると表面流が発生していることがわかることから⁴⁾、損失雨量強度を $18\text{mm}/\text{hr}$ として、X バンド MP レーダーの流域平均 1 分間雨量から有効降雨を求めてキネマティックウェーブ法で流量を計算によって求め、図-2 にあわせて示した。その結果、一連の降雨流出イベント、清水の流出総量はほぼ適合するが、12 時 55 分を中心とするピーク流量近傍の 20 分間については、大きく異なる結果となった。図-1 に、2012 年 6 月 21 日に発生した土石流のハイドログラフを示す。ピーク流量は $80\text{m}^3/\text{s}$ であり、容積土砂濃度は約 40% である。この結果から、清水のハイドログラフを作成した (図-2)。一方、同日の降雨時の表面流の発生状況から、 $3\text{mm}/10\text{min}$ を超えると表面流が発生していることがわかることから⁴⁾、損失雨量強度を $18\text{mm}/\text{hr}$ として、X バンド MP レーダーの流域平均 1 分間雨量から有効降雨を求めてキネマティックウェーブ法で流量を計算によって求め、図-2 にあわせて示した。その結果、一連の降雨流出イベント、清水の流出総量はほぼ適合するが、12 時 55 分を中心とするピーク流量近傍の 20 分間については、大きく異なる結果となった。

2. 4 考察とまとめ

降灰斜面で観測された表面流の発生状況から推定され

た損失雨量強度を用いて計算した結果は、土石流全体の清水流出総量およびピーク近傍を除くハイドログラフ全体について概ねよく適合しており、栗原ほか(2005)の手法が、高い土砂濃度をもつ典型的な土石流においても、総量や後続流の流量を推定する上で、高い適用可能性を有していることが示された。

しかし、一方で、ピーク近傍の流量が過小評価される問題が明らかになった。ピークを過小評価するということが、仮に損失雨量強度をゼロとした場合のハイドログラフを計算したところ (図 3)、それでもまだピーク流量を再現できないばかりか、ハイドログラフ全体的に全く実測に合わない結果が得られる結果となった。このピーク流量近傍の実測ハイドログラフの形状は、単なる降雨流出計算では再現は不可能である。別の原因を考える必要がある。

宮田ほか(2012) は、短時間河道閉塞の発生によって、山地溪流においてピーク流量が増大した事例について検討結果を報告している。図-2 に示すピーク近傍では、実測ハイドログラフはピークの直前・直後には大きく計算を上回っているが、その前の 10 分程度の間は、逆に計算結果が実測を上回っている。両者は量的に釣り合っているように見えることから、一つの仮説として宮田ほか(2011) が言うような河道閉塞が短時間発生して決壊した可能性が考えられる。航空レーザー測量データから、実測ハイドログラフと計算ハイドログラフの差分に相当する量の水 (約 4800m^3) が河道閉塞で貯水されるため

に必要な閉塞の高さを検討すると、一つの河道閉塞のみで貯水すると考えた場合おおよそ8~11mの高さが必要となった。有村川の上流域は活発な火山活動の影響範囲のため、詳細な現地調査を行うことができないことから、そのような河道閉塞形成の有無を確認することができない。小田ほか(2010)は、土砂等が河道を閉塞し、ほぼ瞬間的に決壊するというプロセスによってピーク流量が閉塞前よりも増大することを指摘している。栗原ほか(2007)は、鉄砲水災害の現地調査を通じてそのようなプロセスが繰り返す内に、ピーク流量が大きくなった可能性について言及している。有村川で実施した2012年の観測では、降雨データからの流出計算では再現できないハイドログラフが他にも得られている。このようなプロセスも有村川でピーク流量が増大する有力なメカニズムであると考えられる。

今後は、このような異常に大きなピークがどのような場合に得られるか、観測を通じて明らかにするとともに、そのピークの推定方法について検討を進める予定である。

3. 桜島における短期的降灰量と土石流発生降雨量の関係

3.1 背景と目的

活発な火山活動に伴う噴火により降灰が続く流域においては、降灰が多くなると累加雨量や降雨強度が小さい降雨でも土石流が発生しやすくなることが指摘されている^{8),9),10)}。そのため、短期的な降灰量と土石流発生降雨量の関係を明らかにすることは、活火山流域における土石流の発生時期や発生規模を精度良く推定するための重要な課題のひとつと言える。



写真1 観測斜面 (2012/2/15撮影)

本研究では、土石流の発生に影響すると考えられる斜面からの表面流量の観測を桜島の火山灰堆積斜面において行った。観測斜面における表面流出が発生する降雨と土石流発生降雨との関連性を調査するとともに、それを

踏まえて短期的な降灰量の違いが土石流発生降雨量に与える影響について把握することを目的とした。

3.2 研究の方法

観測斜面は2006年以降、噴火活動が活発化している昭和火口の概ね南~南東側に位置する有村川流域(流域面積3.88km²)内の昭和溶岩上の集水面積約1.8m²、傾斜は

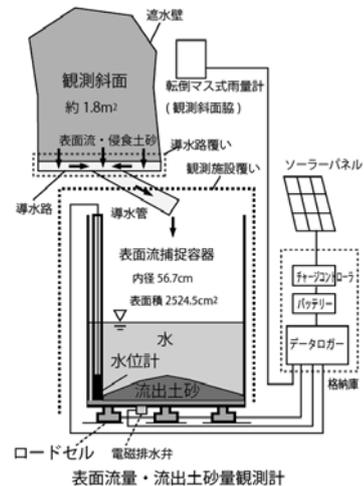


図4 観測システムの概要

約12°の火山灰堆積斜面である(図1,写真1)。

観測システムの概要を図4に示す。斜面下流側に表面流水および流出土砂を捕捉するための容器(ドラム缶、内径56.7cm、水平断面積2524.5cm²)があり、容器内に設置された水位計(計測誤差±1mm)により、容器内の水位が計測される。また、容器はロードセル3基によりその全体を支持されており、容器内の水と土砂の合計重量が計測される。土粒子密度を仮定することで式(1)、(2)により容器内の土砂と水の量が求まる。

$$W_s = (W - S \cdot D \cdot \rho_w) / (1 - \rho_w / \rho_s) \quad \dots(1)$$

$$W_w = W - W_s \quad \dots(2)$$

ここで、 W_s :土砂量(g)、 W :火山灰と水の合計重量(g)、 S :容器の有効断面積(=2524.5cm²)、 D :水位(cm)、 ρ_w :水の密度(=1.0g/cm³)、 ρ_s :火山灰の密度(2.703g/cm³)、である。式(1)、(2)の成立は容器内の土砂が水面から露出してないことが必要条件である。水位と重量の計測間隔は10分で、計測値はデータロガーに記録される。降雨時に発生する表面流量(水と土砂の合計体積)が10分間隔の水位計の計測値の増加分により計測される。また、前述の式(1)、(2)により表面流量、流出土砂量が求まる。観測斜面脇の転倒マス式雨量計により降雨が60分間観測されない場合は降雨終了とみなされ、所定の水位になるまで自動排水される仕組みとなっており、連続

計測が可能である。容器内に堆積した土砂は定期的に全量を回収し、その炉乾燥質量を求めた。

3.3 研究の結果

3.3.1 有村川における降灰量と土石流発生状況

同観測斜面付近に自動降灰量・降雨量計（大隅河川国道事務所所管）では2012年2月中旬から5月末までの期間（①）に約27kg/m²、6月から9月下旬までの期間（②）には約3kg/m²の降灰量が観測されている。それぞれ日当たりに換算すると約0.35kg/m²/日、約0.03kg/m²/日となり、本検討では①の期間を降灰が多い期間、②の期間を降灰が少ない期間とした。また、同事務所の報告⁴⁾によると有村川1号堰堤に設置しているワイヤセンサーにより、2012年3月23日、4月3日、4月11日、6月15日、6月21日、7月7日、7月12日、8月1日、8月23日に土石流の発生が検知されている。

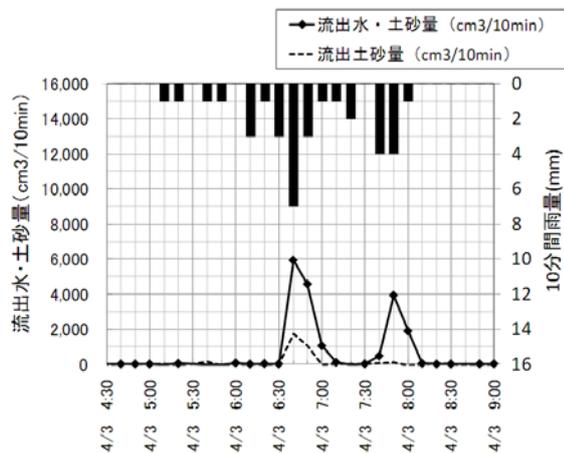


図5 表面流量の観測結果の例

3.3.2 表面流の観測結果

対象期間中に観測斜面より南東900mに位置する有村川テレメータ雨量計（大隅河川国道事務所所管）により観測された降雨（60分間無降雨でリセット）において、表面流の発生が観測された降雨は23事例あった。表面流の発生は水位上昇が1mm（約250cm³に相当）以上あった場合と定義した。表面流量と流出土砂量の観測結果の一例を図5に示す。また、図6に各降雨イベントの総雨量と観測された表面流量（水・土砂合計）の累積値、流出土砂量の累積値、土石流発生降雨を示す。なお、残念ながら本報告の観測対象期間を通じて一部のロードセルが計測異常を生じたため、水と土砂の合計重量Wの正確な計測ができなかった。今回は、式(1)、(2)に与える重量Wとして正常なロードセル1基の計測重量に係数を乗じた値を用いている。この係数は、土砂回収直前における正常なロードセルの計測値に乗じて計算される土砂量Wsが回収土砂の炉乾燥質量と一致するように逆算しており、土砂回収で区切られた期間毎に異なる係数を与えている。

3.4 考察

3.4.1 観測斜面における表面流の発生と土石流の発生との関係

有村川において土石流の発生が検知された降雨事例全てにおいて、観測斜面で表面流の発生が観測されている（図6）。また、いずれの事例も表面流の発生量が比較的大きいものであった。観測斜面が有村川の流域斜面を代表しているわけではないが、この結果から有村川での土石流の発生には流域斜面からの表面流の発生が強く影響していた可能性が示唆される。

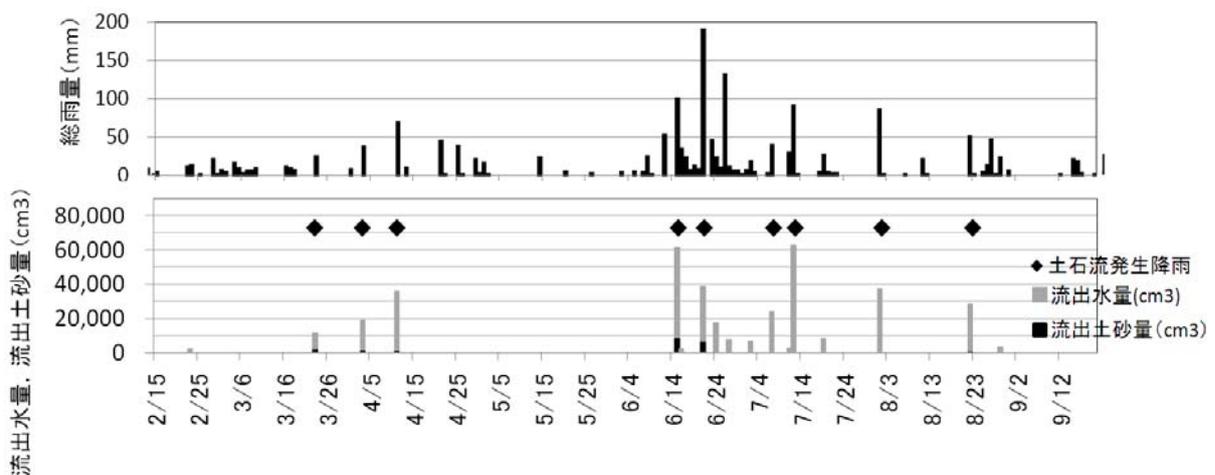


図6 観測斜面における表面流発生状況

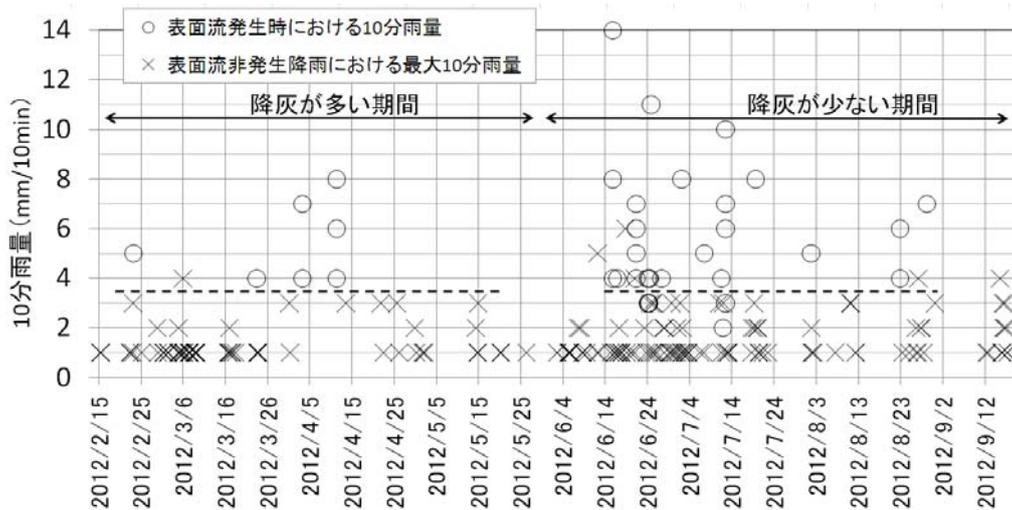


図7 表面流発生時の10分雨量と非発生降雨における最大10分雨量

3.4.2 短期的降灰量と表面流が発生する降雨強度

今回観測した期間における短期的な降灰量の違いが斜面で表面流が発生する降雨強度の違いがあるかを確認した。図7に表面流が発生した降雨イベントにおける表面流発生時の10分雨量を“○”で示す。一連の降雨イベント中に表面流の発生・停止が複数回観測された場合は、再発生時点の10分雨量も表示している。また、表面流が発生しなかった降雨について、その降雨イベント中の最大の10分雨量を“×”で示す。

降灰が多い期間では、最大10分雨量が3mm以下の降雨では表面流の発生が観測されておらず、表面流が発生したのは全て10分雨量が4mm以上の降雨であった。一方、降灰が少ない期間においても10分雨量が3mm以下の降雨では一部の降雨を除き表面流の発生が観測されていない。また、表面流の発生はほとんどが10分雨量4mm以上の場合であった。2012年2月から9月の観測期間における、降灰の多い期間と少ない期間とで明瞭な差は認められなかった。

3.4.3 短期的降灰量と斜面のみかけの浸透能

表面流が発生した降雨イベントについて、斜面のみかけの浸透能 I (mm/hr) を算出した。

$$I = (Q_R - Q_w) / A_c / T \cdot 10 \quad \dots(3)$$

ここで、 Q_R : 表面流発生時間帯に斜面に降った雨の総量 (cm³), Q_w : 表面流出量 (水・土砂合計) から流出土砂量を差し引いた表面流出水量, A_c : 浸透可能面積 (斜面部面積から岩塊等の分布する不透水面積を引いた面

積) (cm²), T : 表面流が継続した時間 (hr) である。

土石流が発生した降雨イベントでは、斜面のみかけの浸透能の下限値は、降灰が多い時期では 11.1~14.7 mm/hr であり、降灰が少ない時期では 14.7~24.9 mm/hr であり、降灰の少ない時期の方がやや大きい値を示した。降灰の多い期間と少ない期間とでは降雨規模や波形が異なり、降灰の少ない期間の梅雨期から台風期の降雨強度が大きいことが影響している可能性はあるものの、斜面の浸透能として短期的な降灰量が少ない時期で浸透能が高くなった可能性が考えられる。

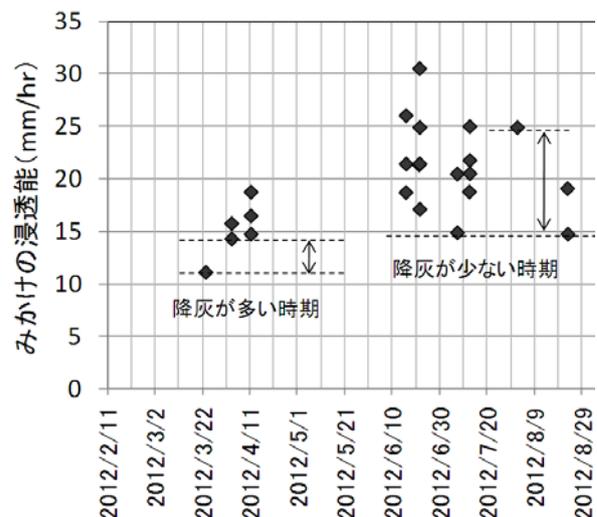


図8 斜面のみかけの浸透能

なお、前述 3.4.2 で述べたように表面流が発生する降雨強度には目立った変化がないにもかかわらずみかけの浸透能に差が認められた理由としては、降灰の少ない期間

においては、降雨において観測斜面内にリルや小規模なガリが発達したことがみかけの浸透能の増加に影響している可能性が考えられる。すなわち、表面流が発生する降雨強度は透水性が比較的低いリル間地によって決まっているため顕著な違いがみられないが、透水性の高いリルが形成されたことで、斜面全体としてはみかけの浸透能が高くなったと考えれば説明がつく。

3.4.4 まとめ

今回の観測期間においては、有村川において土石流が発生した降雨イベントにおいては全て、観測斜面における表面流の発生が観測されたことから、斜面における表面流の発生降雨量と土石流の発生降雨量は関係性があると考えられた。そこで、観測斜面における表面流の発生降雨量を調査したところ、今回の観測期間における短期的降灰量では表面流が発生する雨量強度に明瞭な差は認められなかったが、斜面のみかけの浸透能については短期的降灰量が少なくなった時期の方がやや高いという結果が得られた。

短期的降灰量がさらに増大するような場合には表面流発生降雨量の変動する可能性があり、今後も引き続き研究が必要と考えられる。

4. おわりに

2012年度は、達成目標①「火山灰・火砕流堆積後の土石流の緊急減災のための緊急調査マニュアルの作成」を目標として、それぞれ以下の結果を得た。

(1) 桜島有村川で観測された高濃度土砂を含む土石流の高精度な観測結果との比較検証によって、栗原ほか(2005)で提案されたハイドログラフ推定手法は、ハイドログラフの総流出水量とピーク近傍以外の流量について適用可能性が示された。ただし、ピーク近傍については、たとえ損失雨量強度をゼロとしても再現ができないことが明らかになった。そのようなピーク流量の形成メカニズムの検討が今後の課題である。

(2) 観測斜面における表面流の発生降雨量を調査したところ、今回の観測期間における短期的な降灰量の時期

的な変動では表面流が発生する雨量強度に明瞭な差は認められなかった。しかし、斜面のみかけの浸透能については短期的降灰量が少なくなった時期の方がやや高いという結果が得られている。今後、降灰量の変化と土石流発生降雨量の変化の関係を明らかにするため、引き続き、現地における観測を継続する予定である。

参考文献

- 1) 栗原ほか(2005)火山活動の推移に伴う泥流発生危険度評価と規模の予測手法に関する研究, 平成17年度土木研究所重点プロジェクト研究課題成果報告書
- 2) 大坂ほか(2013) 桜島における土石流荷重計による単位体積重量測定, 砂防学会誌, Vol. 65, No. 6, pp. 46-50
- 3) 能和ほか(2013) 土石流断面計測の精度向上に向けたセンサーの開発, 第62回平成25年度砂防学会研究発表会概要集
- 4) 木佐ほか(2013) 桜島における短期的降灰量と土石流発生降雨量の関係, 第62回平成25年度砂防学会研究発表会概要集
- 5) 宮田ほか(2011) 短時間小規模河道閉塞によるフラッシュフラッド発生に関する基礎的検討, 第60回平成23年度砂防学会研究発表会概要集
- 6) 小田ほか(2010) 短時間溪流閉塞時の堆積形状と決壊時のハイドログラフに関する実験的研究, 砂防学会誌, Vol. 63, No. 3, pp. 3-10
- 7) 栗原ほか(2007) 2006年に発生した鉄砲水災害の発生原因について—佐賀県伊万里市, 山形県富並川の事例—, 砂防学会誌, Vol. 60, No. 2, pp. 39-44
- 8) 國友 優(2011): 桜島における土石流観測体制の現状と課題, 土木技術資料, Vol. 53, No. 5, pp. 42-45
- 9) 地頭蘭隆ほか(1991): 桜島における火山活動が土石流・泥流の発生や流出に及ぼす影響, 砂防学会誌, Vol. 43, No. 6, pp. 9-15
- 10) 国土交通省 九州地方整備局 大隅河川国道事務所(2007): 桜島火山砂防調査研究成果集, pp. 51-54
- 11) 国土交通省 九州地方整備局 大隅河川国道事務所: 平成24年度土石流調査情報(桜島地域) 第35報

A STUDY ON EMERGENCY MITIGATION MEASURES AGAINST SEDIMENT-RELATED DISASTERS CAUSED BY VOLCANIC ERUPTION

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Erosion and Sediment Control
Research Group(Volcano and Debris flow)

Authors : ISHIZUKA Tadanori

YAMAKOSHI Takao

TAKEZAWA Nagazumi

SHIMIZU Takeshi

Abstract : Japan is posed to risks of volcanic eruption-induced sediment-related disasters, so that it is necessary to research and develop emergency mitigation measures against them. In F.Y. 2012, the authors have executed so far this study aiming at improving the existing method to predict hydrograph of post-eruption rainfall-induced debris flow and revealing a relationship between short-term variation of volcanic ash fall and rainfall threshold of debris flow depending on field observation data obtained in Sakurajima volcano. The interim results obtained within F.Y. 2012 are as follows. 1) It is shown that the existing method to predict debris flow hydrograph can provide almost correct volume of water runoff. However, it was impossible to mimic peak flow rate of the actually observed debris flow hydrograph. It is necessary to consider another generation mechanism for the peak flow rate of the debris flow. 2) The data obtained through F.Y. 2012 show that rainfall threshold of debris flow has not shown any significant change despite a variation of volcanic ash fall so far. It is necessary to keep watching data especially in the period of more ash fall in the next year.

Key words : debris flow, pyroclastic flow, debris flow, Sakurajima, debris flow hydrograph, short term volcanic ash fall, surface runoff, rainfall threshold of debris flow