

降灰厚分布情報を活用した 土石流の氾濫リスク評価手法の開発

山崎祐介・林 真一郎・石井靖雄

1. はじめに

火山噴火後、火山灰や火砕流堆積物（以下、ここでは「降灰」という。）が山地斜面を覆うと、噴火前には土石流が発生しなかった少ない降水量により土石流が発生しやすくなる場合がある¹⁾。このように土石流の危険が急迫する状況に対しては、市町村が住民避難を判断する技術的知見を提供するため、土砂災害防止法に基づき国土交通省が緊急調査を実施し、被害の想定される区域・時期の情報を市町村等へ提供することとなっている。火山噴火に伴う土石流の被害が想定される区域の緊急調査での想定手法²⁾については、想定氾濫開始点より上流側の流出解析と下流側の二次元氾濫計算から構成されている。火山・土石流チームでは土石流の氾濫リスク評価の精度向上のため、土石流の実態把握と実際の土石流を再現できる流出解析・二次元氾濫計算の技術開発に取り組んでいる。火山噴火に伴う土石流の発生タイミングや規模は、主に勾配・集水面積、斜面・河道の堆積物の厚さ・粒度分布・飽和条件等に影響されるため、降灰による地形変化や表層の浸透能の変化を把握し、流出解析モデルに反映することが精度向上のため重要である。また、近年、XRAINによって時間・空間分解能の高い降雨分布の情報がリアルタイムに入手可能となっている。さらに、降灰厚分布の把握については、時間・空間分解能およびリアルタイム性を高める技術開発が始まってきている。このような降雨・降灰厚分布等の情報を活用し、より流域の状況を反映した流出解析も期待できるようになってきている。

本稿では、上記を踏まえた、①降灰厚分布情報の把握に関する技術開発の取り組み、②降灰厚分布情報を活用した流出解析モデルの概要を述べる。

2. 降灰厚分布情報の把握に関する技術開発の取り組み

土石流の氾濫リスク評価に重要な情報である降灰厚分布情報の把握は、従来、現地での調査から等層厚線図を作成する方法が主として用いられてきた³⁾。しかし、降灰範囲が広い範囲に及ぶ場合、例えば、2011年の新燃岳噴火では、降灰厚分布の把握に4日間を要した⁴⁾。また、2014年の御嶽山噴火では、主要な降灰範囲が立入規制区域内であったため、現地調査による把握が難しい状況にあった⁵⁾。これらの課題に対応するため、火山・土石流チームでは、過去の火山噴火の降灰厚分布から分布推定式を作成し、山麓の降灰厚計測値から火口周辺の立ち入り禁止区域の降灰厚を推定する手法を検討する等、迅速な降灰厚分布の把握のための技術開発を行ってきた⁶⁾。また同時に、リモートセンシング技術を用いた実測による降灰厚分布の把握の可能性が出てきており、これを踏まえ、SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）国家レジリエンス（防災・減災）の強化の中において、「火山降灰等シミュレーション広域被害予測技術開発」（2018～2022年度）として、リモートセンシング技術を用いた降灰厚分布情報の把握に関する技術開発、および、それにより得られた降灰厚分布情報を迅速にリスク評価に反映す

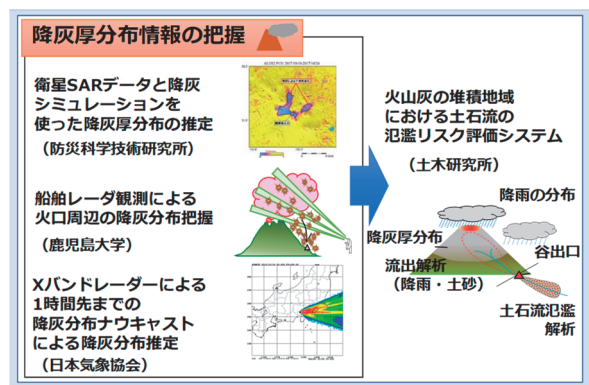


図-1 降灰厚分布情報の把握・土石流の氾濫リスク評価の概要

るシステムの開発を行っている(図-1)。具体的には、降灰厚分布情報の把握に関する技術開発として、衛星SARと降灰シミュレーションの組み合わせ(防災科学技術研究所)、船舶レーダー(鹿児島大学)、Xバンドレーダー(日本気象協会)といった複数のリモートセンシング技術による把握に取り組んでいる。また、火山・土石流チームでは、これらの技術から迅速に得られた降灰厚分布の情報を、流出解析モデルにおいて浸透能変化や侵食土砂量として反映し、土石流の氾濫リスク評価の精度向上を図る予定である。さらに、これらの機能を国土交通省九州技術事務所が主導的に全国的に整備を進めている火山噴火リアルタイムハザードマップ⁷⁾に組み込み、社会実装を図っていく予定である。

3. 流出解析モデルの開発

3.1 土石流の観測

火山・土石流チームでは、土石流の実態把握、流出解析モデルの検証用データの取得のため、国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所と共同で桜島・有村川3号堰堤において土石流観測を行っている。有村川3号堰堤には測域センサー、荷重計、および超音波流速計を設置しており、土石流の表面の標高(20Hzで計測した1秒間の平均値)、荷重(垂直応力を100Hzで計測した1秒間の平均値)および表面流速(1MHzで計測した1分間の平均値)の計測を実施している。これらの計測により、土石流の土砂濃度や間隙流体密度が推定できるようになってきている⁸⁾。荷重計は堰堤水通し部の左岸側に設置した幅4m奥行き2mの鉄板の下部に4台設置しており、堰堤の上部には測域センサーと超音波式流速計を設置している(図-2)。



図-2 土石流観測機器の配置

3.2 流出解析モデルの概要

流出解析モデルは、降雨が山腹斜面表土層に浸透し、河道に流出してくる過程を解析する平面2次元

における降雨浸透流出モデルと、1次元河道網において堆積物が土石流となって流下していく過程を解析する土石流モデルからなる。

地形の設定は2.で述べた降灰厚分布情報や降雨分布を反映するため、流域全体を10mメッシュに分割し、山腹斜面を表現している(図-3(左))。これにより、土層厚、浸透能、間隙率、透水係数等の水理・水文パラメータの流域内での細かな設定が可能となり、また、噴火の状況を踏まえた変更についても容易となるようにした。従来手法²⁾における計算の最小単位は河道に接続している2枚の矩形斜面と河道であり、このユニットを組み合わせて流域全体の地形を表現している(図-3(右))。矩形斜面においては、降灰の有無を基準にして、水理・水文パラメータが一様に与えられている。そのため、従来モデルにおいては、降灰によって地形や河道網に変化が生じた場合に、その都度、これらを表現するよう地形の再構築を適切に行う必要があった。一方、本流出解析モデルでは、地形はメッシュごとの標高値の編集、河道網は多くのGISソフトウェアの標準機能により変更が可能であり、短時間で降灰による変化を反映可能である。さらに精度向上を図るため、メッシュのみの地形形成で生じる問題である、川幅がメッシュサイズに規定されること、地形設定上生じる窪地の発生による斜め方向のメッシュ間における水・土砂の移動の阻害等の影響を避けるため、河道をメッシュの中心を結ぶ線で構成される1次元の河道網として、メッシュとは独立させて設定している(図-3(左)内の青線)。

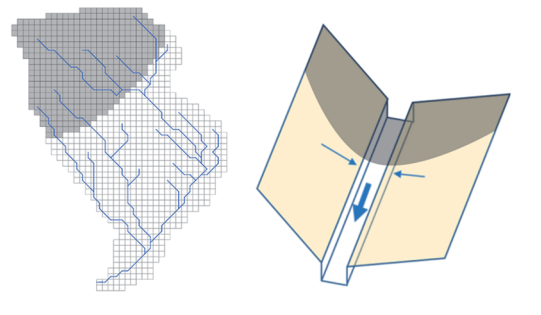


図-3 地形設定手法(左:本研究、右:従来手法)

3.3 降雨浸透流出モデル・土石流モデル

図-4に降雨浸透流出モデルにおける山腹斜面の表土層と水面の概要を示す(r は降雨強度、 e は蒸発散強度、 p_w は土壌の水分含有率、 h_s は浸透流水深、 h は表面流水深、 f_{s1} は表土層表面の浸透能、 f_{s2} は表

土層から下層への浸透能、 D は表土層厚、 λ は表土層の間隙率)。降雨が発生すると、まず、表土層における土壌水分 p_w が増加していき、限界値 p_{wc} に到達すると浸透流が発生する。続いて、浸透流水深 h_s が表土層厚 D に到達すると表面流が発生する。降雨が終了すると、表土層の浸透流および土壌水分は蒸発散により失われる。本モデルでは火山噴火に伴う降灰により、表土層の表面の浸透能が急激に減少する効果は f_{s1} を変化させることで表現できるようになっている。また、下層への浸透については f_{s2} によって表現できるようになっている。表土層、浸透流、および表面流の支配方程式は山崎ら⁹⁾を用いている。浸透流および表面流にはそれぞれダルシー則およびマニング則を適用している。

図-3 (左) において河道を設定したメッシュでは表面流が河道へ流入する。図-5は2次元平面におけるメッシュと1次元河道における水のやり取りを示している。 h はメッシュにおける水深、 h_{1d} は1次元河道における水深、 q_{sr} は斜面から河道への単位幅流量、 $q_{1d(in)}$ 、 $q_{1d(out)}$ はそれぞれ1次元河道における流入流量および流出流量、 b は川幅、 l は河道延長(メッシュの中心を結んだ長さ)となる。河道には厚さ D 、間隙率 λ の堆積物があり、堆積物が飽和すると表面流が発生する。堆積物に対しては無限長斜面の安定解析を適用し、不安定になった場合についてはその点より下流を土石流の計算対象区間としている。別途検討中であるが、斜面における降灰厚および降灰の物性と浸透能低下の関係をモデル化し、

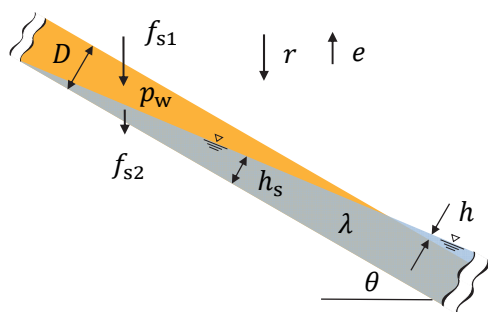


図-4 表土層における水面の概念図

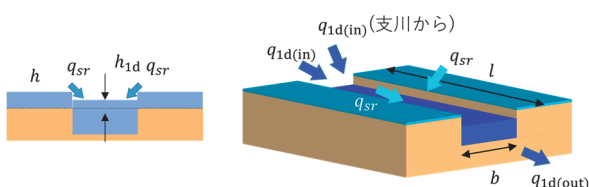


図-5 斜面-河道の水のやり取り

斜面からの表面流の供給が増えた場合の河道の堆積物の不安定化を表現できるようになっている。

本研究の土石流モデルにおいて、土石流の支配方程式は土石流全体、粗粒土砂、および微細土砂の質量保存則を水深平均1次元で表現したものをを用いている。この時の浸食速度は江頭¹⁰⁾、微細土砂の取り扱いには山崎・江頭¹¹⁾、運動量保存則における抵抗則は江頭ら¹²⁾を用いている。

4. 流出解析モデルによる解析と結果の例

4.1 計算対象溪流・領域と設定条件

ここでは桜島・有村川で2014年8月29日に発生した土石流を対象として流出解析モデルによる解析事例を紹介する。図-6に土石流計算対象溪流・計算対象領域(赤矢印の範囲)とその縦断図を示す。地形設定のための標高データには、国土地理院の基盤地図情報数値標高モデル(5m)を用い、10mメッシュを作成し地形として用いた。今回の計算において設定した物性値等は、既往研究¹⁰⁾を参考に表-1のとおりとした。土石流発生地点は計算領域上流端とし、計算開始と同時に流動化するものとしている。また、堆積物は水で飽和しているものとしているが、上流端および側方からの水の供給は行っていない。対象区間における砂礫の代表粒径 $d=0.1m$ 、川幅は10~30m、堆積物の厚さは2mとした。土石流発生地点、代表粒径、川幅および堆積物の厚さは計算結果が観測結果を再現できるように試行錯誤により設定している。本稿では上記のように土石流の発生地

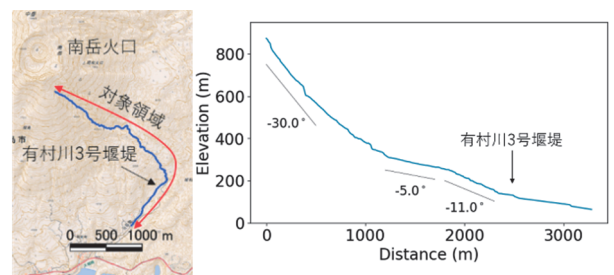


図-6 土石流計算対象溪流の位置図(上)および縦断図(下)

表-1 計算に用いた物性値等

重力加速度	9.8 m/s ²
砂礫の質量密度	2650 kg/m ³
水の質量密度	1000 kg/m ³
砂礫の内部摩擦角	37°
反発係数	0.85
渓床における土砂の体積濃度	0.6

点や堆積物の厚さを与えたが、今後、降雨・降灰厚分布を流出解析モデルに入力し、これらを自動設定できるように検討を行う予定である。

4.2 土石流の流下過程

図-7に堰堤地点の土石流の流速と流動深の計算値と観測値の時間変化を示す。観測による流速と水深は計算結果の水深が零から立ち上がる時間に一致させて表示させている。本研究で開発した流出解析モデルにより、計算結果において、流速のピーク値は観測値に対して約97%、流速および流動深のピーク値は観測値に対して約80%と観測値に近い値を示している。また、流速および水深の立ち上がりからピークまでの変化やピーク後に減衰する傾向についても同様の傾向を示している。以上から、今後さらに検討を行う予定であるが、現在開発を進めている流出解析モデルは、実際の土石流を再現できる可能性があるものと考えている。

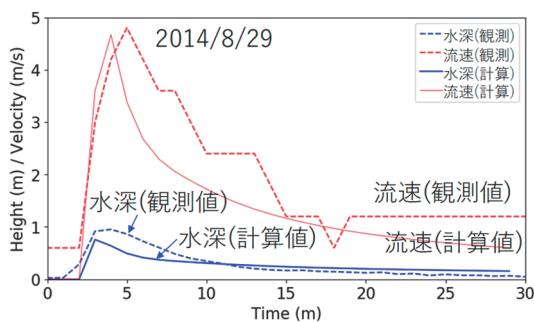


図-7 土石流の流速と流動深の時間変化の計算値と観測値の比較

5. まとめ

本稿では、火山噴火に伴う土石流の氾濫リスク評価の精度向上のための降灰厚分布の把握に関する技術、また、それらを活用した土石流の流出解析モデルの開発状況について報告した。現在、実際の降雨・降灰厚分布を用いて、流出解析モデルのさらなる精度向上に取り組んでいる。降灰厚分布情報の把

握に関する技術開発はSIP、流出解析モデルの開発は研究開発プログラム「土砂移動の監視を踏まえた被害予測技術に関する研究」において実施している。研究成果の実装先である九州技術事務所等の関係機関との連携を通して、引き続き、火山噴火に伴う土石流の氾濫リスク評価手法の開発を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 田村圭司ほか：火山噴火後に土石流が発生した事例、土木技術資料、第52巻、第3巻、pp.34～39、2010
- 2) 内田太郎ほか：河道閉塞（天然ダム）及び火山の噴火を原因とする土石流による被害範囲を速やかに推定する手法、土木技術資料、第53巻、第7号、pp.18～23、2011
- 3) 水野正樹ほか：土石流による被害のおそれが高まった溪流を抽出するための降灰厚調査、砂防学会誌、Vol.72、No.3、pp.38～40、2019
- 4) 佐々木美紀：平成23年霧島山（新燃岳）噴火とその後の対応について、砂防学会誌、Vol.66、No.5、pp.86～91、2014
- 5) 林真一郎ほか：平成26年9月御嶽山噴火による土砂災害に対する二次災害防止の取組、砂防学会誌、Vol.67、No.6、pp.86～91、2015
- 6) 藤村直樹ほか：降灰後の土石流危険溪流の上流域における火山灰の堆積厚の推定、土木技術資料、第60巻、第12号、pp.16～19、2018
- 7) 城ヶ崎正人：火山噴火リアルタイムハザードマップシステムについて、砂防学会誌、Vol.71、No.6、pp.45～48、2019
- 8) 大坂剛ほか：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、2013
- 9) 山崎祐介ほか：避難予警報のための土砂災害シミュレーターに関する研究、土木学会論文集B1（水工学）、Vol.72、No.4、pp.I_1327～I_1332、2016
- 10) 江頭進治：土石流の停止・堆積のメカニズム（1）、砂防学会誌、Vol.46、No.1、pp.45～49、1993
- 11) 山崎祐介、江頭進治：豪雨に伴う土砂・流木の生産と流下過程に関する研究、河川技術論文集、Vol.24、pp.71～76、2018
- 12) 江頭進治ほか：土石流の構成則に関する研究、京都大学防災研究所年報、第32号、B-2、pp.487～501、1989

山崎祐介



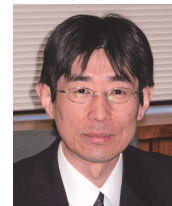
土木研究所土砂管理研究グループ
火山・土石流チーム 研究員、
博士（農学）
Dr. Yusuke YAMAZAKI

林 真一郎



土木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、博士（農学）
Dr. Shin-ichiro HAYASHI

石井靖雄



土木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、博士（農学）
Dr. Yasuo ISHII