

桜島有村川流域における土石流の流出解析モデルの改良～表層の浸透過程の再検討～

中央開発株式会社（元新潟大学大学院 自然科学研究科）○羽田京香
新潟大学 農学部 権田豊
新潟大学大学院 自然科学研究科 Timur Ersoz

1. はじめに

火山地帯では、噴火に伴い火山灰が地面に堆積することで、地表面の浸透能が著しく低下し、表面流出量が増え、リル・ガリー侵食が進行し、土石流の発生に繋がる（寺本ら，2003）。土石流の発生には、地表面の環境を変化させる要因である火山灰の堆積状況や、降雨量が大きく関係しており、土石流の発生時期及び氾濫範囲を予測するためには、これらの要因と土石流発生危険度との関係を明らかにすることが重要である。噴火終息後の火山においては、土石流の発生頻度が経年的に減少傾向にあることが明らかとなっている（寺本ら，2002）。その理由としては、地表面の粗粒化や浸透能の回復等があげられる（例えば、山越・諏訪，1998）。このように、複数の火山において土石流の発生頻度低下の要因について検討されており、噴火終息後の火山における土石流発生と地表状態との関係が明らかとなっている。しかし、地表面の状態の変化を広域にわたって経時的に評価する手法が確立されておらず、地表状態と土石流発生危険度との関係については定量的な評価が十分に行われていない。

そこで本研究では、地表状態を流域スケールで評価する手法の一つとして、物理モデルを用いた流出解析に注目した。モデルを用いて実際の土石流の流出波形を再現するようなパラメータを逆解析することで、土石流発生時の状況を間接的に把握できると考えた。物理モデルの中でも、Kinematic Wave 法を用いると火山地帯における土石流の流出波形を概ね表現できることが寺本ら（2003）の研究で明らかとなっている。

著者らの研究グループでは Kinematic Wave 法を用いた土石流の流出解析モデルを作成し、改良が行われてきた（以下、従来のモデルとする）。しかし、2021年度末の時点では土石流の流出波形を再現できず、モデルのパラメータを正確に逆解析することができない土石流発生降雨イベントが残された。

本研究では、流出解析モデルの精度向上に貢献することを目的とした。従来のモデルで実際の流出を再現できなかった土石流発生降雨イベントが存在した原因は、それらのイベントの流出特性や降雨特性のためではなく、土石流流出解析モデル自体に問題があるためと考え、流出解析モデルの改良を試みた。改良後の流出解析モデルを用いて解析を行い、従来のモデルを用いた場合と、流出波形の再現性を比較した。その上で、流出波形の再現性向上に貢献した要因や、流出の再現性が向上しない土石流発生降雨イベントの特徴について考察した。

2. 研究対象地

本研究では、鹿児島県桜島南東部に位置する有村川流域を研究対象地とした。南岳山頂火口より南南東に約 2.5km の地点にある第一有村橋を最下流とし、面積約 2.8km² の研究対象地を設定した。本流域には土石流観測のためにワイヤーセンサーや超音波式水位計・流速計が設置されており、毎年土石流が観測されている。



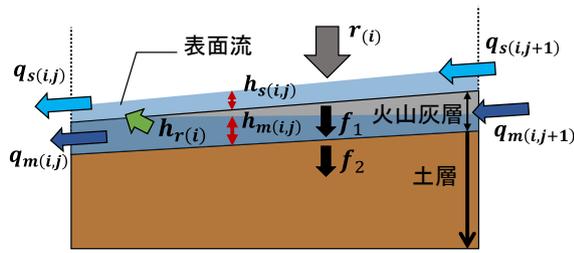
図1 研究対象地

3. 土石流の流出解析

3.1. 流出解析モデルの改良

従来のモデルは、降雨量に流出係数を乗じ、有効降雨量を算出して斜面流の計算を行っている。またその際に、流出係数は1つの土石流発生降雨イベント中は一定としているため、降雨の損失によって生じるような流出率の時間的な変化を表現できていなかった。本研究では、その問題を解決するために、斜面流の計算において斜面の土層を火山灰層と土層の2層構造とし、各層間の浸透過程をモデルに組み込んだ（図2）。

地表面から火山灰層への浸透速度を設定することで、降雨強度の弱い雨は地面に浸透し、降雨強度の強い雨は地表流になる過程を計算で表現できるようになり、現実の浸透過程に近い現象を計算できると考えた。また、火山灰層内で生じる側方流（中間流）や火山灰層が飽和した際に生じる復帰流も計算できるようにした。解析する際には、等価粗度係数は0.01～1.0の間で最適な値を模索し、それ以外のパラメータは全土石流発生降雨イベントで一定とした。間隙率は0.5、火山灰層は厚さ0.16m、飽和透水係数・浸透速度は現地で計測した値を参考に $4.78 \times 10^{-6} \text{m/s}$ とした。



r :降雨 (m/s), h_s :地表流の水深 (m), h_m :中間流の水深 (m), h_r :復帰流による水深の増分 (m), q_s :地表流の流量 (m^3/s), q_m :中間流の流量 (m^3/s), f_1 :表土から火山灰層への浸透速度 (m/s), f_2 :火山灰層から土層への浸透速度 (m/s), i :時間ステップ, j :場所ステップ

図 2 斜面流の計算過程の模式図

3.2. 結果・考察

従来のモデルを用いた結果と本研究で作成したモデルを用いた結果を比較した。すると、解析対象とした全 51 件の土石流発生降雨イベントのうち、25 件で流出波形の再現性が向上した (図 3)。次に、流出波形の再現性向上に貢献した要因を把握するために、本研究で新たに導入した中間流及び復帰流の流出量を評価したところ、両成分が総流出量に占める割合はさほど大きくなかった。この結果から、中間流及び復帰流は流出波形の再現性向上に貢献しておらず、斜面流の計算過程を変更し、斜面流の浸透過程を改良したことが流出波形の再現性向上に貢献したと考えられる。

一方、本研究で作成したモデルを用いても、3 件の土石流発生降雨イベントでは流出波形の再現性が向上しなかった。これらの降雨イベントと他の降雨イベントの差異を比較した結果、他の土石流発生降雨イベントと比較して降雨量が少ない傾向が明らかとなった。本研究で作成した解析モデルは、飽和透水係数及び浸透速度の設定を全土石流発生降雨イベントで一定としている。そのため、流出波形の再現性が低いイベントや中程度のイベントに関しては、これらの設定が不適切であったため、流出が正確に再現できなかったと考えた。そこで、流出の再現性が低いイベントを含む数件のイベントについて、パラメータの設定を変更し、再度流出解析を行った。

再現性が低いイベントでは、流域内の上流域の一部エリアではクラストが発生し、浸透しないという仮定のもと、一部流域の透水係数及び浸透速度を 0 m/s に設定した。その結果、これまで流出量が少なく計算されていた土石流発生降雨イベントでは流出量が増加し、流出波形が改善された (図 4)。

また、実際の流出よりも過大に流量が計算された土石流発生降雨イベントでは、飽和透水係数及び浸透速度の設定を通常よりも 2.5 倍大きく設定することで流出波形が改善された (図 5)。この結果から、飽和透水係数及び浸透速度は土石流発生降雨イベントごとに設定することが必要だと考えられる。

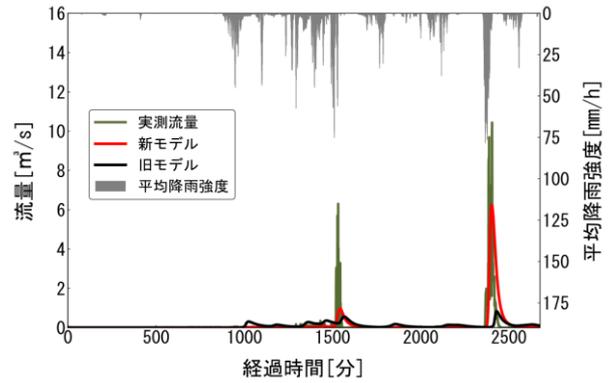


図 3 流出の再現性が向上したイベントの一例

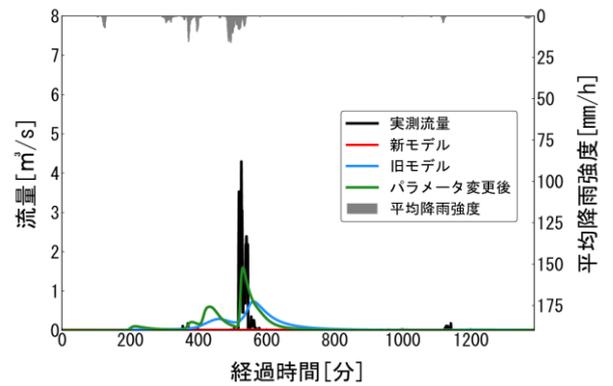


図 4 飽和透水係数及び浸透速度を通常より小さく設定したことで流出波形が改善したイベントの一例

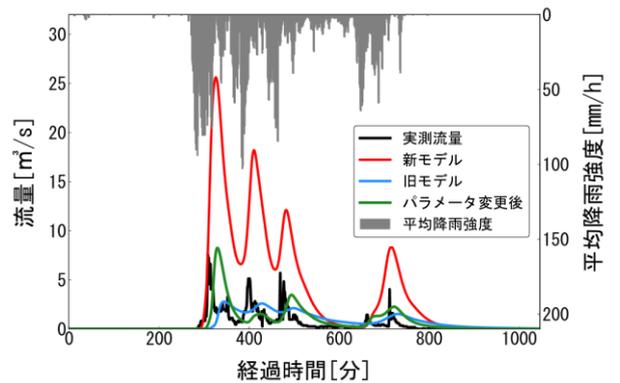


図 5 飽和透水係数及び浸透速度を通常より大きく設定したことで流出波形が改善したイベントの一例

4. まとめ

先行研究の課題を踏まえ、Kinematic Wave 法をベースとした土石流の流出解析モデルの改良を行った。流出解析モデルの斜面流の計算過程を改良したことで、流出の再現性が向上した。また、本研究で新たに導入した飽和透水係数及び浸透速度の設定を変更することで、流出の再現性が変化することが確認できた。今後は、土石流発生降雨イベントごとに適切な飽和透水係数及び浸透速度の設定をすることで、降灰量との関係を検討する必要がある。