

不飽和浸透理論に基づく流出解析モデルの桜島有村川の降灰裸地斜面への適用

国立研究開発法人土木研究所 ○平岡 真合乃, 手塚 咲子 (現 日本工営株式会社), 山崎 祐介, 清水 武志, 石井 靖雄

1. はじめに

火山噴火にともない、斜面に堆積した火山灰(粒径2mm以下の火山噴出物)の透水性や保水性といった水分特性は、元の表土とは異なる場合がある。土層の水分特性は、表面流の形成を支配しており、土石流の発生においても重要な役割を果たすことから、降灰後の土石流の発生・流下過程を考える上で、降雨流出過程における火山灰の水分特性の影響を明らかにすることが重要である。2000年に噴火した三宅島の火山灰堆積斜面に対して、火山灰の不飽和浸透特性を考慮した流出解析モデルを適用した結果、表面流出が再現できたと報告されている。一方、火山灰の土質特性は火山ごと、また同じ火山でも噴火ごとに異なることもあるため、今後、他火山での適用性の確認や、計算に必要なパラメータの与え方などを検討する必要がある。

本研究では、流出解析モデルを適用して桜島有村川斜面の観測区画の表面流出量を計算し、観測値との比較によりモデルの適用性の検討を行った。

2. 研究方法

2.1 現地観測

現地観測は桜島の有村川流域で行っている(図-1a)。火山灰が堆積した斜面での表面流の発生実態を把握するため、観測区画(幅1.0m, 斜面長1.8m程度, 傾斜10°)を設けている(図-1b)。斜面に堆積する火山灰の土粒子密度は2.7g/cm³であり、粒径区分は礫9.1%, 砂68.1%, シルト12.4%, 粘土10.4%である。観測区画で発生した表面流出量は、斜面下方に設置した貯留槽内に流下し、そこでの水位と荷重の10分間変化量から算出した。降水量は、図-1aの観測点における10分間値を使用した。

2020年の有村川の年降水量は3067mmであり、24時間以上の無降雨期間で区切ったものを降雨イベントとした。降雨イベントは67個発生し、イベント総雨量は46±88mm, イベント最大10分雨量は3.5±3.7mmであった。観測値は52個の降雨イベントで得られ、そのうち流出が発生したイベントは17個であった。

2.2 流出解析モデル

現地観測により、観測区画の土層が不飽和状態で表面流の発生が確認された。現地の降雨流出を再現するため、既存の流出解析モデルを適用した。モデルでは、土層における水の鉛直次元の移動は、不飽和浸透理論に基づいて計算した。表面流出量は、降雨量とサクシオンに応じた地表面の浸透量の差分とし、キネマティックウェーブ法による流出解析で算

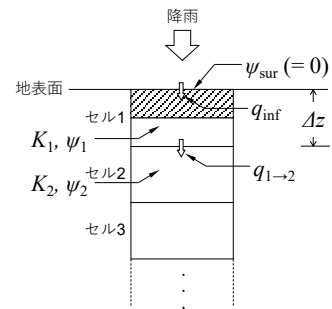


図-2 本研究の流出解析モデルの概念図

出した。

不飽和浸透流解析における基礎方程式は、Darcy則を不飽和領域に拡張させたRichards式を適用しており、次式で表される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - K_r \right\} \tag{1}$$

$$q = -K_r \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \tag{2}$$

ここに、 θ は体積含水率、 t は時間、 $D(\theta)$ は土壌水分拡散係数(= $K_r(\theta) \times \partial \psi / \partial \theta$)、 ψ はサクシオン、 z は鉛直距離(下向きに正)、 K_r は不飽和透水係数(van Genuchtenモデルに基づき、飽和透水係数と有効飽和度より算出)、 q は鉛直方向への流量である。

ここで、不飽和浸透流解析における地表面の境界条件は、降雨量が土層の浸透能を上回る場合、山越ら(2006)は最上層セルに対して飽和透水係数を与えたが、本研究では、土壌水分状態に応じた不飽和透水係数を算出して与えた(図-2)。また、蒸発の影響は無視した。

$$q_n = -\frac{K_m + K_s}{2} \left(\frac{\psi_n - \psi_{sur}}{\Delta z / 2} + 1 \right) \tag{3}$$

$$K_m = \frac{K_{m+1/2} + K_{m-1/2}}{2} \tag{4}$$

ここに、 q_n は上層セルからセル n への土壌水分移動量、 K_m はセル n の不飽和透水係数、 K_s は飽和透水係数、 ψ_n はセル n のサクシオン、 ψ_{sur} は地表面のサクシオン(=0)、 Δz はセルの厚さ(下向きに正)である。

計算領域の土層の厚さと最下層セルの下端の境界条件は、自破碎溶岩の上に火山灰が堆積した斜面の現地状況を考慮し、それぞれ35cm, 排水条件とした。土層の土壌水分特性に関するパラメータは、観測区画近傍の斜面で採取した不攪乱試料の室内土質試験(変水位透水試験JISA1218, 水頭法および加圧板法による保水性試験JGS0151)結果に基づいて定めた。土層のサクシオンの初期値は、降雨イベント開始時の θ の観測値と計算値が類似するよう、試行錯誤により求めた。

地表面において、浸透しなかった水は、マンニング則にしたがって流下するものとした。マンニングの粗度係数は、計算値が観測値に一致するよう、試行錯誤により求めた。入力降雨データは観測値、計算時間間隔は0.05秒とした。

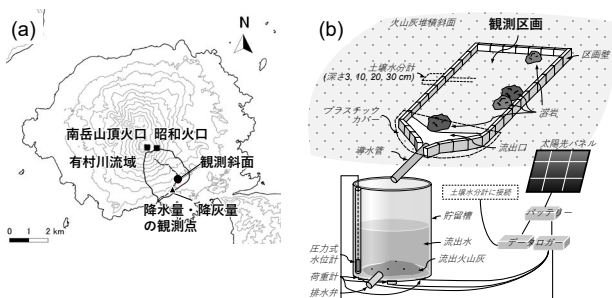


図-1 (a) 噴火火口、有村川流域(実線は流域界, 点線は主流路), 観測区画, 降水観測点の位置図, (b) 観測区画および表面流観測システムの概要

表-1 対象イベント①および②の概要

	対象イベント①	対象イベント②
期間	4/19 17:50~4/20 1:00	5/15 17:20~5/18 20:00
総降水量	37 mm	224 mm
最大10分雨量	5 mm	12 mm
継続時間	7 h 10 min	74 h 40 min

再現計算は、2020年に発生した降雨イベントのうち、①4月19日~20日および②5月15日~18日を対象とした(表-1)。対象イベントは、平均降雨強度(=総降水量/降雨継続時間)と降雨継続時間から算出されたリターンピリオドが、①が 1.3×10^2 年、②が2.4年であり、いずれも有村川で土石流の発生が記録された。

3. 結果および考察

3.1 表面流出の再現

室内土質試験によるパラメータを計算条件に用いた流出解析では、表面流出量の計算値はゼロとなり、観測値を再現することはできなかった。一方、室内土質試験による飽和透水係数 K_s を1/10にしたケースでは、計算値による表面流の波形形状が観測値に類似していた(図-3a, 4a)。表面流の総流出量および最大流出量の計算値は、対象イベント①ではそれぞれ観測値の1.0倍、1.1倍であり、②ではそれぞれ1.6倍、1.4倍であった。計算値は、観測値が1mm未満の場合、表面流の発生/非発生が一致しないことがあったが、観測値が1mm以上の場合には、計算値が観測値の1~3倍程度の範囲で再現された(図-5)。したがって、既存の流出解析モデルは、リターンピリオドが 10^2 年・2年程度の降雨イベントでは、観測区画で発生する表面流出を概ね表現可能であることが示された。

3.2 降雨浸透の再現

土層の降雨浸透状況を確認するため、表面流出量の再現ができたケースについて、体積含水率 θ の観測値と計算値を比較したところ、両者の経時変化の傾向は表面流出のように再現することはできなかった(図-3b, 3c, 4b, 4c)。いずれの対象イベントでも、地表から深さ3cmと10cmの観測値は、 θ の経時変化は深度間で違いがみられなかった(図-3b, 4b)。これに対して計算値は、いずれの対象イベントでも、深度間

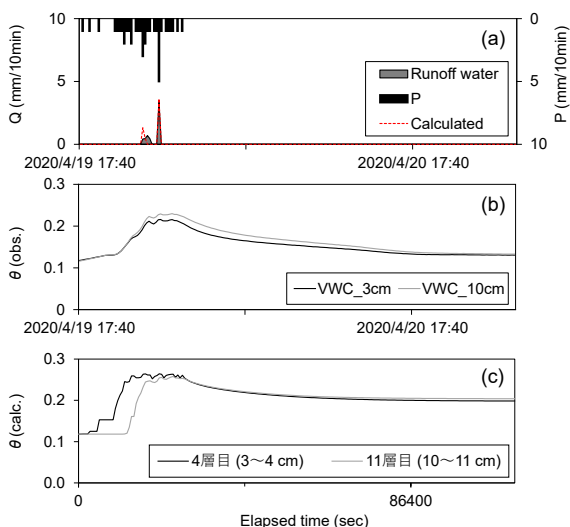


図-3 対象イベント①の(a)観測値と計算値のハイドログラフ、(b) θ の観測値、(c) θ の計算値

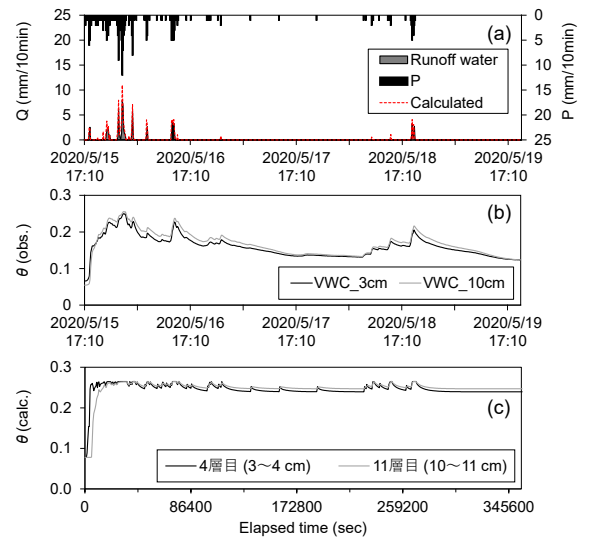


図-4 対象イベント②の(a)観測値と計算値のハイドログラフ、(b) θ の観測値、(c) θ の計算値

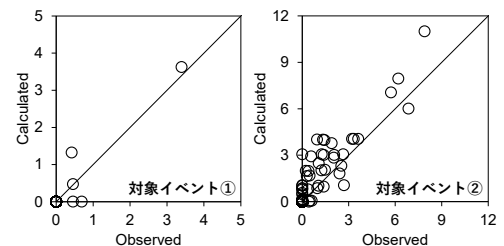


図-5 対象イベント①および②における表面流出量の観測値と計算値(いずれも10分値)の比較(図中の実線は $y=x$ の直線)

で降雨に対する θ の波形形状が異なっていた(図-3c, 4c)。 θ の波形は降雨開始からしばらくは地表に近い土層の方が応答は早く、より下の土層の応答は地表に近い土層より5分以上の遅れが生じていた。

4. おわりに

桜島有村川斜面における観測区画からの表面流出量の観測値に対し、既存の流出解析モデルを適用した。地表面の境界条件として、最上層セルに対して飽和透水係数ではなく、土壌水分状態に応じた不飽和透水係数を与えることとし、飽和透水係数を計測値よりも1オーダー小さい値を与えて不飽和透水係数を算出した場合、表面流出量の10分間値には最大で3倍程度の差があったが、流出波形は概ね再現することができた。しかしながら、降雨が土層に浸透していく過程は、観測値と計算値の挙動は一致しなかった。

今後、計算条件が流出解析モデルの再現性に与える影響を把握し、パラメータの与え方をさらに検討する必要がある。また、様々な降灰状況に応じた降雨流出量を計算するためには、降灰の厚さや粒径などの違いがモデルの再現性に与える影響について課題が残っている。

謝辞

本研究で使用した降水量は、国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所よりご提供いただきました。また、現地観測では、(国研)土木研究所 火山・土石流チームの佐野泰志さんにご協力いただきました。感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 山越隆雄・笹原克夫・田方 智・石田哲也・竹島秀大・若林栄一：新規細粒火山灰堆積地における地表流発生モデル，砂防学会誌，Vol. 59，No. 4，p.24-31，2006