

土石流危険渓流が集中する山地流域における土砂流による被災範囲推定手法の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 26

担当チーム：火山・土石流チーム

研究担当者：石塚 忠範、木下 篤彦、森田 耕司、清水 武志、高原 晃宙

【要旨】

2011 年 9 月の和歌山県那智勝浦や 2009 年 7 月の山口県防府で発生した土砂災害では、複数の土石流危険渓流の源頭部において斜面崩壊に起因する土石流が発生し、下流の本川と合流した結果、緩勾配の地域において土砂災害を発生させた。本重点研究では、このような現象を対象として、複数支川から土砂が流入した結果として生じる土砂流の対策に関して検討している。本稿では、氾濫解析における境界条件のひとつである土砂投入のタイミングの影響の分析と、近年山地でも計測される航空レーザ測量による数値地形モデルのデータ処理法について検討した結果を報告する。

キーワード： 合流、土砂流、氾濫シミュレーション、数値地形モデル、数理形態学、モルフオロジ

1. はじめに

平成 21 年 7 月に山口県防府市において土砂災害が発生した。この災害は、多数の支川から土砂が本川へ流入し、下流域の比較的勾配が緩い地域でも土砂流が氾濫したことが特徴であると考えられるが、未解明な点が多い。一方、近年、山地において航空レーザ測量（以下、LiDAR）が多く地域で撮影されて、微地形が容易に判読できる可視化技術の利用や 2 時期の差分による土砂量の算出などで多くの成果を上げてきたものの、LiDAR の高い空間分解能を活用する種々のデータ処理法のさらなる実用化が望まれる。

そこで、本稿では 2 章で平成 21 年の防府市における土砂災害について現地調査結果を基に支川からの土砂の投入タイミングの影響について土砂流氾濫シミュレーションで調べた結果を報告するとともに、3 章で土石流等の氾濫現象への適用を想定しつつ数理形態学を LiDAR などの地形データに適用した結果を紹介する。

2. 山口県防府市における土砂災害

2.1 概要

平成 21 年 7 月 21 日、山口県内では早朝から激しい降雨に見舞われ、日雨量 275 mm、60 分間雨量 72.5 mm（気象庁防府）の観測史上最大の雨量を記録した。この豪雨により防府市内では 84 箇所土砂災害が発生し（うち土石流災害は 53 箇所）、14 名

の方が亡くなる甚大な被害を被った¹⁾。

同災害では、上流域の複数の流域で発生した土石流が下流域で合流して、比較的勾配が緩い地域まで土砂が到達した。剣川では、空中写真などを見ると流域内の支川で複数の土石流が発生した様子が伺えた。また、谷出口の勝坂橋が閉塞して国道 262 号や周辺住居が土砂氾濫被害を受けるとともに、下流の扇状地では大規模な土砂・洪水氾濫被害が発生した。そのため、複数支流からの土石流が合流して下流域で氾濫する場合の取扱いについて、検討する必要がある。

本検討では、剣川で発生した土石流を対象として、

1) 資料分析や現地調査によって災害時の状況を調査し、2) 調査結果を基に数値計算を実施すると共に、支川からの土砂の投入のタイミングなどの境界条件を変化させて氾濫範囲への影響について確認した。なお、この報告においては、実務で用いられている数値シミュレーションの手法を用いることとした。

2.2 災害時の状況調査

1) 上流域の降雨・流出条件

発災時の防府観測所（気象庁）のハイトグラフ、中安の単位図法による剣川基準点でのハイドログラフを図-1 に示す。今回の降雨は 9:00 頃と 12:00 頃に 2 つのピークがあるのが特徴である。災害直後の勝坂橋の閉塞は概ね 2 つ目の降雨ピーク時に発生したものとヒアリング調査等から推定されている²⁾。

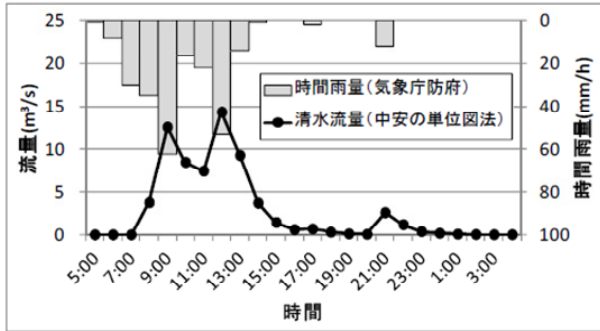


図-1 災害時の降雨波形と想定清水ハイドログラフ

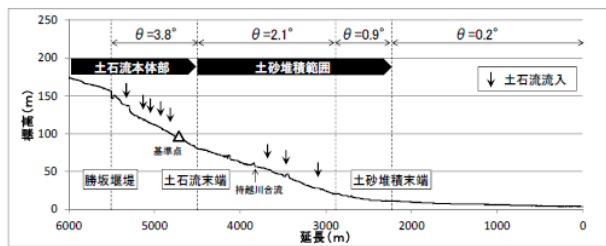


図-2 河床縦断面

2) 土砂の生産と氾濫範囲

剣川上流域からの流出土砂は、中流部に位置する勝坂堰堤が大部分を捕捉していることから、下流域に被害を与えた土砂は、勝坂堰堤より下流側で生産されたと考えられる。災害後の空中写真判読および2013年に実施した現地調査によると、勝坂堰堤から基準点までの区間で6箇所、基準点下流域では4箇所で大川に対して側方から土石流が流入していることが確認できた。これらの土石流による流入土砂が災害をもたらした土砂の主な生産源と考えられる。なお、剣川右支川の持越川からは顕著な土砂流入は認められない。

既往災害報告¹⁾の土砂の堆積範囲を調べると、巨礫を含む土石流本体は基準点直下流の勝坂橋付近で停止しており、停止位置付近の河床勾配は約3.5°であった。また、それより下流では剣川本川および国道262号沿いに流下した細粒土砂が扇状地に広く氾濫していた。細粒土砂の堆積末端の勾配は約0.2°であった。

2.3 方法

複数溪流からの土石流流入が下流氾濫範囲へ与える影響を検討するため、剣川で発生した土砂移動現象の二次元数値シミュレーションを実施した。本検討では、基準点下流の掃流区間における細粒土砂の氾濫を対象とするため、Brownの流砂量式を用いた数値計算を実施した。

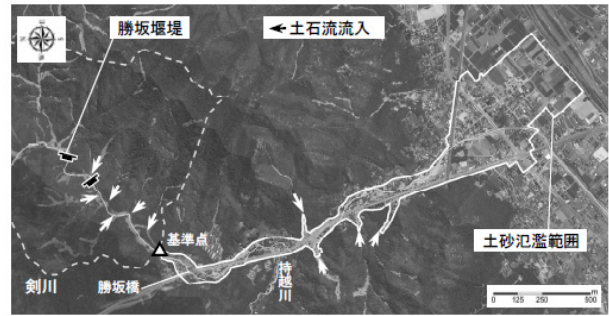


図-3 剣川の土砂氾濫範囲（白枠）

表-1 計算条件

条件	数値	備考
土砂の粒径	2mm	扇状地堆積土砂の平均粒径
泥水密度	1.2g/cm ³	一般的な値
砂礫密度	2.6g/cm ³	一般的な値
粗度係数	0.04	礫河床の2面張水路

表-2 投入土砂量

基準点との相対位置	記号	土砂量 (実容積) (m ³)
勝坂堰堤直下	0	0 (清水のみ)
基準点	右岸 TR1	5,940
	右岸 TR2	9,000
	左岸 TL1	3,420
	左岸 TL2	720
上流	左岸 TL3	1,200
	左岸 TL4	3,180
	小計	23,460
	基準点下流	右岸 A
流	右岸 UR1	8,629
	右岸 UR2	4,408
	左岸 B	4,517
	小計	26,360
	合計	49,820

1) 使用した地形モデル

災害前のH17年に国土交通省中国地方整備局が撮影した1m LiDARを基にした5mメッシュの地形モデルを使用した。河床縦断面を図-2に示す。

2) パラメータ設定

計算に使用したパラメータは表-1のとおりである。なお、投入土砂の粒径は扇状地に堆積した土砂の平均粒径を2mmとした。

3) 境界条件設定

上流端の境界条件の設定箇所は、剣川中流の勝坂堰堤とした。図-3に示す勝坂堰堤、および支川の白矢印の位置から投入したハイドログラフを図-1に示す。なお、土砂流出が確認されなかった持越川からは清水のみを投入した。土石流により側方から流

入する土砂量は、LiDAR の差分解析による災害時の流出土砂量とし、投入した土砂量は表-2 のとおりである。

4) 計算ケース

まず、基準点より下流での土砂投入がないケースを設け、RUN1 とした。また、図-3 に示す白矢印の位置から投入した土砂の投入タイミングを図-1 に示すハイドログラフの1 番目のピークとした場合、2 番目のピークとした場合の 2 ケースについて計算を行った。前者を RUN2、後者を RUN3 と呼ぶ。

2.4 結果と考察

2.4.1 基準点下流における土石流流入の影響

RUN1 (図-4 (a)) の計算結果を見ると、基準点上流からの流出土砂は持越川合流点より上流で大部分が停止し、扇状地での土砂氾濫はわずかである。これに対して RUN2 (図-4 (b)) では、基準点下流において側方から流入する土砂が下流に運搬され、扇状地において広く氾濫する結果となった。

このことから、今回の災害では基準点下流の河床勾配が緩い掃流区間において、側方から複数の土石流が流入した影響により扇状地の土砂氾濫被害が大きくなった可能性が示唆される。

2.4.2 土石流発生タイミングによる土砂氾濫範囲への影響

RUN2 (図-4 (b)) と RUN3 (図-4 (c)) を比較すると、第 1 ピークで土砂を投入した RUN2 の方が扇状地の土砂氾濫面積が大きくなっている。

基準点下流で発生した土石流のうち少なくとも 2 溪流 (図-4 (b)、(c)) の UL1、UR1) では、降雨の第 2 ピーク付近の 12:00 頃に発生したことが既往のヒアリング調査²⁾により示されているが、その他の溪流における土石流の発生タイミングについては不明である。今回の計算結果のうち RUN2 が実績の土砂氾濫範囲に近いことから、幾つかの溪流では第 2 ピーク以前に土石流が発生して河道に土砂が供給された可能性も考えられるが、合流点付近で生じている現象についてはなお不明な点が多い。

3 数値地形モデルの数値形態学による形状抽出

3.1 概要

土石流氾濫解析に格子型の数値標高モデル (以下、DEM) を用いる場合、プレ処理に関する問題には以下のようなものがある：

- 1) 土石流氾濫解析を実施する領域を絞ること (計算資源の活用や計算速度の向上等のため)

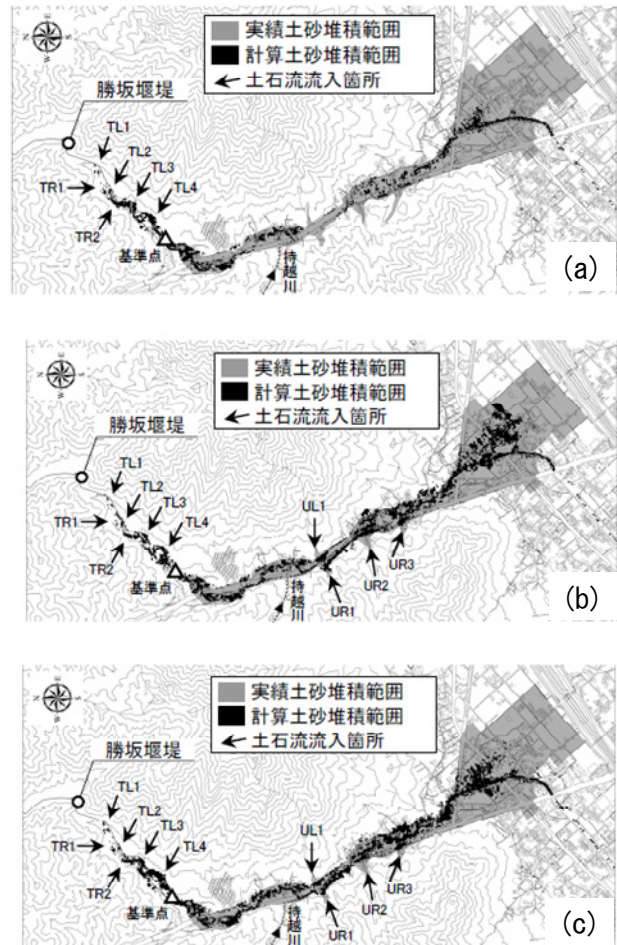


図-4 土石流下後の最終土砂堆積深分布；

- (a) RUN1 基準点下流での土砂投入なし
- (b) RUN2 基準点下流での土砂投入あり (第 1 ピーク時)
- (c) RUN3 基準点下流での土砂投入あり (第 2 ピーク時)

- 2) 数値上の窪地や平坦地に対する処理 (実際と流れの挙動が異なるため)
- 3) 数値上の河道の切断に対する処理 (格子間隔より幅が狭い河道が格子線に斜交するように流下していると河道が数値上せき止められ、流れが寸断あるいは貯留する場合があるため)
- 4) 構造物等の精査

時間制約等によって、実施すべき処理内容が異なると考えられる。1) から順に時間を要する可能性が高い。比較的長時間や計算資源が制約された状況下において、1)、2)、3)の前処理を実施することを想定した場合、解析者による手順が簡単なこと及び処理結果の確からしさ、再現性の確保が重要である。4) は、DEM 以外の多くの資料との照合などを要するため、後述する演算体系では処理できない要素が多い。本稿では、1) に対する検討結果を報告する。

3.2 適用する方法の概説

本報告では、数理形態学（モルフォロジともいう；Mathematical Morphology；以下MM）による手法を用いて解析を行う。MMは、非幾何学的な空間構造を有する対象に、ある単純な操作を繰り返し施すことで構造に関する情報を抽出できる集合演算の操作体系である。その操作は一種の非線形平滑化（フィルタ）である。MMは、鉱物等を計測することが目的で成立した背景から画像解析（2次元信号処理）に適用されることが多い。DEMは個々のピクセルが標高のみを持つ集合（grey scale image）であり、MMの演算体系を適用できる（2次元画像解析）。

3.3 結果

3.3.1 領域抽出の目的

土石流氾濫解析の前処理のために、3.1の1) 領域の抽出を対象とした検討を行う場合には、氾濫開始地点が存在する河谷地形から下流の低地までを容易に抽出できる手法を使えば、計算資源の活用や計算速度の観点から効率が良い。

3.3.2 結果

MMによる結果は、GRASS GIS 6.3を用いて処理した結果と比較する。

一般にGISを用いて領域を抽出する場合、氾濫開始地点を確認して氾濫すると考えられる領域を覆うマスク画像（ポリゴン）を作成しDEMとの共通部分を抽出する、あるいは、マスク画像を用意せずに氾濫開始地点を設定しその点より低い標高の領域を抽出する等の操作が行われる。この処理手順を比較すると、前者は氾濫開始地点を決定した後に対話的に領域を確定する複数点を選択して領域抽出処理を実行する必要があるのに対し、後者は1点のみを確定し処理を実行すればよい。一方、MMにおける領域分割操作は、1点を選択し、その1点が存在する集合を抽出する。

そこで、手順の手数を同数として、MMの領域分割操作とGISにおける上述の後者の処理を比較する。結果を図-5に示す。GISではgrey scale imageであるのに対し、MMではbinary scale imageであるが、抽出された範囲は同様である。この場合、両者の手法の違いは見られない。

次に、画像内に複数の大きな谷がある場合について検討する。図-6にDEMと解析結果を示す。DEM上の河谷地形中の黒丸を氾濫開始地点と想定する。この時、GISでは北の河谷地形と同時に南の谷も抽出しているのに対し、MMでは北の河谷地形のみ抽出

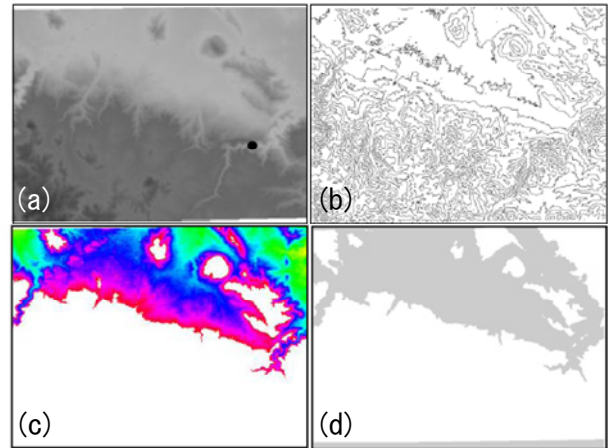


図-5 DEMと領域抽出結果（下流域の低地が一続きの場合）；

- (a) DEM
- (b) GISにより得られる等高線（参考）
- (c) GISによる抽出結果
- (d) MMによる抽出結果

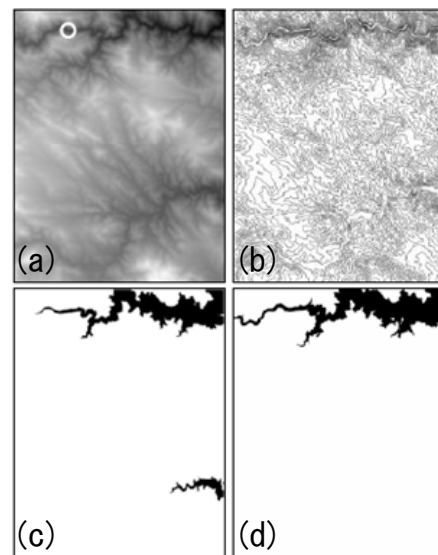


図-6 DEMと領域抽出結果（複数の河谷地形が離れている場合）；

- (a) DEM
- (b) GISにより得られる等高線（参考）
- (c) GISによる抽出結果
- (d) MMによる抽出結果

出することが可能である。従って、この結果を土石流氾濫解析の前処理として考えた場合、処理手順が同様であるにも関わらず抽出できる領域はMMの方がよいと判断できる。

4. おわりに

本研究では平成21年の防府市における土石流災

害を対象に、支川からの土砂の投入タイミングの影響について土砂流氾濫シミュレーションで検討した。その結果、今回の災害では河床勾配が緩い掃流区間において、側方から複数の土石流が流入したことにより扇状地の土砂氾濫被害が大きくなった可能性が示唆された。次に、土石流等の氾濫現象の解析へ適用することを想定して数理形態学を LiDAR などの地形データに適用した結果、数理形態学に基づいた方法を用いた方が GIS を用いるよりも効率的にかつ適切に河谷地形が抽出されている場合があることが分かった。

今後は、側方から流入する土石流と本川の合流点の挙動に着目するとともに、数理形態学の適用性を明らかにするべく、検討を進めていきたい。

謝辞

2 章の検討を実施するにあたり、国土交通省中国地方整備局には航空機レーザ測量成果を使用させて頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土石流災害対策検討委員会：土石流災害対策検討委員会報告書, 2010
- 2) 山越他: 平成 21 年山口豪雨災害時に剣川で発生した土石流に関する一考察, 平成 22 年度砂防学会研究発表会概要集, p596-597, 2010

Development of the method to estimate the area affected by hyper-concentrated flow in densely-populated mountainous watersheds

Budgeted: Grants for operating expenses,
General account

Research Period: FY2011 - 2014

Research Team: Volcano and Debris flow
Research Team

Authors: Tadanori ISHIZUKA, Atsuhiko
KINOSHITA, Koji MORITA, Takeshi
SHIMIZU, Teruyoshi TAKAHARA

Abstract: Recently, it often happens that landslide induced debris flows don't stop just on the fan but merging into the main stream. In that case, it often results in flooding of the wider area in the lower reach of the stream. It is necessary to develop the method to estimate the area affected by hyper-concentrated flow in densely-populated mountainous watersheds. In FY2012, we investigated the effect of timing of sediment input in the tributaries as boundary conditions on numerical inundation simulation of the hyperconcentrated flow and applicability of mathematical morphology to gridded digital elevation model in order to extract more information.

Key words: the place of link between main stream and tributary, hyperconcentrated flow, gridded digital elevation model, inundation simulation, mathematical morphology