

令和元年6月19日現在

機関番号：82665

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K16382

研究課題名（和文）降雨による斜面災害現場における2次崩壊発生危険度評価手法に関する研究

研究課題名（英文）Evaluation of secondary slope failure susceptibility at slope disaster sites which occurred by rainfall

研究代表者

土志田 正二（Doshida, Shoji）

総務省消防庁消防大学校（消防研究センター）・その他部局等・研究員（移行）

研究者番号：20526909

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：降雨により発生した斜面災害現場において、安全な探索・救助活動を行うためには、二次崩壊の危険性を考慮する必要がある。本研究では過去発生した二次崩壊による被害事例を収集し、その特徴を類型化ならびに発生メカニズムの解明を行い、災害初動期に考慮すべき情報について明確にすることを試みた。特に2014年広島豪雨災害において二次崩壊が発生した安佐北区可部東の崩壊事例の解析を行った。また斜面災害発生直後（二次崩壊発生前）の地形情報を収集する方法及びその地形情報を用いた迅速な二次崩壊発生危険地域を評価する方法の考察もを行い、ドローン空撮情報から作成される地形データの有効利用方法を考案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

降雨による土砂災害現場における二次崩壊現象は、探索・救助活動を行う上で危険性が高い。安全な探索・救助活動を行うためには二次崩壊現象を整理し、対策を考案することは学術的・社会的にも重要である。本研究では、二次崩壊現象を過去の事例からいくつかのパターンに分けて整理し、その対策について考察した。特に災害直後の探索・救助活動現場を想定し、時間軸を考慮した地形解析方法の考案は、既存の研究には無い学術的意義や社会的意義があったと自負している。本研究で用いたドローン空撮情報を用いた地形解析は、今後の災害現場の安全な探索・救助活動において重要な役割を示すものであり、今後の発展も期待される。

研究成果の概要（英文）：At slope disaster sites, such as a catastrophic landslide, a slope failure and a debris flow, we have to consider the danger of secondary slope failure in order to carry out safe search and relief activity. However, it was very difficult to acquire sufficient information for carrying out safe activity at the moment of the first response, and we had to carry out the old relief activity for depending on a few information. In this research, we collect the disaster examples of secondary slope failure which caused by rainfall, analyze the feature of the secondary slope failure, and clarify information required at the moment of the first response for safe search and relief activity. In particular, we collect and measure the detailed topographic data immediately after first slope disaster (before secondary slope disaster), and evaluate the secondary slope failure susceptibility using the detailed topographic data.

研究分野：災害地形学

キーワード：二次崩壊現象 崩壊発生危険地域評価 地形解析 LiDAR ドローン

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

降雨により発生した斜面崩壊や土石流などの斜面災害現場において、二次崩壊に警戒することは要救助者の探索・救助活動を安全に行ううえで必要不可欠である。日本国内において斜面崩壊発生後の探索・救助活動中に発生した二次崩壊による被害としては、最大の被害と言われる1972年高知県香美市で発生した繁藤災害(昭和47年7月豪雨、二次崩壊による死者59名)や、2004年長野県岡谷市で発生した土石流災害(平成18年7月豪雨)、2014年広島豪雨により広島県安佐北区で発生した土砂災害(平成26年8月豪雨)などが挙げられる。これらの事例以外にも、二次崩壊により多数の人的・物的被害が発生しているほか、被害が確認されなかったが危険な状態にあった事例も多数発生している。

2. 研究の目的

降雨により発生した斜面崩壊や土石流などの斜面災害現場において、安全な探索・救助活動を行うためには、二次崩壊の危険性を考慮する必要がある。しかし最も救助活動が必要とされる災害初動期においては、安全対策を行うための十分な情報を得ることが難しく、現場の感覚に基づいて救助活動を行ってきた事例がほとんどである。本研究では過去発生した二次崩壊による被害事例を収集し、その特徴について類型化及び発生メカニズムの解明を行い、災害初動期に考慮すべき情報について明確にすることを目的とした。また斜面災害発生直後(二次崩壊発生前)の地形情報を収集する方法、及びその地形情報を用いて迅速に二次災害発生危険地域を評価する方法の考案を行った。

3. 研究の方法

3-1. 過去の二次崩壊現象の収集(サブテーマ1)

本研究では過去発生した二次崩壊による災害事例を収集し(表-1)、その特徴について現地踏査ならびに文献調査、ヒアリングを実施することで二次崩壊現象を整理した。二次崩壊現象の整理は、災害初動期における二次崩壊発生危険地域を評価するために必要となる情報を明確にするために重要である。

3-2. 近年発生した二次崩壊現象の発生メカニズムの解明(サブテーマ2)

二次崩壊の発生メカニズムを解明するため、2014年8月20日に広島県広島市で発生した土石流災害における斜面崩壊を研究対象とし調査を行った。研究対象とした崩壊は、安佐北区可部東で発生した崩壊(可部東崩壊)であり、二次崩壊により救助活動中の消防職員を含む2名の死者が出た現場である。可部東崩壊は流送部を含め全長400m、幅10~15mと細長い崩壊であった。可部東崩壊の災害前後の航空レーザ測量(LiDAR)データの差分図を図-1に示す。寒色系が侵食地域、暖色系が堆積地域を示しており、崩壊が発生した沢

表-1 二次崩壊の事例及び土砂災害が遅れて発生した事例(新井場ほか(2016)¹⁾を一部修正・加筆)

| 年月日 | 場所 | 初めの災害の誘因 | 初めの現象 | 続いて発生した現象 | 概要 |
|----------------|----------------|-----------|--------------|-----------|---|
| 1972年7月5日 | 高知県土佐山田町繁藤 | 降雨 | 崩壊 | 地すべり | 6.45頃に発生した崖崩れによる行方不明者救助活動中の消防団員等60名が10.55頃に発生した大規模な崩壊に巻き込まれる。 |
| 1976年9月13日 | 兵庫県宍粟市一の宮町福地 | 降雨 | 土石流 | 地すべり | 6.50に発生した崩壊で6名生き埋め(うち3名救出)。その後作業中に上方山腹に亀裂を発見一撤退。9時頃大規模に崩壊(二次的な被害は無し)。 |
| 1978年6月14日 | 仙台市北根一念坊 | 地震 | 亀裂 | 崩壊 | 地震の2日後に水道の漏水が緩んだ地盤に浸透して斜面が崩壊した。 |
| 1978年6月22日 | 仙台市南黒松、仙台市旭ヶ丘2 | 地震 | 亀裂 | 崩壊 | 地震の10日後に降雨により石垣が崩壊した。 |
| 1989年8月1日 | 川崎市高津区蟹ヶ谷248 | 降雨 | 崩壊 | 崩壊 | 3.15頃に発生したがけ崩れの行方不明者3名の捜索救助活動中の消防隊員が4.20頃発生した発生したがけ崩れに巻き込まれた(3名死亡12名負傷)。 |
| 1995年1月18日~19日 | 兵庫県津名町高滝 | 地震 | 亀裂 | 地すべり | 17日5:46に発生した兵庫県南部地震の後18日深夜から19日にかけて地すべりとなり50~60m移動した。 |
| 1997年8月28日 | 北海道島牧村 | 2~3週間前降雨? | 崩壊 | 崩壊 | 8月25日に国道229号線第二白糸トンネル坑口で岩盤崩落。警察消防等が捜索活動を実施中、28日13:32に再度崩壊が発生した。1時間20分前から落石頻度が増加したため、撤退後であり被害無し。 |
| 2000年10月9日 | 鳥取県日野町貝原 | 地震 | 崩壊(?) | ?(泥流) | 10月6日13:30に発生した鳥取県西部地震時にJRRの線路の一部に土砂が堆積した。2日後の昼頃、泥流状の土砂が流出して来て線路を超えて国道まで到達した。 |
| 2000年7月 | 東京都神津島物忌奈命神社裏山 | 地震 | 崩壊 | 崩壊 | 7月1日に震度6弱の地震があり、斜面の一部が崩壊していたが、9日には大規模に拡大していた。7~8日の連続雨量285mmの降雨によるものと見られる。 |
| 2000年7月 | 東京都神津島集落東縁 | 地震 | ? | 崩壊 | 7月1日の震度6弱の地震時には崩壊していなかったが9日には崩壊していた。7~8日の連続雨量285mmの降雨によるものと見られる。 |
| 2003年7月20日 | 熊本県水俣市内川集地区 | 降雨 | ? | 土石流 | 水防活動中の消防団員3名が4.20頃発生した土石流に巻き込まれ死亡。 |
| 2006年7月19日 | 長野県岡谷市湊地区 | 降雨 | 洪水(土石流?) | 土石流 | 出水に対応中の消防団員が土石流に巻き込まれて死亡。 |
| 2007年7月15日 | 宮城県白石市小原 | 降雨 | 道路脇の崩壊 | 地すべり | 降雨により道路脇崩壊発生の連絡を17:15頃受けた消防団員3名が確認に向かったところ、大規模に滑動を始めた地すべりと共に数百m流された(無傷)。地すべりから脱出して民家にたどり着いたのは18:27。 |
| 2014年8月20日 | 広島県安佐北区可部東6 | 降雨 | 土石流 | 土石流 | 4時頃に土石流発生による救助要請があり5時頃に救助活動中の消防隊員及び住民1名が後続の土石流に巻き込まれて死亡。 |
| 2014年8月20日 | 広島県安佐南区長東西4 | 降雨 | ? | 崩壊 | 降雨が停止して約2時間後に斜面が崩壊(近隣の崩壊が通報されたのは3時間前)。 |
| 2017年7月6日 | 大分県日田市小野地区 | 降雨 | 河岸侵食による崩壊(?) | 崩壊 | 前日の降雨ピーク(7/5 21:00頃)から約13~14時間後の7/6 10:30に崩壊。崩落した土砂により、小野川がせき止められ土砂ダムが形成された。被害状況確認中の消防団員1名が死亡。 |

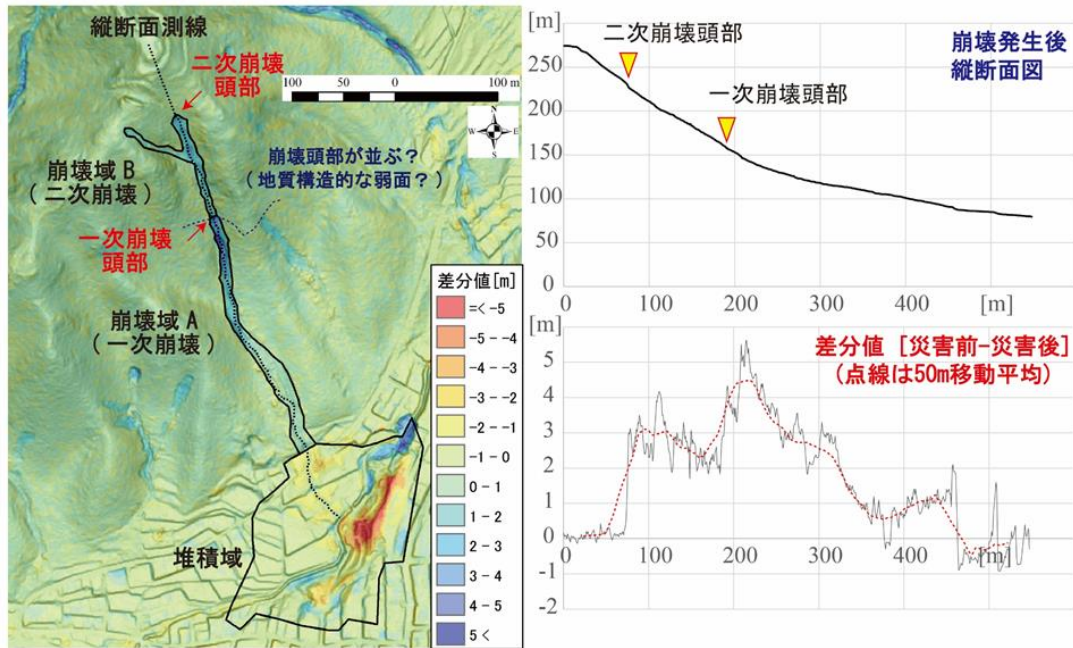


図-1 2014年広島市安佐北区可部東で発生した崩壊の地形解析^{2),3)}
(崩壊発生前後のLiDARデータの差分値)

の差分値(図1右下)は2つのピークを持っていることがわかる。これが一次崩壊頭部と二次崩壊頭部を示している(図1右上)と考えられる。現地踏査の結果、斜面中腹部で発生した一時崩壊は石礫の多い土石流であり、尾根近傍で発生した二次崩壊は水を多く含む泥主体の土石流であった。ただし、二次崩壊発生時にはほぼ降雨が無かったため、地下水による影響が強かったと想定される。現地では、崩壊頭部近傍の尾根に過去の城跡があることから、人工改変地形が地下水挙動に影響を与えている可能性も考えられた。以上のことから、地下水が関与する土石流は、降雨のピークから時間差をもって発生する恐れがあることに注意しなければならない。また中腹部に崩壊源頭部がある崩壊は、更に上流部が崩れる可能性があるため警戒が必要である。

4. 研究成果

4-1. 過去の二次崩壊現象の類型化(サブテーマ1)

収集した二次崩壊の災害事例を基に、二次崩壊現象の類型化を行った。二次崩壊による被害は大きく分けて3種類(土砂ダムが決壊による大規模な二次災害現象を含めると4種類)に分類される。①崩壊・地すべりの広範囲拡大(例:1972年繁藤の大規模崩壊)、②崩壊発生地と別の支流(沢)から発生する崩壊・土石流(例:2006年長野県岡谷市湊地区の土石流)、③崩壊発生地と同じ支流(沢)から発生する崩壊・土石流(例:2014年広島市安佐北区可部東の崩壊)である。上記、3種類の二次崩壊現象を警戒するためには、①に関しては亀裂・クラック等の微地形変位を確認することが重要であり、②は、支流(谷・沢)がどのように分布しているのかを把握すること(数値地形データを用いた流路網の作成)や、斜面崩壊分布範囲を確認すること、③は流路網の作成、斜面崩壊分布範囲の確認(特に崩壊頭部の位置)、ならびに溪流内の二次堆積物の確認が重要となる。また土砂ダムの形成や、降雨のピークから時間差をもって発生する崩壊に関しては、地下水を集めやすい地形や地質構造など、広域の地すべり・崩壊の危険度評価が重要となる。以上を踏まえると、二次崩壊現象を警戒するためには、災害発生前後の地形データを如何に取得し、活用するかが重要となる。

4-2. 迅速な二次災害発生危険地域の評価(サブテーマ2)

災害発生直後に取得できる可能性が高く、二次災害の危険地域を抽出するために利用可能なデータは地形データである。そこで日本国内において利用可能な様々な地形データを収集し、そのデータの仕様と二次崩壊危険地域抽出への利用方法について検討を行った。地形データを評価するために参考事例としたのは2014年広島豪雨災害における可部東崩壊である(図-2)。使用した地形データは、全国整備されている国土地理院基盤地図情報の10mメッシュ地形データ、災害前後の航空レーザ測量(LiDAR)データ、無人航空機(ドローン)による空撮画像から作成した災害後の地形データである。災害後のLiDARデータは、災害発生5日後と10日後(2016年8月25日、30日)に中国地方整備局により測量されたものであり、ドローンによる空撮は約10ヵ月後の2015年6月に実施したものである。ただドローンによる空撮は天候・装備次第では災害直後でも可能である。また本研究で使

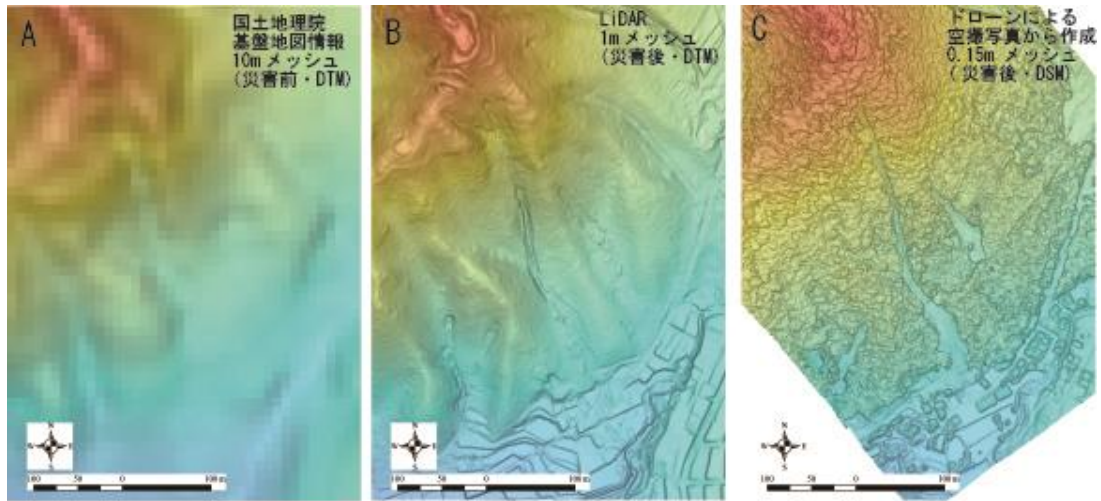


図-2 2014年広島豪雨災害による可部東崩壊周辺の地形データ(範囲・縮尺は同一) 4)

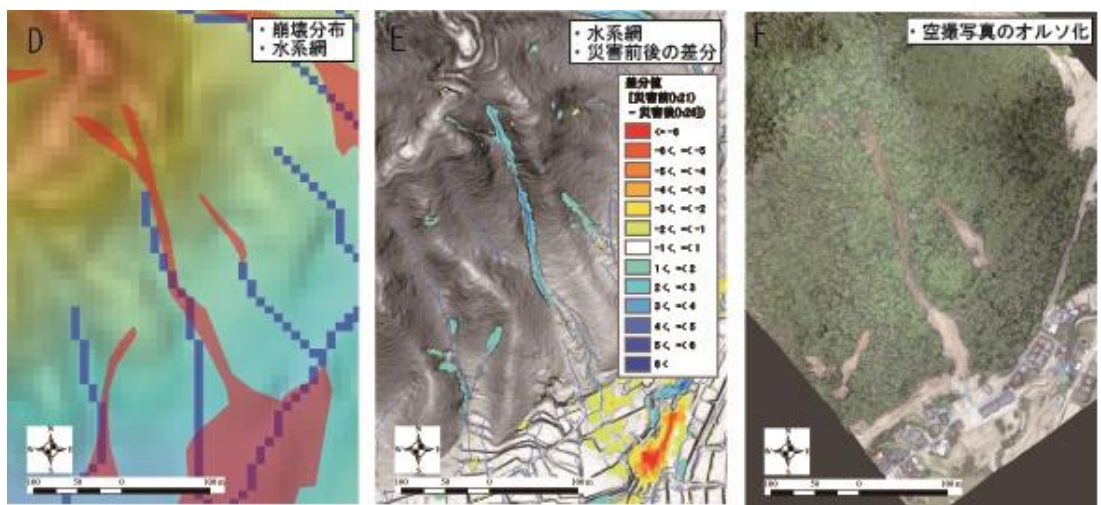


図-3 2014年広島豪雨災害による可部東崩壊周辺の地形データを用いた解釈図 4)

表-2 各地形データの仕様と二次崩壊危険地域抽出への利用 4)

| | 国土地理院 基盤地図情報 [10mメッシュデータ] | 航空レーザ測量 (LiDAR) | 無人航空機による 空撮画像から 作成した地形データ |
|--------------------------|--------------------------------------|--|--|
| 災害前のデータ | 日本全国有 | データアーカイブ有 (国交省及び航測会社) | 現状ほぼアーカイブ無し |
| 災害後のデータ | 基本取得不可 | 数日～数週間程度で取得可 (天候・機体次第) | 災害直後(数時間程度)に取得可 (天候・装備次第) |
| データ解像度 | 10mメッシュ | 基本 0.5～2mメッシュ | 空撮画像の解像度, 空撮高度次第 (数cm～数十cmメッシュ) |
| データの種類(DSM, DTM) | 1/25000地形図から 作成されているため、基本DTM | DSM, DTM どちらも取得可 | 基本DSM |
| 一度の測量における データ取得範囲(概算) | 全国可能 | 固定翼、回転翼で異なる(数km～ 数十km四方程度) | 無人航空機の種類・空撮高度次第 (Phantom3で 400～500m四方程度) |
| 二次崩壊危険地域 の抽出への利用 | ・広域の危険地域(地すべり地形など) の確認 ・流路網の作成 | ・流路網の作成 ・斜面崩壊範囲の確認 ・亀裂、クラック等の微地形変位の確認 ・災害前後の地形情報の差分(溪流 内の二次堆積物の堆積状況、被害 範囲の確認など) | ・流路網の作成 ・斜面崩壊範囲の確認 ・亀裂、クラック等の微地形変位の確認 ・安全な移動ルート、活動時の退避 場所の設定 |
| その他 (他の情報と連動して活用) | ・広域的な危険性の確認 (対象地域外の土砂ダムなど) | ・広域的な危険性の確認 (対象地域外の土砂ダムなど) | ・オルソ画像などとの比較による可視 的な危険地域の抽出 |

用した国土地理院データ及び LiDAR データは DTM (数値地形モデル: Digital Terrain Model)、ドローン空撮による地形データは DSM (数値表層モデル: Digital Surface Model) となっている。DTM は樹木が含まれないため崩壊周辺地形の微地形が詳細に表れており、DSM は樹木の有無が明確であるため、崩壊により露岩した地域が明瞭である。

可部東崩壊における二次崩壊による被害は、一度目の崩壊が発生した同じ沢から再度土石流が発生したことが原因である。そのため、可部東崩壊のような救助活動現場では、谷

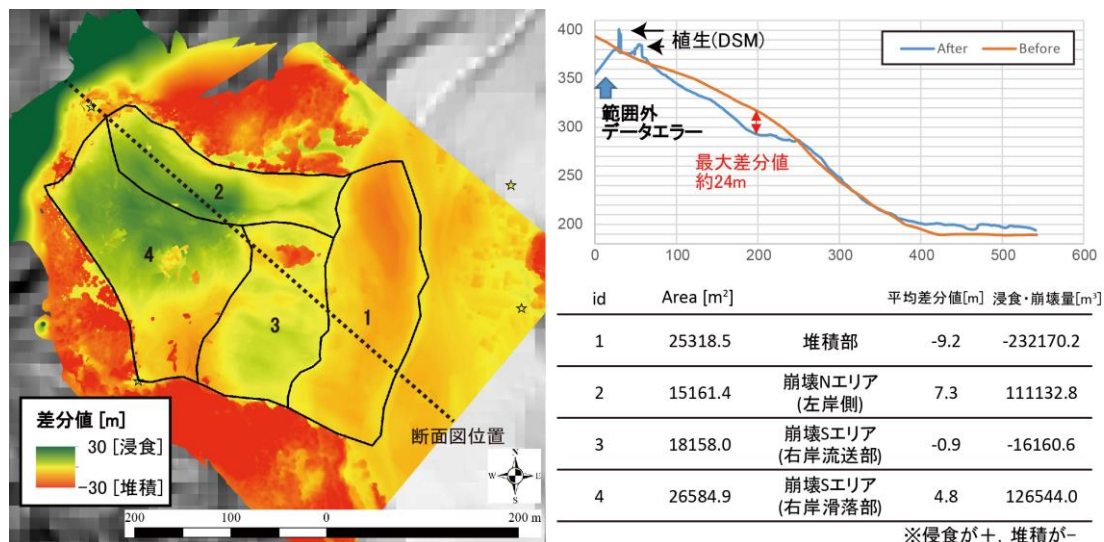


図-4 2017年九州北部豪雨による日田市小野地区の崩壊前後の標高差分図 5), 6)

地形の分布を確認することが重要となる。図-3に10mメッシュデータ(D)、LiDARデータ(E)から作成した水系網を表示しているが、10mメッシュデータでは谷の大まかな流下方向はわかるものの、安全管理を行う上では十分な精度とは言い難い。逆にLiDARデータから作成された水系網は詳細であり、安全管理に十分使用可能である。また図-3Eにおいて、災害前後のLiDARデータの差分値も表示しているが、これは溪流内における二次堆積物の有無などの情報を得ることが可能である。ただしLiDARデータの取得は災害発生から数日～数週間程度かかることが一般的なため、災害直後に利用可能となる事例は少ない。またドローン空撮による地形データはDSMのため樹木地域の水系網の作成には使用できないが、崩壊分布の把握(露岩地域の抽出)などに利用可能である。各地形データの仕様及び二次崩壊に対し利用する方法について考察したまとめを表-2に示す。

図-4は2017年九州北部豪雨により発生した日田市小野地区の崩壊(小野崩壊)を研究対象としたものである。小野崩壊は、降雨ピークから約13～14時間後に発生した大規模崩壊であった。小野崩壊が発生する前には、河岸侵食による小規模な崩壊が発生していたとの情報もあることから、本災害は崩壊・地すべりの広範囲拡大の事例である。現地踏査の結果、小野崩壊の斜面上部には地すべり地形が分布しており、この地すべり地形が集水域の役割を示し、降雨ピークから時間差がある崩壊が発生した原因の一つであると推測された。図-4は、災害発生後にドローン空撮を実施し作成した数値標高モデル(0.2mメッシュデータ・DSM)と、災害発生前の地形データである国土地理院基盤地図情報10mメッシュデータを比較し、差分値を算出したものである。この差分値は、解像度の異なる地形データを比較していること、ドローンから作成した地形データが正確なGCP(ジオコントロールポイント)で補正できていないことから数cmの精度を持つことは難しいが、災害概要を把握するためには十分活用することができる。差分結果から崩壊地は4つの区域に地形分類ことができ、小野崩壊は2つの崩壊による災害であることがわかった。災害現象を正確に把握することは、二次崩壊発生危険地域を推測するためにも重要である。

災害発生直後において最も手に入りやすいデータは地形データである。地形データを活用することで、二次崩壊の発生危険地域の推定のみならず、探索・救助活動時の移動し易いルート選択や、救助活動時の安全な退避場所の選定などが期待できる。本研究では特にドローン空撮画像による地形データを活用することで、二次崩壊の発生危険地域を推定する方法を考察した。災害発生直後のドローン空撮画像による地形データは、崩壊発生場所やその周辺地域の特徴を明確にするだけでなく、災害前の数値地形データ(国土地理院基盤地図情報やLiDARアーカイブデータ)と比較し差分を取ることで崩壊現象自体を推定することも可能である。ただし、ドローンから作成された地形データは基本DSMであるため差分を算出する際にはその解釈には注意を必要とする。今後、二次崩壊による被害を少なくするためには、データ解析手法の開発のみならず、データ取得時間の短縮も考える必要がある。

<引用文献>

- 1) 新井場公德・土志田正二・佐伯一夢, 2014年8月広島市において発生した降雨停止後の土砂災害の要因と土砂災害時の活動の安全確保に関する考察, 消防研究所報告, 査読無, 121, 2016, pp.1-8.
- 2) Shoji Doshida, Evaluation of secondary slope failure susceptibility using detailed topographic data, The 4th Slope Tectonics Conference, 2017.

- 3) 土志田正二, 平成 26 年 8 月 20 日広島豪雨における土砂災害現象について, 安全工学, 57(1), 2018, pp. 22-27.
- 4) 土志田正二・新井場公德, 崩壊前後の地形データを用いた二次崩壊発生危険地域の考察, 第 56 回 (公社) 日本地すべり学会研究発表会, 2017.
- 5) 土志田正二・新井場公德, 平成 29 年 7 月九州北部豪雨日田市小野地区の崩壊における UAV 空撮を用いた数値地形解析, 第 57 回 (公社) 日本地すべり学会研究発表会, 2018.
- 6) Shoji Doshida, Kiminori Araiba, Evaluation of secondary slope failure susceptibility at slope disaster sites which occurred by rainfall, AGU Fall Meeting 2018, 2018.

<謝辞>

本研究で用いた LiDAR データは, 国交省中国地方整備局太田川河川事務所及び朝日航洋(株)から提供頂いた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① 新井場公德・土志田正二・佐伯一夢, 2014 年 8 月広島市において発生した降雨停止後の土砂災害の要因と土砂災害時の活動の安全確保に関する考察, 消防研究所報告, 査読無, 121, 2016, pp.1-8.
- ② 新井場公德・土志田正二・尾川義雄, 土砂災害地での応急対応活動における危険性管理 (特集 災害対応事例とその教訓), 日本地すべり学会誌, 査読有, 54(2), 2017, pp. 46-53.
- ③ 土志田正二, 平成 26 年 8 月 20 日広島豪雨における土砂災害現象について, 安全工学, 査読無, 57(1), 2018, pp. 22-27.
- ④ 土志田正二・新井場公德・佐伯一夢, 消防救助活動における無人航空機(UAV)の利活用方法について, 消防研究所報告, 査読無, 124, 2018, pp. 1-9.

[学会発表] (計 5 件)

- ⑤ 土志田正二・新井場公德, 平成 26 年 8 月広島豪雨により発生した二次崩壊現象の解明, 平成 28 年度砂防学会研究発表会, 2016.
- ⑥ 土志田正二・新井場公德, 崩壊前後の地形データを用いた二次崩壊発生危険地域の考察, 第 56 回 (公社) 日本地すべり学会研究発表会, 2017.
- ⑦ Shoji Doshida, Evaluation of secondary slope failure susceptibility using detailed topographic data, The 4th Slope Tectonics Conference, 2017.
- ⑧ 土志田正二・新井場公德, 平成 29 年 7 月九州北部豪雨日田市小野地区の崩壊における UAV 空撮を用いた数値地形解析, 第 57 回 (公社) 日本地すべり学会研究発表会, 2018.
- ⑨ Shoji Doshida, Kiminori Araiba, Evaluation of secondary slope failure susceptibility at slope disaster sites which occurred by rainfall, AGU Fall Meeting 2018, 2018.

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。