

近似円錐面を用いた土石流扇状地上の微地形の可視化

矢澤優菜^{1,2}・小倉拓郎^{*、3}・原田駿介⁴・
八反地剛⁵・田中 靖⁶・土志田正二⁷

Visualization of microtopography of debris-flow fans using approximate conical surface

Yuna YAZAWA^{1,2}, Takuro OGURA^{*、3}, Shunsuke HARADA⁴,
Tsuayoshi HATTANJI³, Yasushi TANAKA⁵ and Shoji DOSHIDA⁶

Abstract

Microtopography of a debris-flow fan is a key to understanding the behavior of debris flow on it. However, recognizing the microtopography of debris-flow fans in urban areas is difficult due to modification by human activity. This study proposes a method to visualize the microtopography by creating a DEM that assumes the gradient from the fan apex to the fan toe is uniform (hereafter, approximate conical surface) and calculating the difference between the elevation of approximate conical surface (Z_s) and the real elevation based on airborne LiDAR DEMs (Z_{DEM}). This method was tested in two debris-flow fans where debris flow occurred in 2014 in Asaminami Ward, Hiroshima City. The shallow valleys in the urbanized debris-flow fans were clearly recognized as the areas

2022年12月27日受付, 2023年4月30日受理

- 1 筑波大学生命環境学群地球学類 (〒 305-0006 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
College of Geoscience, School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba (1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-0006, Japan)
- 2 (現所属) 株式会社インフォマテイクス (〒 212-0014 神奈川県川崎市幸区大宮町 1310)
currently, Informatix Inc. (1310 Omiyacho, Saiwai, Kawasaki, Kanagawa 212-0014, Japan)
- 3 兵庫教育大学学校教育研究科 (〒 673-1415 兵庫県加東市下久米 942-1)
Graduate School of Education, Hyogo University of Teacher Education (942-1 Shimokume, Kato, Hyogo 673-1415, Japan)
- 4 筑波大学大学院理工情報生命学術院生命地球科学研究群 (〒 305-0006 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
Graduate School of Science and Technology, Degree Programs in Life and Earth Sciences, University of Tsukuba (1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-0006, Japan)
- 5 筑波大学生命環境系 (〒 305-0006 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba (1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-0006, Japan)
- 6 駒澤大学文学部地理学科 (〒 154-8525 東京都世田谷区駒沢 1-23-1)
Faculty of Letters, Department of Geography, Komazawa University (1-23-1 Komazawa, Setagaya, Tokyo 154-8525, Japan)
- 7 消防研究センター (〒 182-8508 東京都調布市深大寺東町 4-35-3)
National Research Institute of Fire and Disaster (4-35-3 Jindaiji-higashi-machi, Chofu, Tokyo 182-8508, Japan)

* Corresponding author, E-mail: togura@hyogo-u.ac.jp

with low values of $Z_{DEM} - Z_s$. In addition, the major debris flows in the two fans run out on the roads along these shallow valleys. This analysis can be applied to any area with airborne LiDAR DEM, and must be a useful tool for estimating disaster risk on debris-flow fan.

Key words: *debris flow, disaster risk, LiDAR*

1. はじめに

土石流扇状地は、急勾配の河谷の出口でみられる土石流の堆積地形であり、沖積錐¹⁾とも呼ばれている。この区間では、勾配の減少と谷幅の拡大によって、土石流が減速・停止する条件になり、岩屑がその場に堆積する（高橋ほか，1988）。土石流が谷口を起点に首を振るように流路変動を繰り返すことで、土石流扇状地が形成される（大石・水谷，1969；笹・東，1976；水山・下東，1985；諏訪ほか，1985）。De Haas et al. (2018) は、日本を含む5か国16箇所の土石流扇状地を対象とした分析により、土石流となって流下してきた土砂が堆積して、次の土砂流入の際に堆積位置を変化させるという周期的変化が、扇状地の成長において重要であることを指摘した。一方、日本国内にはこのような自然状態の土石流扇状地のほか、住宅開発や農業などの目的で地形が改変されている土石流扇状地も多数存在する。宅地が造成されている土石流扇状地は、土砂災害が発生するリスクが高い地形である（平松ほか，2014；稲垣ほか，2016）。人工改変にはさまざまな事例があり、宅地造成や都市開発によって人工的に盛土や切土を施した、地形そのものの形状を大規模に改変した例や、建物の建設や水路の暗渠化などによって、自然状態の地形が見当たらなくなった例が挙げられる。よって、自然状態の周期的な変化とは異なる形状を示し、地形分類図を判読基準とした災害リスク評価が通用しない場合がある。したがって、人工改変された土石流扇状地上の災害リスクを、地形発達や地形分類図の判読以外の方法で検討することは極めて重要である。

土石流扇状地上の災害リスクを評価するために、土石流の流動シミュレーションによるリスクの可視化に関する研究が行われてきた（中谷ほか，2017）。高度なシミュレーションの結果から、土砂災害防止法（正式名称：土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律）に基づいて土砂災害警戒区域が設定され、ハザードマップによってそれらのリスクが可視化されるようになった。一方で、警戒区域内（特別警戒区域外）で建物や人に危害を及ぼすような事象に相当する規模の災害が生じたり、警戒区域外で災害が生じたりしたケースも報告されている（後藤・山中，2020）。ハザードマップの普及が進んでいることは大きな進展であるが、その情報だけで土石流扇状地上のリスクを認識するには限界がある。また、シミュレーションを用いればリスクを可視化できるものの、高度なシミュレーション技術を取り扱うことができる研究者・技術者は限られている。これらの状況から、ハザードマップやシミュレーション以外の手段でも、相対的にリスクの高い地域を可視化するツールが必要ではないかと考えられる。土石流の流動と微地形の関

係を検討することは、土石流扇状地上の相対的にリスクの高い地域を抽出する基礎データとなる。

近年、日本国内では航空レーザ計測成果が蓄積されている。国や地方公共団体はそれらの成果をオープンデータとして公開するようになり、高精細な地形情報が容易に取得できる環境が構築されつつある（鈴木ほか，2021）。航空レーザ計測成果の点群は密度が高いため、従来用いられてきた空中写真測量より細密な地形表現が可能である（横尾，2014）。代表的である微地形の表現方法として、尾根谷度と傾斜の値を用いた赤色立体地図（千葉ほか，2007）や、曲率と傾斜の値を用いたCS立体図（戸田，2014）が挙げられる。これらの表現手法は、土石流扇状地上の地形判読にも活用できる。しかし、これらの地形表現で対象としている地形の起伏は、土石流扇状地上の凹凸と比較すると大きいため、微地形を対象として既存の手法を用いると視認性に優れない可能性がある。火山学では、火砕流の流動について、実際の地形とモデルの地形との差分から、その地形現象の空間的な特徴を示す方法が用いられており（金子・鎌田，1992）、火砕流の到達域の予測に役立てた。同様の方法をさらに簡便化かつ改善することで、凹凸が小さい地形の可視化を実現できるのではないかと考えた。

そこで本研究では、航空レーザ測量データと扇状地の縦断面形から近似的に作成した円錐に近い地形面（以下、近似円錐面と呼ぶ）を利用した簡便な計算に基づき、人工改変された土石流扇状地上の微地形を可視化する方法を提案する。また、実際の土石流が流下・堆積した土石流扇状地にこの方法を適用し、土石流の流動と微地形の関係についても検討した。

2. 近似円錐面を用いた微地形分析方法

2.1. 対象地域

本研究では、広島県広島市安佐南区緑井に位置する2つの土石流扇状地AおよびBを対象とする（Fig. 1）。2014年8月19日夜から20日明け方にかけて、3時間雨量217.5 mmの降水があり、土石流が発生した（平成26年8月豪雨：気象庁，2014；海堀ほか，2014など）。ここは、いずれも住宅密集地であり、総務省が国勢調査の結果に基づき指定した人口集中地区（DID: Densely Inhabited District）となっている。この地域一帯では、1970年代から2010年代にかけて急勾配な箇所にて宅地造成と住宅建築が進んだ（山本・小林，2014；田中・中田，2018）。

2.2. 使用する地形データ

本研究では、2009年と2014年に航空レーザ測量をもとに作成された1 mメッシュの数値標高モデル（DEM: Digital Elevation Model, 2009年作成：DEM₂₀₀₉, 2014年作成：DEM₂₀₁₄）を使用した。それぞれのDEMの計測精度は、国土交通省が定める鉛直方向±25 cm程度、水平方向30 cm以内の基準を満たしている。DEM₂₀₀₉の計測日は2009年12

月8日～2010年3月14日である。DEM₂₀₁₄の計測日は2014年8月23～28日であり、平成26年8月豪雨による土砂災害の発災直後の状態を反映している。

2.3. 近似円錐の作成と $Z_{DEM} - Z_S$ の計算

赤色立体地図やCS立体図などの地形表現では、本研究で対象とする標高差の小さい土石流扇状地上の微地形を表現することは難しい。そこで、標高の最大値・最小値を利用した近似円錐面の標高データを作成した。まず、DEM₂₀₀₉およびDEM₂₀₀₉を用いて作成した傾斜量図を用いて、微地形を可視化する扇状地の範囲および扇頂・扇端線を判読した。DEM₂₀₀₉を用いて土石流扇状地の扇頂から扇端線の中点に2次曲線で縦断面図を描き、扇頂の垂線を軸として縦断面図を1回転させることで、扇面を描いた近似円錐面を作成した。また、近似円錐面とDEM₂₀₀₉の差分を求め ($Z_{DEM} - Z_S$)、平成26年8月豪雨による土砂災害以前の土石流扇状地の微地形を可視化した。なお、本手法で作成した2次曲線は、係数が無視できるほどに小さく、1回転した面もほとんど円錐とみなせるため、近似円錐面といった名称を採用した。

近似円錐面の標高データは、土石流扇状地の扇面を表す基準値を示している。特に $Z_{DEM} - Z_S$ が負の値をとる場合は、周囲の地形よりも凹みが顕著であることを示すことができる。以上の考え方でArcGIS Proを使って計算を行い、 $Z_{DEM} - Z_S$ を算出した。その概要をFig. 2に図示する。

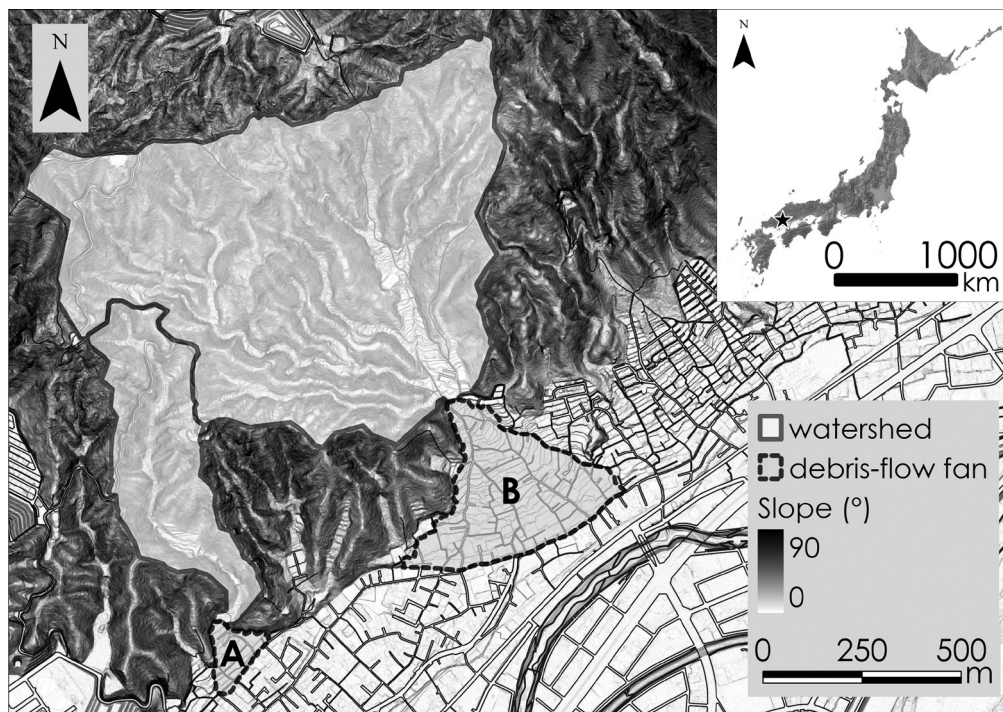


Fig. 1. Slope map based on 1-m resolution DEM of the study area.

2.4. 土石流の流下・堆積範囲のマッピング

発災前のDEM (DEM₂₀₀₉) と発災後のDEM (DEM₂₀₁₄) の差分を求めて、50 cm 以上の堆積部が確認できた箇所を抽出し、平成 26 年 8 月豪雨による災害によって発生した土石流の流下・堆積範囲を判読し、記入した。標高変化のみを基準として判読を実施すると、発災後 1 週間程度の土砂の除去や盛り上げ等の人工改変の影響を加味してしまう可能性がある。そこで、発災直後の空中写真 (2014 年 8 月 28 日国土地理院撮影) から巨礫や流木の存在を土石流の流下の証拠として、判読結果の確認を行った。判読には、諏訪・奥田 (1973) で指摘されている土石流先頭部に石礫の集中が認められる特徴や、土石流扇状地を流下する間にそれぞれの時点での最大径級の岩塊を残留する特徴を利用した。

3. 結果—微地形の可視化と土石流の流下・堆積状況

3.1 土石流扇状地 A の微地形の可視化と土石流の流下・堆積状況

土石流扇状地 A の $Z_{DEM} - Z_S$ の値と土石流の流下・堆積状況を Fig. 3 に示す。土石流扇状地 A を流れる溪流は、山地から扇頂部へ出るところで大きく湾曲している。土石流扇状地 A では、扇頂部から南東方向に、浅い谷地形が分布する。南方向の微高地が、この

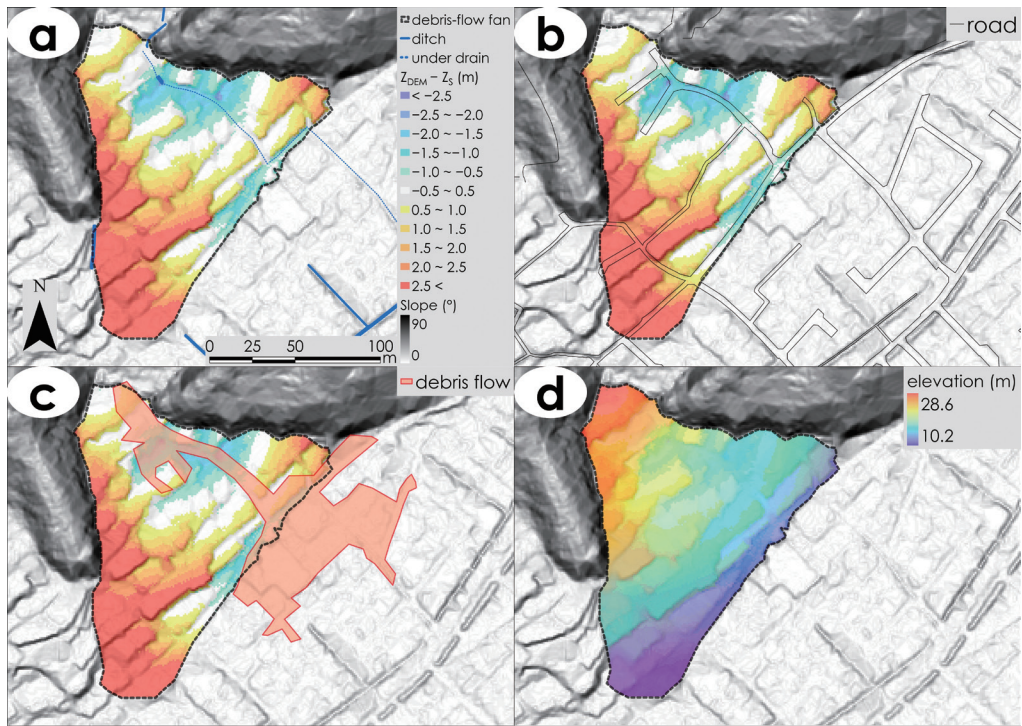


Fig. 3. $Z_{DEM} - Z_S$ maps in debris-flow fan A. (a) $Z_{DEM} - Z_S$ with ditch and under drain, (b) $Z_{DEM} - Z_S$ with road, (c) $Z_{DEM} - Z_S$ with extent of debris flow, (d) elevation map.

土砂災害以前に発生した過去の土石流の堆積物であると仮定すると、平成 26 年 8 月豪雨の土石流は過去の堆積物を避けるように流下した可能性がある。この谷の地形は、 $Z_{DEM} - Z_s$ が負の値になる領域として表現されている。扇頂部から南方向（西側）の $Z_{DEM} - Z_s$ が正の値になる領域が広い (Fig. 3a)。南東側の領域には、土石流扇状地に造成された住宅地へのアクセス道路が存在しており、扇状地 A の上流から続く流路は扇状地上では暗渠となり、この道路の下を流れている (Fig. 3b)。この土石流扇状地において平成 26 年 8 月豪雨で発生した土石流は、 $Z_{DEM} - Z_s$ が負の値を示す領域に流下した (Fig. 3c)。以上のことから、平成 26 年 8 月豪雨による土砂災害時、土石流扇状地 A に流入した土石流は扇頂部から南東方向にある暗渠化した浅い谷に沿って流下し、土石流扇状地 A の範囲を越えて流向方向に直交する方向に拡散して堆積したと推定できる。

3.2. 土石流扇状地 B の微地形の可視化と土石流の流下・堆積状況

土石流扇状地 B の $Z_{DEM} - Z_s$ の値と土石流の流下・堆積状況を Fig. 4 に示す。この土石流扇状地上の人工水路は、扇頂から南東方向と南方向に 2 本ある (Fig. 4b)。このうち南東方向の扇状地の縁に沿う水路が主流であるが暗渠になっており、その上にも道路がつけられていた。土石流扇状地 B では扇頂から南東方向に $Z_{DEM} - Z_s$ がプラスの値になる領域が分布していた。この領域は、扇頂部にロウブ形状が明瞭になっており、過去の土石流堆

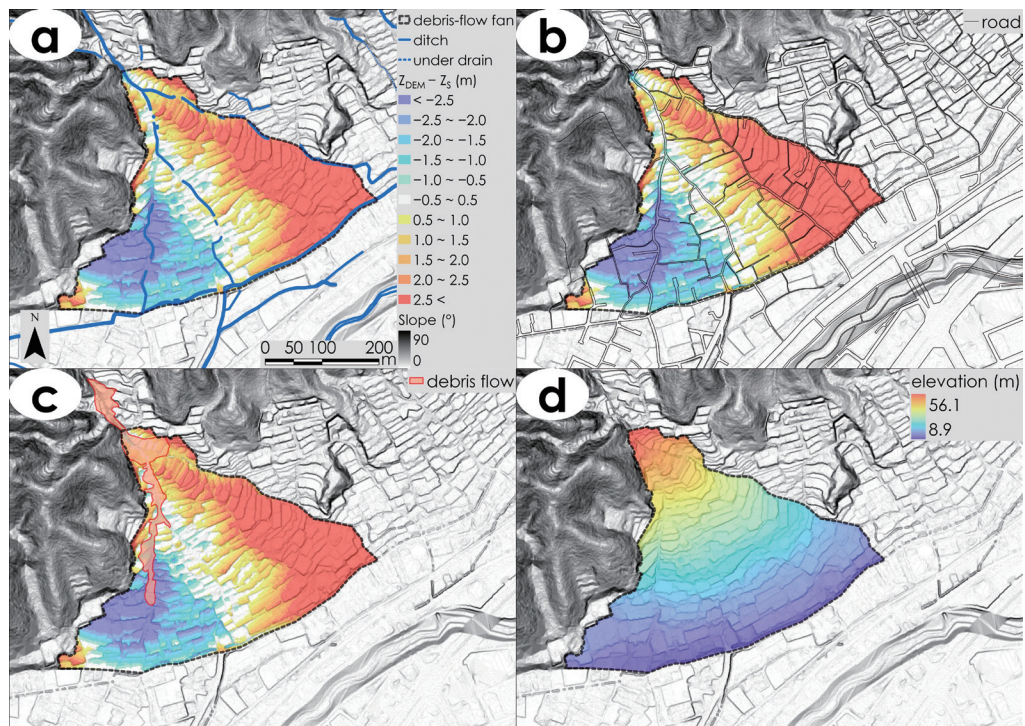


Fig. 4. $Z_{DEM} - Z_s$ maps in debris-flow fan B. (a) $Z_{DEM} - Z_s$ with ditch and under drain, (b) $Z_{DEM} - Z_s$ with road, (c) $Z_{DEM} - Z_s$ with extent of debris flow, (d) elevation map.

積物である可能性が高い。扇頂から南方向の $Z_{\text{DEM}} - Z_{\text{S}}$ が負の値になる領域は、人工改変を受けていない谷として判読できる。(Fig. 4a)。平成 26 年 8 月豪雨による土砂災害の発災時、土石流扇状地 B の扇頂部に流入した土石流は、扇頂部分で広がって堆積し、南方向に流下した。以上のことから、土石流の主流は南方向に流れ、そのまま道路に沿って扇端の近くまで流下したと推定できる。

4. 考察 — 微地形の可視化と災害リスク —

土石流扇状地 A、B のいずれも、土石流は $Z_{\text{DEM}} - Z_{\text{S}}$ の値がマイナスである浅い谷の方向に向かって流動した。この傾向は自然状態の土石流扇状地において報告された発達プロセスと本質的に同様である。浅い谷の暗渠化・埋め立てや道路や建物の建設によって、自然状態の地形を確認できなくなった土石流扇状地であっても、元の地形の凹凸が残存している場合は、人工改変の影響を受けずに自然状態の土石流扇状地と同じ方向に流れる。つまり、宅地造成前の自然状態の土石流扇状地の扇面形状が土石流の挙動に影響するということである。これは、自然状態の土石流扇状地上を流動する土石流が相対的に標高の低い領域に向かって流動・堆積するという傾向と同様であるためである（諏訪ほか, 1985; De Haas et al., 2018)。

土石流扇状地 A と B では、水路の方向と土石流扇状地が流下した方向が同一である、または異なるといった違いがある。土石流扇状地 A では、主要な水路が浅い谷に沿っている。こうしたことから、災害発生前の時点でも南東方向に土石流が流下する可能性が高いことを想定しやすいと考えられる。土石流扇状地 B では、土石流が南東方向の本流の水路ではなく、南方向に伸びる谷底に沿って建設された道路に沿って流下した。これは、土石流扇状地 B の主要な水路が $Z_{\text{DEM}} - Z_{\text{S}}$ が正の値を示す箇所にあるため、盛り上がった場所を避けて流下したためである。

土石流の流動方向を推測する際に、水路の存在を基準に判断すると、危険性の高い地域を誤認してしまう可能性がある。土石流扇状地 B の場合、既存の主要水路に基づいて土石流の流動方向を推測すると、危険性の高い地域を誤認する可能性がある。土石流扇状地 B の $Z_{\text{DEM}} - Z_{\text{S}}$ の値の分布図 (Fig. 4) から、南方向に伸びる浅い谷は、 $Z_{\text{DEM}} - Z_{\text{S}}$ が負の値を示しており、土石流が流下する可能性が高いことが読み取れる。

土石流扇状地上のわずかな凹凸などの微地形は、対象とする地形の標高分布における最大値・最小値の幅が小さいため、一般的に利用されている標高段彩図 (Fig. 3d, Fig. 4d) では判別がつきにくい。本研究が提示する簡便な方法は、近似円錐面を基準とした比高を表しているため、基準面からの高低差を小さく示すことができる。よって、数十 cm オーダーの高低差を鮮明に示すことができる。

5. ま と め

本研究で対象とした人工地形改変を受けていた土石流扇状地では、地形判読に標高段彩図を用いた場合、土石流扇状地上の浅い谷や微高地などの微地形を判読するのは困難である。しかし、近似円錐面と標高データから作成した $Z_{DEM} - Z_S$ の値を用いることで、特に起伏の小さい微地形の凹凸の判読が容易になる。平成 26 年 8 月豪雨で広島市において発生した土石流は、主流路だけではなく、土石流扇状地上の浅い谷を流下したことが読み取れた。

今後、全国的な LiDAR データのさらなる整備に伴い、多くの地域において本研究と同様な解析を行えば、人工地形改変を受けた扇状地上の微地形判読の精度を向上させることが可能である。この手法は、被災危険性の高い場所を抽出する上で有用な方法になる可能性がある。

注

1) 土石流扇状地と沖積錐の 2 つの用語は同じ意味で使用されているが、それらの用法や違いについては議論がある (高場, 2022)。日本では沖積錐の用語が定着しているが、海外では土石流扇状地 (debris-flow fan: De Haas et al., 2018) の用語が通常使用されていることから、本稿では、土石流扇状地を用いることにした。

謝 辞

本稿は、著者の一人である矢澤が 2021 年度に筑波大学生命環境学群地球学類へ提出した卒業論文を骨子とし、大幅に加筆修正したものである。研究対象地の LiDAR データは、国土交通省中国地方整備局太田川河川事務所から提供していただいた。本稿に対し、匿名査読者のコメントによって内容が大幅に改善された。御礼申し上げます。

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費基盤研究 (B) 19H01371・22H00750 (代表：八反地 剛)、科学研究費若手研究 22K13777 (代表：小倉拓郎) の助成を受けて実施した。

引 用 文 献

- 千葉達朗・鈴木雄介・平松孝晋 (2007) 地形表現手法の諸問題と赤色立体地図：地図, **45**(1), 27-36.
- De Haas, T., Densmore, A.L., Stoffel, M., Suwa, H., Imaizumi, F., Ballesteros-Cánovas, J.A., and Wasklewicz, T. (2018) Avulsions and the spatio-temporal evolution of debris-flow fans: *Earth-Science Reviews*, **177**, 53-75. doi:10.1016/j.earscirev.2017.11.007
- 後藤秀昭・山中 蛍 (2020) 平成 30 年 7 月豪雨による広島県南部の建物被害と土砂災害の指定区域：地理科学, **75**, 100-108.
- 平松晋也・福山泰治郎・山田 孝・逢坂興宏・中谷加奈・松本直樹・藤村直樹・加藤誠章・島田

- 徹・久保毅・松尾新二郎・西尾陽介・吉野弘祐（2014）平成26年7月9日長野県南木曾町で発生した土石流災害：砂防学会誌, **67**(4), 38-48.
- 稲垣秀輝・大野博之・磯部有作（2016）平成26年8月広島土砂災害の土石流粒度構成の違いによる沖積錐の形成過程：日本地すべり学会誌, **53**, 185-195.
- 海堀正博・石川芳治・里深好文・松村和樹・中谷加奈・長谷川祐治・松本直樹・高原晃宙・福塚康三郎・吉野弘祐・長野英次・福田 真・中野陽子・島田 徹・堀 大一郎・西川友章（2014）2014年8月20日に広島市で発生した集中豪雨に伴う土砂災害：砂防学会誌, **67**(4), 49-59.
- 金子隆之・鎌田桂子（1992）Energy Line/Coneによる雲仙火山1991年火砕流到達域の検討：火山, **37**, 35-46.
- 気象庁（2014）災害時気象速報平成26年8月豪雨：気象庁災害時自然現象報告書, **4**, 1-186.
- 水山高久・下東久巳（1985）土石流扇状地の地形と土石流の堆積氾濫：新砂防, **37**(6), 11-19.
- 中谷加奈・小杉 恵・里深好文・水山高久（2017）家屋や道路が土石流の氾濫・堆積に及ぼす影響—2014年8月に発生した広島土砂災害を対象として—：砂防学会誌, **69**(5), 3-10.
- 大石道夫・水谷武司（1969）地形条件からみた扇状地の土砂災害について：国立防災科学技術センター研究報告, **2**, 45-55.
- 笹 賀一郎・東 三郎（1976）扇頂部における土石流堆積と流路変動：日本林學會北海道支部講演集, **24**, 15-18.
- 諏訪 浩・奥田節夫（1973）土石流先端における巨礫の運動および先端形状について：京都大学防災研究所年報, **16B**, 425-432.
- 諏訪 浩・志方隆司・奥田節夫（1985）焼岳上々堀沢の地形変化過程：新砂防, **37**(5), 14-23.
- 鈴木雄介・杉本直也・増田慎一郎・原口 強（2021）土砂災害時の点群データ活用と地形画像診断の提案—2021年7月熱海土石流災害を例として—：都市防災研究論文集, **8**, 13-18.
- 高場智博（2022）土石流堆積物からなる扇状地形の名称について：日本地形学連合発表要旨集, **3**, 25.
- 高橋 保・中川 一・佐藤広章（1988）土石流および土砂流扇状地の形成に関する研究：第32回水理講演会論文集, **32**, 497-502.
- 田中 圭・中田 高（2018）2014年広島土石流災害による建物被害の立地分析：地理学評論, **91**, 62-78.
- 戸田堅一郎（2014）曲率と傾斜による立体図法（CS立体図）を用いた地形判読：森林立地, **56**, 75-79.
- 山本晴彦・小林北斗（2014）2014年8月20日に広島市で発生した豪雨と土石流災害の特徴：自然災害科学, **33**, 293-312.
- 横尾泰広（2014）航空レーザ測量の概説と最新動向：フォレストコンサル, **137**, 17-25.