

【建設工学研究所論文報告集第 62 号〔報告〕2020 年 11 月】

## 丹波市で発生した 0 次谷における崩壊、土石流発生場の地形的特徴と発生メカニズム

### Topographical features of slope failure sites in zero-order basin

沖村 孝      鳥居 宣之      中川 渉      原口 勝則  
 Takashi Okimura      Nobuyuki Torii      Wataru Nakagawa      Katsunori Haraguchi

鏡原 聖史      根本 信行      植田 允教  
 Satoshi Kagamihara      Nobuyuki Nemoto      Mitsunori Ueda

#### 1. はじめに

平成 26 年 8 月豪雨によって、兵庫県丹波市では多くの崩壊や土石流、洪水被害が発生した（写真 1 参照）。この災害は、短時間に時間雨量 80mm を超えるような強雨（短期集中型）であり、地中へ浸透しきれない雨水が地表流となって一気に溪流へ流入することから、溪床堆積土砂が流動する土石流が発生しやすかったと考えられる。そこで、著者らは、この豪雨における土石流発生事例を対象とし、表層崩壊リアルタイムハザードシステム（以降、システムと呼ぶ）<sup>2)</sup>の検証を行い、土石流の発生機構に関連した課題が確認されたため、土石流の発生機構を考慮した新たな判定方法を検討、提案<sup>3)</sup>した。その結果、土石流の発生溪流の捕捉率、空振率の向上が図られた。一方、崩壊起因型の土石流の中には、0 次谷で崩壊が発生し、土石流化している事例が複数箇所確認できた。本報告では、崩壊起因型の土石流の発生箇所のうち、0 次谷で崩壊が発生し、土石流化している箇所を対象に、システムのモデル条件との対比を行うために、現場の調査を行った。また、調査結果に基づき、崩壊メカニズムを推定し、今後同様な崩壊が発生し、土石流化する地形的特徴を整理したので報告する。



写真 1 土砂災害の状況<sup>1)</sup>

## 2. 調査地の概要と箇所別土砂災害システムの判定

対象とした調査地は、土石流化した崩壊地であり、システムでは崩壊判定されなかった箇所である。ここでは、調査地の概要、災害発生時の降雨と崩壊の概要、システムの判定結果について述べる。

### 2.1 調査地の概要

調査地は、図1の赤四角に示す兵庫県丹波市市島町上鴨坂周辺である。斜面は、南西向きでわずかな凹地形が確認できる。地質は、図2に示す5万分の1地質図幅「福知山」<sup>4)</sup>によると丹波帯三侯コンプレックスのMm：頁岩、珪質頁岩を伴う、Mg：緑色岩類と超丹波帯高津層、Ts：砂岩が分布した境界部で非常に複雑な地質構造となっている場所である。



図1 地形図（地質図ナビより）<sup>5)</sup>

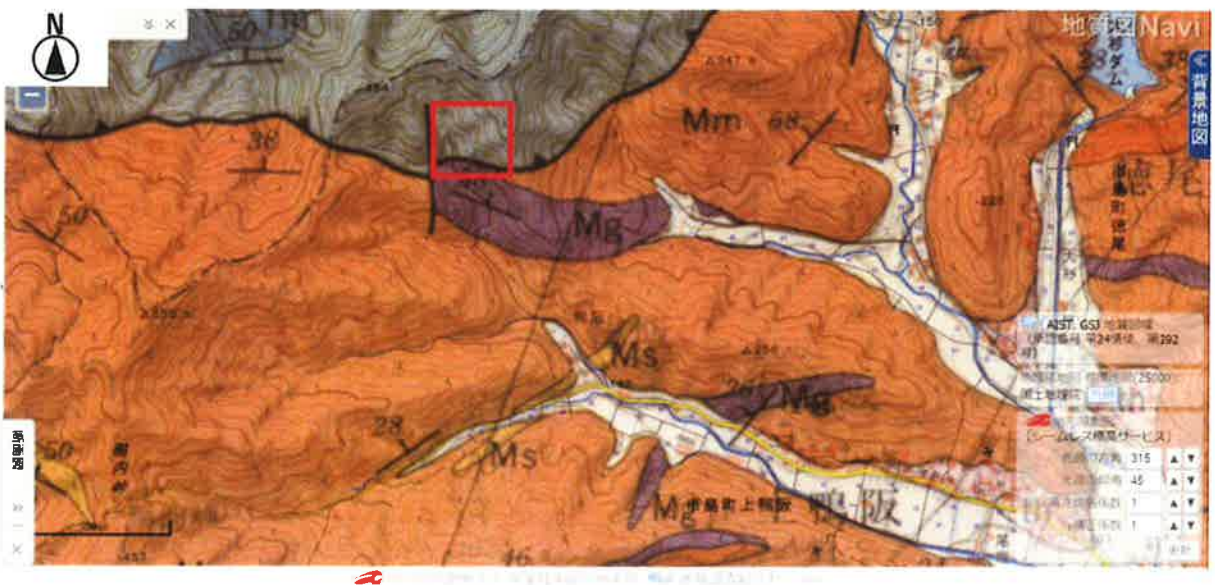


図2 地質図（地質図ナビより）<sup>5)</sup>

## 2. 2 災害発生時の降雨と崩壊の概要

調査地周辺の2014年8月16日6:00から17日12:00までの解析降雨は、図3に示すように累積雨量369.7mm、最大時間雨量57mmであり、一連の降雨の後半に時間雨量の非常に多い激しい降雨があった後方集中型の降雨であると言える。崩壊規模は、図4に示すように災害発生前（平成24年計測）、後（平成26年9月計測）の航空レーザー測量の1m等高線の比較の結果から、崩壊後の侵食による地形変化も含まれるが、幅 $W=16\text{m}$ 、長さ $L=40\text{m}$ 、最大深さ6.8m（縦断面図で確認）であった。

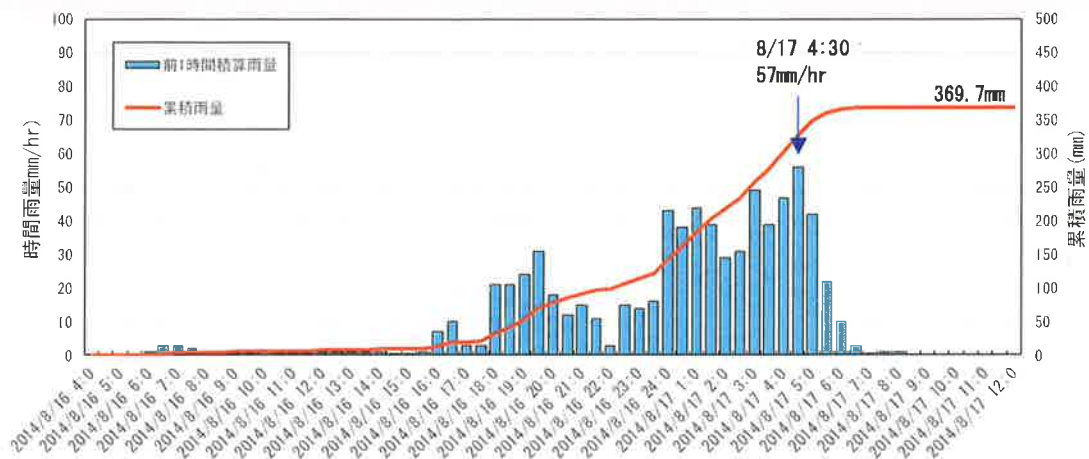


図3 時間雨量と累積雨量の関係（解析雨量：メッシュ番号52356096）

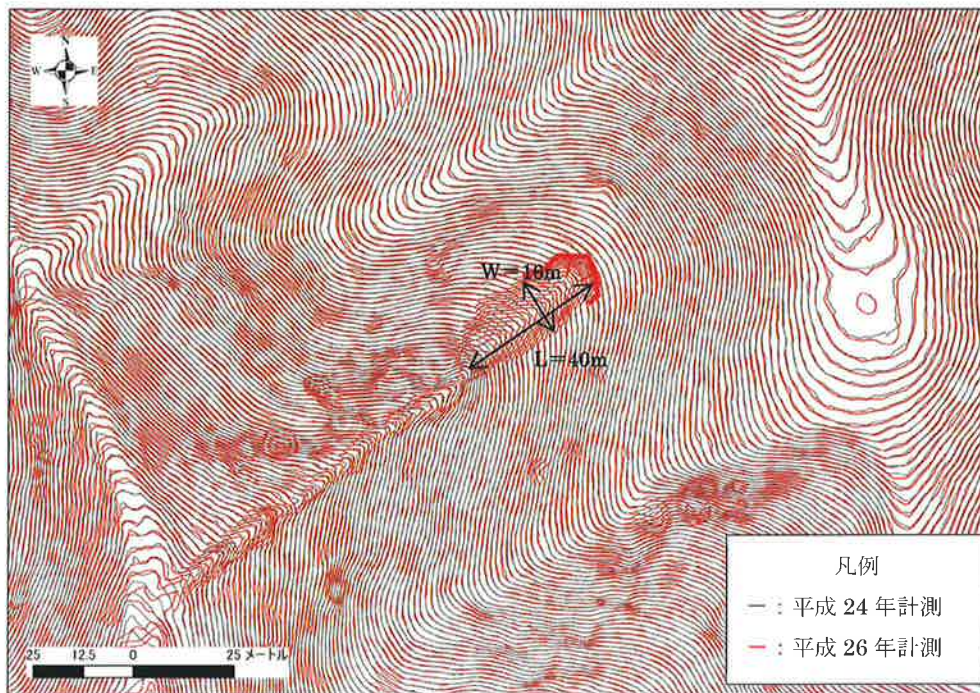


図4 崩壊地周辺の2時期航空レーザー計測データの1m等高線比較

## 2. 3 システムの判定結果

システムにおける一連の降雨後（2014年8月16日0:00から2014年8月17日23:30）の判定結果を図5に示した。この図に示した格子は、10mメッシュでその中に記載した数字は、左上が表土層厚、左下が計算時間における最大水位、右上が地表面傾斜角、右下が計算時間における最小安全率を示している。また、赤囲みは、安全率1.0以下、

安全率の変化率0.03以上を示した箇所で、システムで崩壊判定されたセルを示している。崩壊箇所周辺の傾斜角は、29～30度、表土層厚は0.75から0.86m程度の斜面である。この図から一連の降雨によって崩壊地周辺ではシステムにおける崩壊判定が見られるものの、崩壊地では、崩壊判定はされておらず、見逃し箇所となっている。次に、システムにおける計算結果の詳細を確認するために、図5のオレンジ色で囲んだセルにおける安全率、地下水位の推移を図6に示した。この図に示したように、崩壊発生セルにおいて、8月17日0:30以降、安全率が1.116と一定値となっており、地下水位が表土層厚と同じ0.836mであり、地下水位が地表まで到達して、安全率が変化しない状態であったと言える。システムの計算ではこのような結果であったが、実際現地ではどのような崩壊であったのか、現地調査を行うこととした。



図5 システム判定結果 (2016/8/16 0:00～17 23:30における判定箇所を示している)

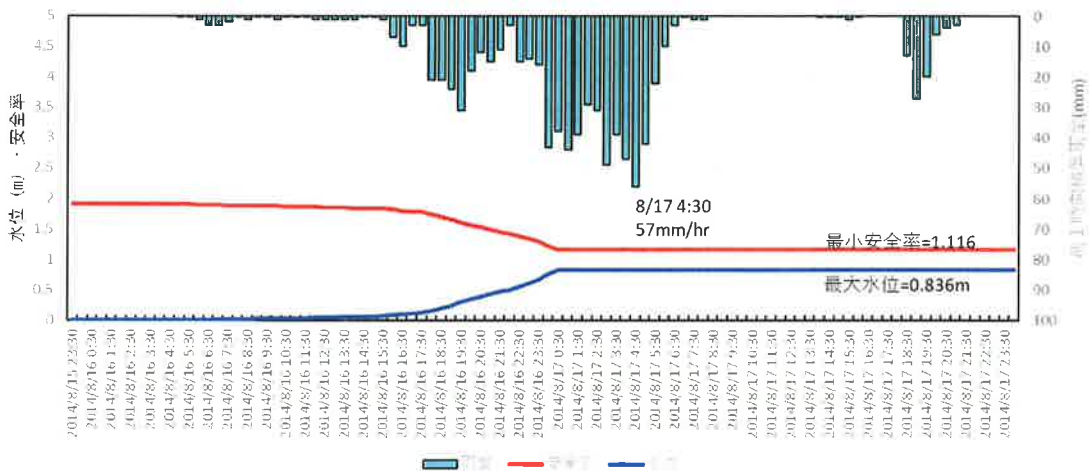


図6 降雨、安全率、地下水位の推移 (崩壊地滑落崖: オレンジ四角)

### 3. 調査

現地調査を行うに当たって、崩壊した箇所を地形的特徴を確認するために崩壊前の地形の判読や崩壊前後の縦横断面図の対比を机上で行い、現地にて崩壊地の状況を確認するなど行った。

#### 3.1 机上調査

崩壊前のレーザー測量データを用いて 1m 等高線図を作成し、地形図や空中写真を見ながら地形判読を行った。その結果を図 7 に示した。この図の I に示すように 0 次谷部に周辺の尾根や谷壁の傾斜と異なる緩傾斜部分が確認できる。また、その緩傾斜の下流に急崖があるという特徴が確認できた。さらに、同じような特徴を有する 0 次谷が周辺で 2 箇所 (II、III) 確認できた。なお、崩壊は、図中 I の緩傾斜地で発生している。

つぎに、図中の I について、崩壊前、後のレーザー測量データを用いて、縦・横断面図を作成し詳しく分析した。縦・横断面線の位置を図 8 に示した。また、縦断面図を図 9、横断面図を図 10 に示した。なお、これらの図には後で述べる現地踏査ならびに現地調査 (簡易動的コーン貫入試験) の結果も併記している。図 9 に示す平面図から、下流部には、緩やかな扇状地形が確認でき、古い土石流堆積場と判読できる。また、土石流堆積場の分布域上流で V 次谷が確認でき、さらにその上流部に緩傾斜の古い堆積物が分布している状況が確認できる。さらに上流部では、急傾斜な斜面となっている。今回崩壊した箇所は、この堆積物が分布している箇所が発生していることがわかる。図 9 に示す縦断面図を見てみると、平面図で V 次谷を呈している箇所の遷緩点の上流部に遷急点を確認でき、その遷急点から 60m 程度緩傾斜斜面が連続している。今回の崩壊は、遷急点を含む緩傾斜斜面、40m 程度が崩壊している。崩壊前後の地盤高の差は、4.0m から 6.8m 程度である。図 10 に示す横断面図では、崩壊側部の傾斜変化点がいくつか確認でき、崩壊後の流水箇所では深く侵食された後に地形が形成されたと考えられる。このことからある程度の幅、塊で崩壊したあと、崩壊地に流れ込んだ流水によって、縦侵食と側壁の崩壊が繰り返されて形成されたものと推察される。一方で、遷緩点の下流側の地盤高はほとんど変化がない。このことから、変化の少ない下流部は露岩しているなど侵食されにくい状況にあるものと考えられる。図 10 に示す横断面図から兩岸の急傾斜の谷壁斜面の地表面を推定基盤岩と仮定して、想定基盤線を横断に記載した。



図 7 地形判読結果 (基図は平成 24 年に計測された航空レーザー測量結果をもとに作成)

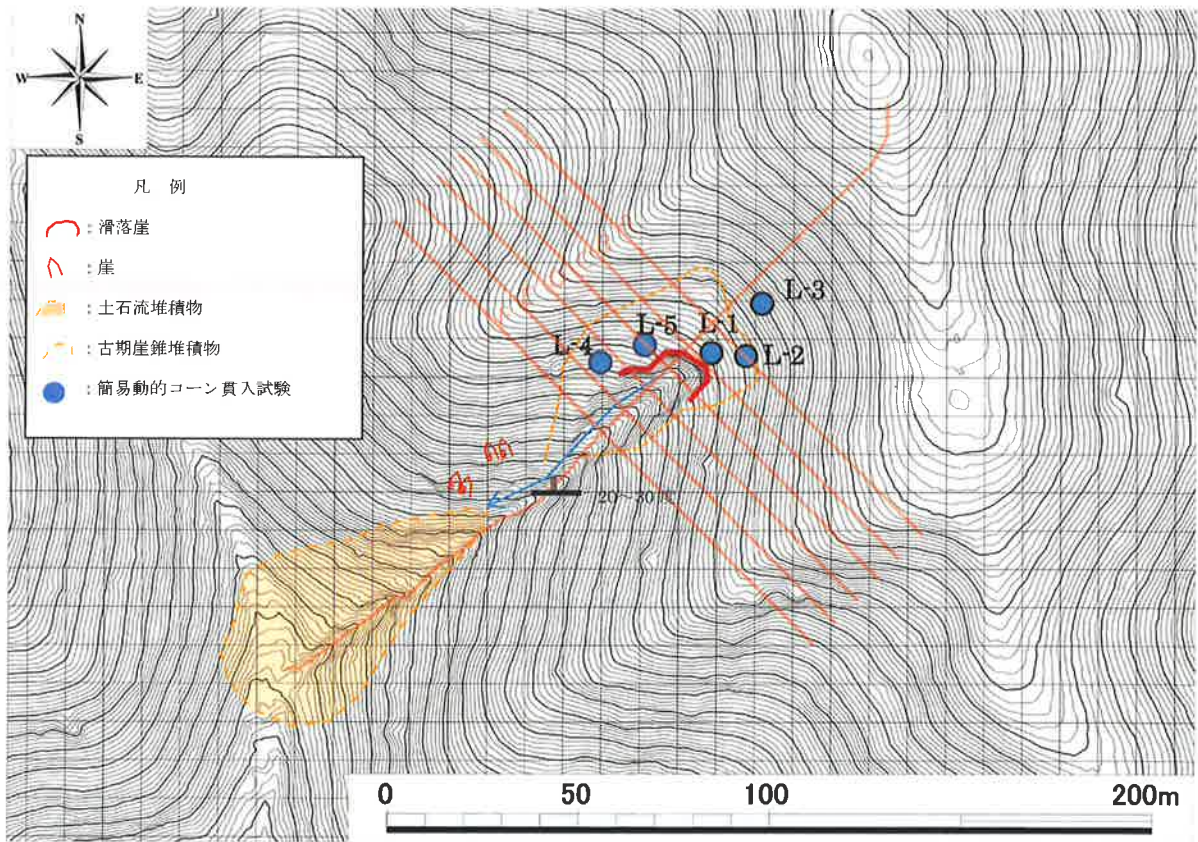


図8 崩壊後の地形図と縦横断位置、踏査結果ならびに調査箇所（図7のI箇所）

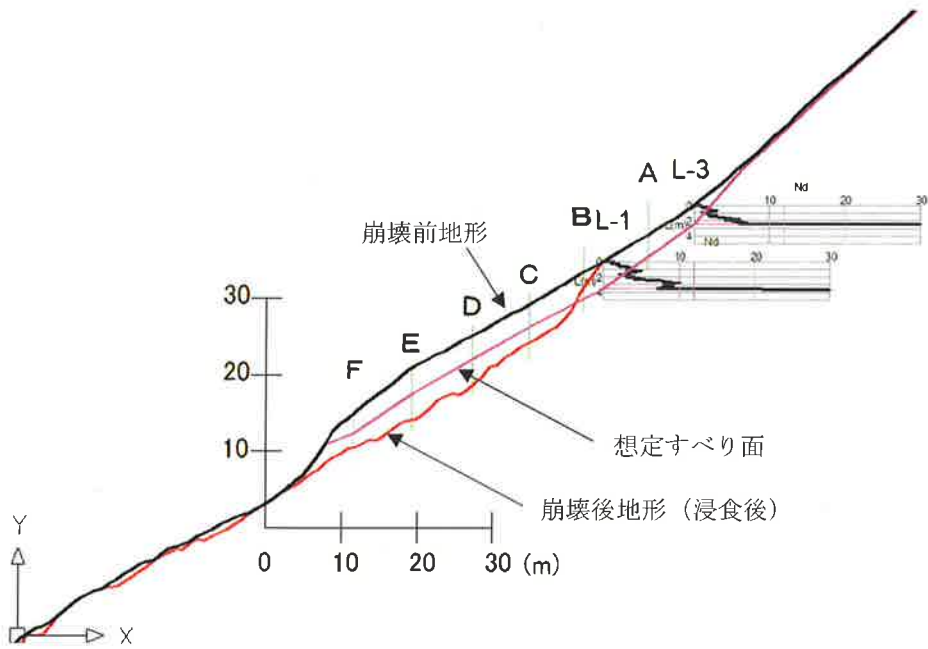


図9 崩壊前後の縦断図の比較

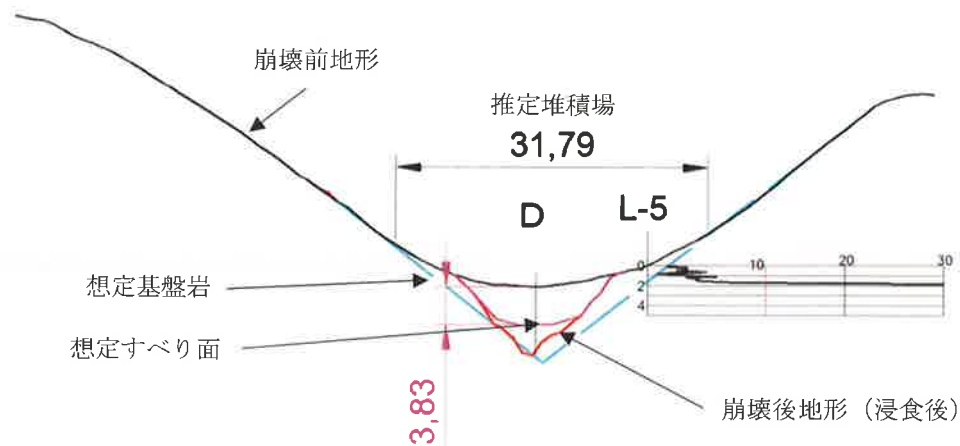


図 10 崩壊前、後の横断面図の比較

このように仮定した想定基盤線より上が、古期崖錐堆積物と考えられ、今回の崩壊や侵食された箇所は古期崖錐堆積物の中で起こっている。この横断面図では、古期崖錐堆積物のおよその幅は 32m であると推定でき、地形判読した緩傾斜の範囲 (図 7 参照) と概ね一致する。

縦断面図、横断面図から、崩壊した土塊は、想定基盤岩の上に堆積した古期崖錐堆積物と考えられる。今回の崩壊後の各横断面図の崩壊側部の傾斜変化点を結んだ今回の想定すべり面を縦断方向に結んだ想定すべり面より上の古期崖錐堆積物が今回の崩壊土塊とみなし、この崩壊後に、崩壊地に流れ込んだ流水によって、崩壊面の縦侵食と側壁の再崩壊が繰り返された結果として形成されたものと推察した。

### 3. 2 現地調査

現地にて、堆積状況や崩壊状況などを確認するとともに、滑落崖のスケッチ、崩壊地周辺で簡易動的コーン貫入試験を実施して、地盤の深度方向の硬さを調査した。一連の調査結果から堆積物の堆積環境を推察した。

#### (1) 現地踏査

地形図で遷緩線となっている箇所では、写真 2 左に示すように両岸の尾根が張り出しており、溪床には岩盤露頭が確



写真 2 狭窄部の状況ならびに崩壊地滑落崖周辺の状況 (360 度カメラで撮影)

認できた。この岩盤露頭の走向傾斜を確認するとほぼ東西方向に伸長し、北に $20\sim 30^\circ$ で傾斜していた。このため、溪流の流下方向に対しては受盤を呈していることになる。また、この溪流の狭窄部より上流側の崩壊地の外側には古期崖錐堆積物と考えられる緩やかな斜面が確認できるが、崩壊地内は、写真2右に示すよう侵食が進み深掘れしていることが確認できた。このことから、机上で想定した遷緩点の下流側の溪床の岩盤露岩と、この受盤構造の岩盤露岩を基盤岩として、上流に緩傾斜で堆積した古期崖錐堆積物が確認できた。この緩傾斜の古期堆積場は、基盤岩が受盤構造で地形上狭窄部となった上流側では土砂が供給されるものの、受盤構造、狭窄部のため、流下しにくくなった結果として堆積し形成されたものと推察できる。また、図5に示した古期崖錐堆積物以外の場所でシステムの崩壊判定がなされた谷壁斜面では、倒木や崩壊している箇所はなく、結果として空振り判定となっていることが確認できた。ただ、システムは、樹木の崩壊防止力を考慮せず、土のせん断強度のみで安定度を評価しているため安全側の判定結果となっていたものと考えられる。

## (2) 滑落崖の状況

つぎに、崩壊した古期崖錐堆積物の状況を確認するために、崩壊地のの上流に確認できる崖面の状況を観察した。観察の結果を図11に示した。また、地表面から深さ1.5m、深さ1.8m、深さ6mの箇所から崖面からサンプルを採取して物理試験を行い、その性状を把握した。

図11に示すように露出した地盤は上位から下位に以下のように区分できた。ここで、A層、B層、C層はほぼ水平に堆積している状況が確認できたが、D層は、E層を分けるように分布しており、崖下（深さが深く）になるほど幅が狭く不連続となっており、不整合面となっていた。また、D層の下方では、染み出し程度の湧水が確認できた。このことから、豪雨時には、D層内を流れる地下浸透流がある可能性が高いと考えられる。

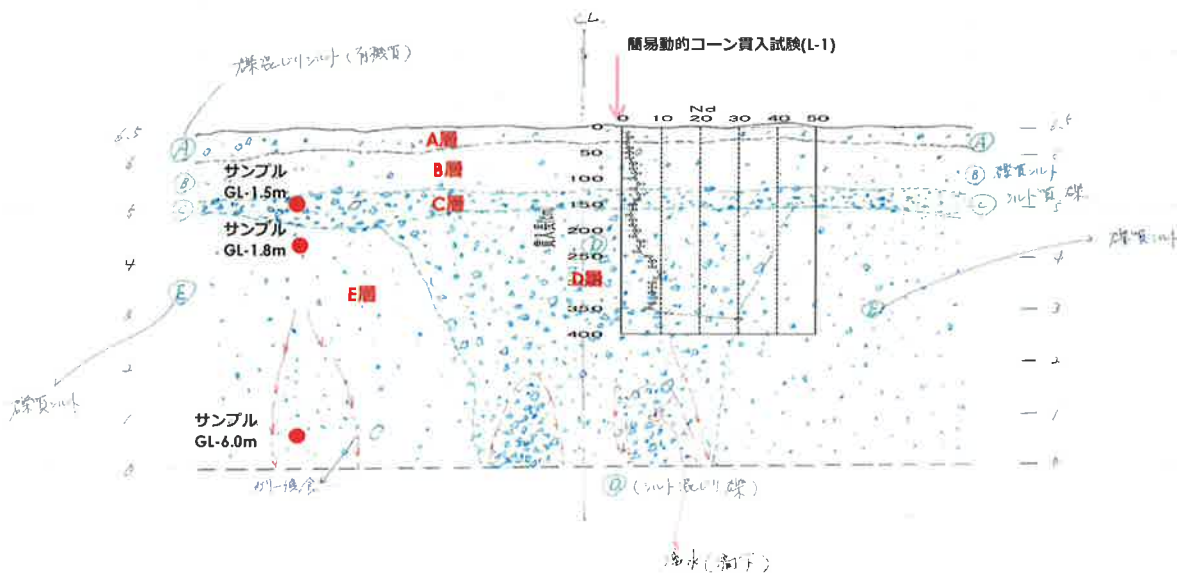


図11 滑落崖のスケッチ

- A層(礫混じりシルト、やや有機質)
- B層(礫質シルト)
- C層(シルト質礫)
- D層(シルト混じり礫)
- E層(礫質シルト)

## (3) 室内試験

採取した試料の粒度を図12に示した。この図より、地表面に近いほど細粒分が少ない傾向が確認できた。これは、深



いほどシルト質なレキがスレーキングなどによって破碎され、粒径が小さくなった結果、細粒分の含有率が増加しているものと考えられる。

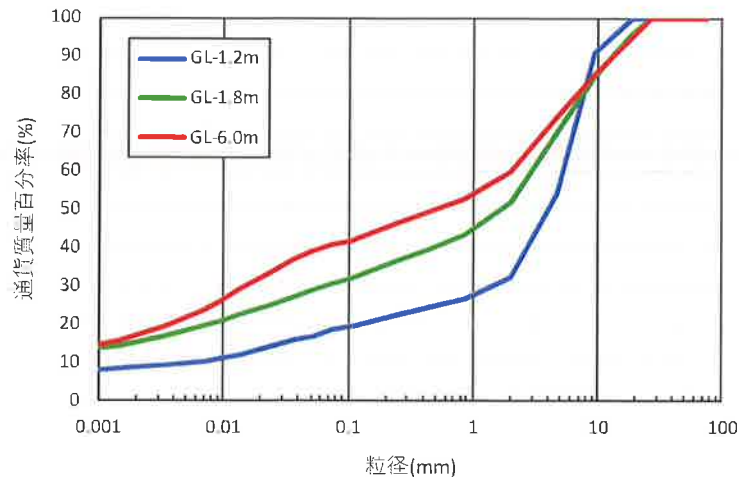


図 12 粒度

#### (4) 崩壊地周辺で実施した簡易動的コーン貫入試験

崖の上流側で実施した簡易動的コーン貫入試験は、図 11 中に示すように 3.5m 程度まで  $N_d < 10$  が分布しており、それ以深で  $N_d$  が増加した。崩壊地周辺で実施した他の簡易動的コーン貫入試験の結果も  $N_d < 10$  の厚さは 0.6m から 2.4m と異なるものの、それ以深では  $N_d$  が増加した。滑落崖のスケッチからは深さ 6.5m 以上堆積物が分布していることが確認できたが、簡易動的コーン貫入試験では、深さ 3.5m 付近から  $N_d$  値が大きくなり、堆積物がよく締まった状態になっている可能性が示唆された。実際に滑落崖 (GL-6.0m) の崖面から試料を採取する際も、よく締まっていたため簡単に採取することができなかったこととも整合している。

#### (5) 堆積環境の考察

現地における観察、現地調査、室内試験を考慮して、当該箇所での堆積順序について以下のように推定した。

- ① 受盤構造の狭窄部に上流からの土砂が供給され、下流に流下しにくく堆積しやすい環境であった。
- ② E 層が長い年月をかけ、比較的穏やかな流水環境で厚さ 5m 程度堆積した。
- ③ 豪雨によって E 層が部分的に浸食された。
- ④ 浸食された箇所に新たに土砂が供給され、D 層が形成された。この D 層は、浸透水の影響を強く受け、細粒分が少ない礫主体となった。
- ⑤ E、D 層が形成後に、細粒分の少ない礫に富む C 層が不整合に堆積した。
- ⑥ C 層の上位には比較的緩やかな堆積環境で B 層が堆積し、B 層の上部は土壌作用で A 層となった。

以上、当該箇所では、受盤構造で狭窄部がある地形的特徴を有し、上流からの土砂供給によって堆積場が形成されやすい特徴を有していたと考えられる。このようなことからシステムで想定している堆積環境と異なる状況であったために計算モデルより、実際の表土層厚が厚いことが確認できた。

## 4. 箇所別土砂災害システムのモデル修正

### 4.1 モデル修正方法

システムの表土層厚について、今回の調査で明らかになった堆積場の表土層厚に修正し、再現計算を行いこととした。ここで、10m セルの堆積場の表土層厚は、先に述べた縦断面図、横断面図をもとに設定した初期の想定すべり面より上の厚

さとし、縦、横断面図で求めた表土層厚を 10m 格子点に当てはめ、平均して 10m セル中央の表土層厚とした。表土層厚修正後の表土層厚を図 13 に示した。この図 13 に示すように、表土層厚を変更する 10m セルは、図中の緑で囲った 15 セルで、図 8 に示した判読した古期崖錐堆積物の範囲とした。また、変更した表土層厚は 1.35m から 3.2m であり、当初モデルと比較して、約 2 から 4 倍程度厚い表土層厚となっている。

4. 2 モデル修正後の判定結果ならびに崩壊メカニズム

モデル修正後、一連の降雨（2014年8月16日 0:00 から 2014年8月17日 23:30）を入力して、30分ごとの安全率を求めた。図 14 は、図 13 オレンジで囲ったセルの安全率と地下水位の経時変化を示したものである。この図に示すように安全率 1 以下となる最初の時刻は、最大時間雨量観測時刻（8/17 4:30）とほぼ同時刻の 8/17 4:00 で、それ以降安全率 1.0 以下の危険な状態が継続する結果となっている。当該箇所での崩壊発生時刻は、目撃者などおらず不明であるが、丹波市域で災害が多発した時間がおおよそ 2 時頃からとの報告<sup>7)</sup>がなされており、2 時以降で最大時間雨量観測時刻頃と崩壊、土石流が発生してもおかしくない時刻と整合する妥当な結果と考えられる。

このことから、システムのモデル表土層厚が、現地と一致するように設定できていた場合、当該箇所も危険と判断できた可能性が高いことが示された。

以上、当該箇所の崩壊は、古期崖錐堆積物が降雨による地下水位の上昇によって、不安定化して、安全率が 1 以下となる 8/17 4:00 以降に崩壊、土石流化したものと考えられた。また、今回検討したような古期崖錐堆積物の堆積範囲を広域から抽出して、抽出された範囲の表土層厚を適切に設定することで、システムの精度向上が図られると言える。

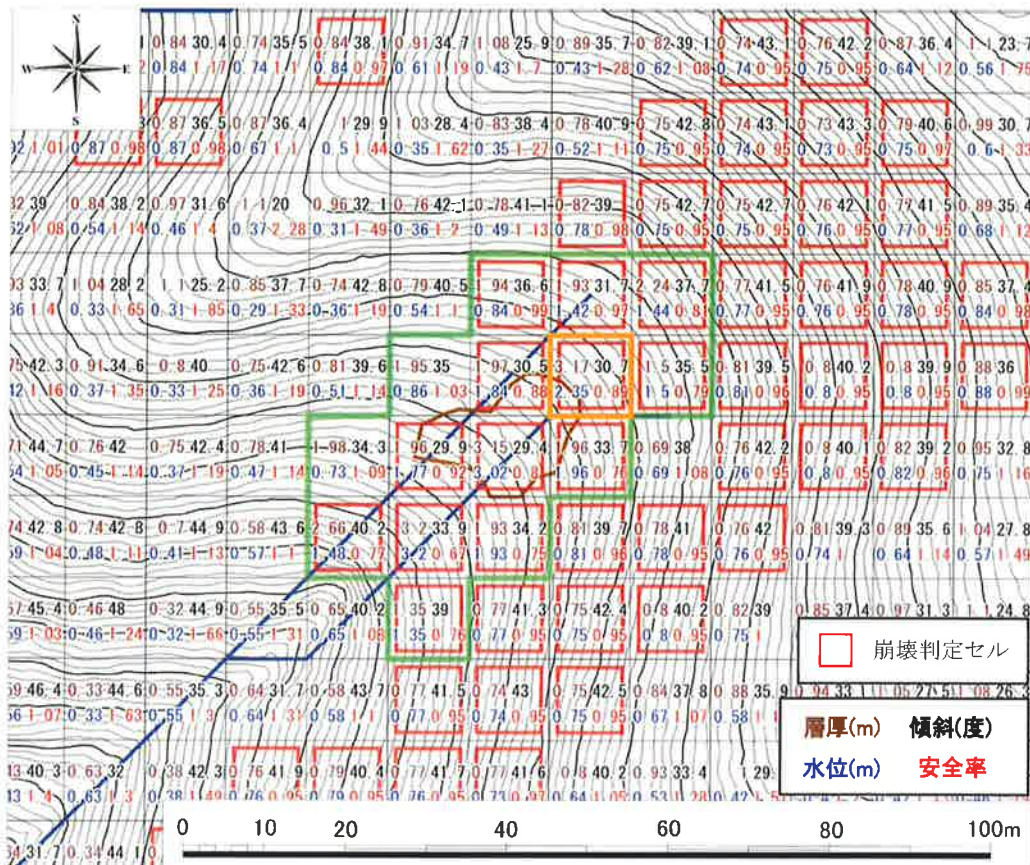


図 13 表土層厚を修正した箇所と計算結果

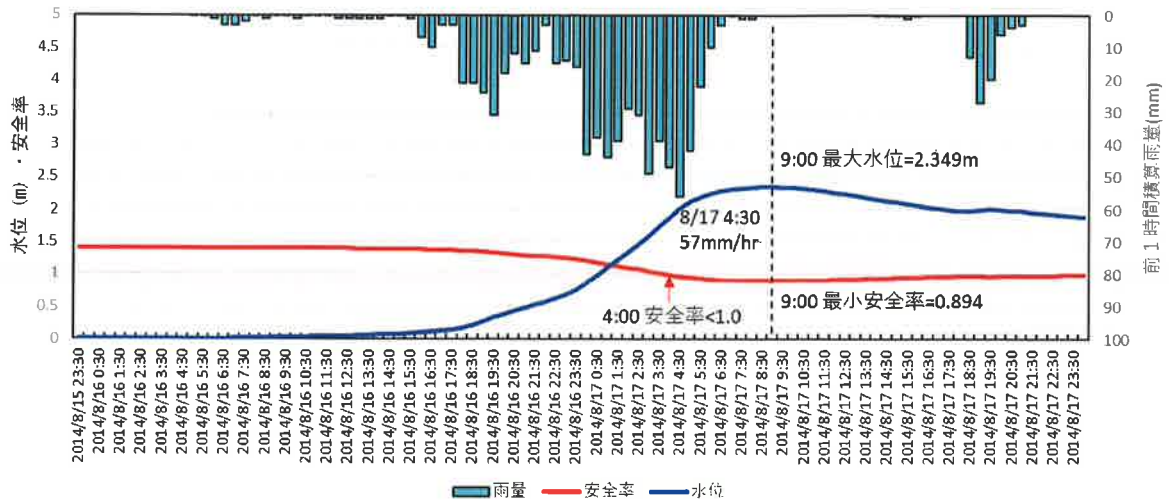


図 14 モデル修正後の安全率の推移 (図 13 オレンジ囲みのセル)

5. 発生場の特徴と抽出方法の提案

5. 1 発生場の特徴の整理

検討した箇所をもとに、発生場の地形特徴について 10mDEM や 1mDEM を用いた平面図をもとに地形条件の検討を行った。先に述べたように 10mDEM で作成したシステムのモデルにおいて、崩壊箇所周辺の傾斜角は、29～30 度、水系の上流側の斜面であった。さらにシステムの地形区分を見ると、崩壊は谷底斜面上流の谷壁斜面である (図 15 参照)。

古期崖錐堆積物は、地表面傾斜角が 30 度程度と緩い特徴があるが、堆積域の幅が 30m 程度であるため、さらに細かいデータ (1mDEM) を用いて、古期崖錐堆積物の範囲を試行錯誤的に求めることとした。結果、1mDEM の地表面傾斜角 32 度以下の範囲と良い整合が認められた (図 16 参照)。求めた 1mDEM の地表面傾斜角 32 度以下の範囲の面積は、500m<sup>2</sup> 程度であった。また、崩壊前の縦、横断面から古期崖錐堆積物には明瞭な遷急点とその下流に遷緩点が存在している特徴がある。

以上の整理から、今回崩壊、土石流となった発生場は、システムのモデル上、10mDEM で作成した水系沿いで谷底斜面の上流側に位置する谷壁斜面で、かつ、1mDEM の地表面傾斜角が 32 度以下、その面積が 500m<sup>2</sup> 以上であること、古期崖錐堆積物には明瞭な遷急点とその下流に遷緩点が存在している特徴を有していることが明らかになった。

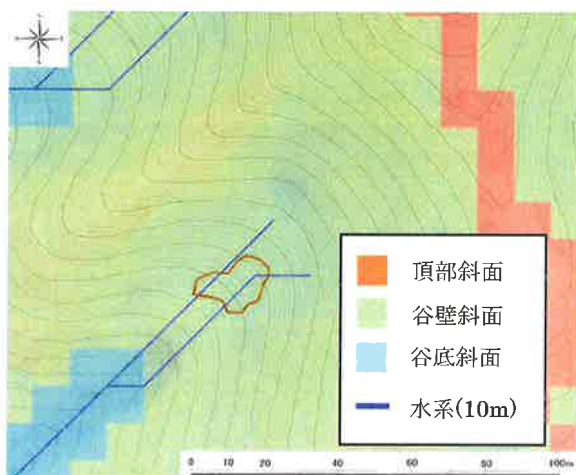


図 15 システムの地形区分

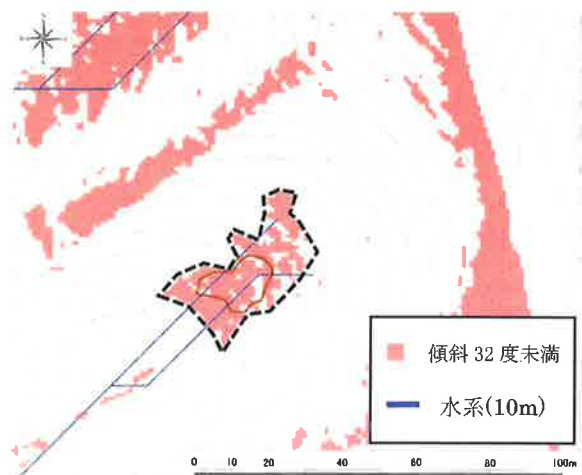


図 16 1mDEM を用いた 32 度以下の傾斜分布

## 5. 2 発生場の抽出方法

今回は、得られた特徴のうち、図 17 に示す平面情報をもとに、10mDEM、1mDEM を使い、同様の地形的特徴を有する地形場を抽出することとした。抽出には、GIS を用いた。はじめに、図 7 に示した調査箇所の子期崖錐堆積物の堆積場と同様の地形を有する箇所を教師データとして、抽出条件を算出した。その結果、地表面傾斜角 32 度以下の 1m セル面積は約 500 m<sup>2</sup> 以上であった。また、その地表面傾斜角 32 度以下の 1m セルの密集割合は、500 m<sup>2</sup> (円形：半径 12.6m) あたり 19% (約 1/5) 以上であった。この教師データを抽出条件として、以下の手順で同様の地形条件場の抽出を行った。

- ① 谷壁斜面と重なる水系 (10mDEM を用い流域面積 2,000m<sup>2</sup> 以上)
- ② 水系上の 1m セル地表面傾斜角 32 度以下が密集している箇所の面積を算出
- ③ ②で求めた面積が半径 12.6m の円形内の 19% (約 1/5) 以上の 1m セルを抽出
- ④ 谷壁斜面の水系網 (10m) を 1m ラスタへ変換
- ⑤ ③で抽出した 1m セルから 12.6m バッファを作成
- ⑥ ⑤と④が一致する箇所を調査地と同様な崩壊、土石流が発生する子期崖錐堆積物の堆積場として特定

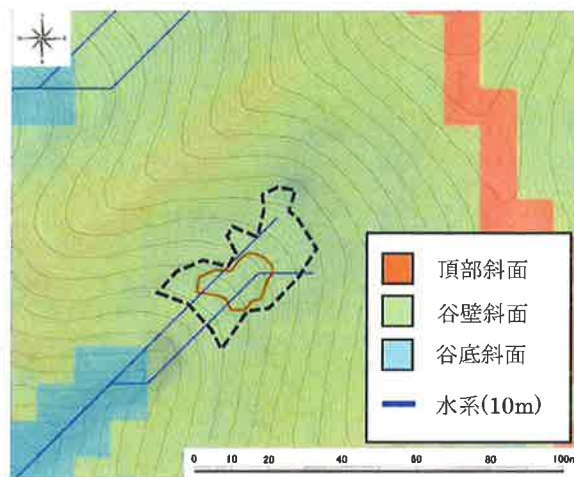


図 17 子期崖錐堆積物が崩壊、土石流化した場の特徴

## 5. 3 発生場の抽出結果とその評価

前述した抽出方法をもとに、抽出した結果を図 18 に示した。この図に示すように代表箇所と同様な子期崖錐堆積物が堆積している場と考えられる場所の抽出ができた。この結果は、机上調査で判読した結果とも概ね整合する結果である。しかしながら、図中の黒丸に示すように明瞭な子期崖錐堆積物が堆積している場を持たない箇所も抽出されていた。このことから、さらに広域で抽出した場合、明瞭な子期崖錐堆積物が堆積している地形でない箇所を多く抽出する可能性がある。そのため、今後は子期崖錐堆積物の堆積場の遷急点や遷緩点を抽出条件に追加して、さらに発生場の抽出の精度を高めるよう工夫をする必要があると言える。

## 6. おわりに

本報告では、崩壊起因型の土石流の発生箇所のうち、0 次谷で崩壊が発生し、土石流化している箇所を対象に、システムのモデル条件との対比を行うために、現場の調査を行った。その結果、崩壊、土石流化した箇所では子期崖錐堆積物が厚く堆積していることが確認できた。現地調査の結果に基づき、表土層厚を厚く設定することで、災害時のシミュレーションで安全率 1.0 を下回る時刻と実際の崩壊、土石流が発生してもおかしくない時刻に崩壊判定がなされ、妥当

な結果であることが確認できた。このことから、0次谷における古期崖錐堆積物の表土層厚を正確に推定することができれば、0次谷で崩壊が発生し、土石流化する現象を評価することができることが明らかになった。また、崩壊メカニズムについて、検討を行った結果、0次谷の古期崖錐堆積物内に地下水が貯留され、水位が上昇することで、古期崖錐堆積物が不安定化して、崩壊に至ったものと推定された。

さらに、調査地の地形的特徴から0次谷における古期崖錐堆積物の堆積場を抽出するための条件を整理し、抽出した結果、同様な古期崖錐堆積物の堆積場を抽出できた。ただし、明瞭な古期崖錐堆積物の堆積場を持たない場所も抽出されていたため、古期崖錐堆積物の堆積場下流の遷急点や遷緩点を抽出条件に追加して、さらに発生場の抽出の精度を高めるよう引き続き検討を進める必要がある。

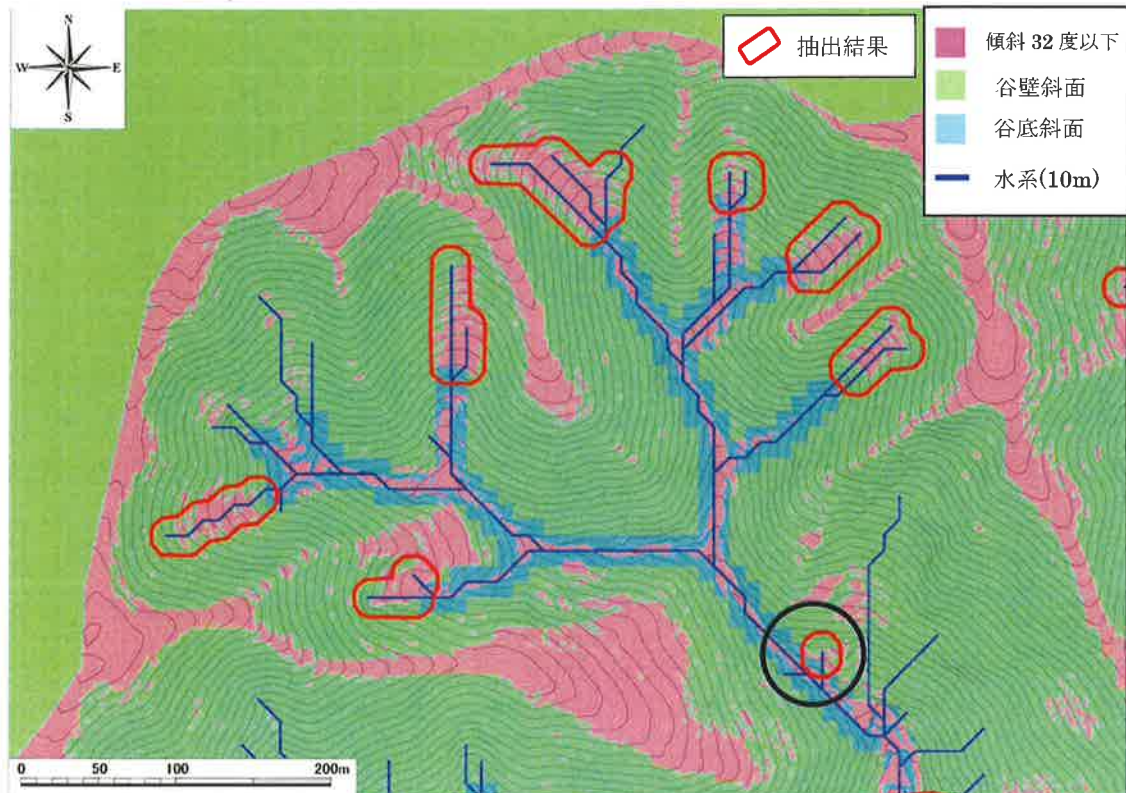


図 18 抽出した崩壊、土石流化しやすい古期崖錐堆積物の堆積箇所

### 【謝辞】

本報告は、兵庫県のご支援を得て実施した業務成果の一部である。滑落崖のスケッチには、明代達也氏のご協力を頂いた。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

### 参 考 文 献

- 1) 兵庫県災害復興室：平成 26 年 8 月豪雨災害の復旧・復興計画, 2015.
- 2) 沖村孝・鳥居宣之・尾崎幸忠・南部光広・原口勝則：豪雨による土砂災害を対象としたリアルタイムハザードシステムの構築, 新砂防, 63(6), pp. 4-12, 2011.
- 3) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則・鏡原聖史・笠原宅造・江川真史・孝子論図：表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策(9), 建設工学研究所論文報告集, 60, pp. 29-43, 2018.
- 4) 栗本史雄・牧本博：福知山地域の地質, 地域地質研究報告 5 万分の 1 地質図幅 福知山 京都 (11) 第 13 号, 1990.
- 5) 地質図 Navi : <https://gbank.gsj.jp/geonavi/geonavi.php#15,35.23880,135.08135>, (2020.9.11 閲覧)

- 6) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則・鏡原聖史：表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策(7)，建設工学研究所論文報告集，58，pp.43-57，2016.
- 7) 松村和樹・長谷川祐治・藤本将光・中谷加奈・西川友章・笠原拓造・柳崎剛・鏡原聖史・加藤智久・岡野和行・鈴木崇・平岡伸隆：2014年8月の豪雨による兵庫県丹波市で発生した土砂災害，砂防学会誌，Vol. 68, No. 1, pp. 60-67, 2015.

### 著者

沖村 孝	所員，理学博士，地盤工学
鳥居 宣之	所員，神戸市立工業高等専門学校教授，博士（工学），山地防災工学
中川 渉	客員研究員，応用地質株式会社，博士（工学），地盤工学
原口 勝則	客員研究員，国際航業株式会社，技術士（建設部門），砂防工学
鏡原 聖史	客員研究員，株式会社ダイヤコンサルタント，博士（工学），地盤工学
根本 信行	株式会社ダイヤコンサルタント，空間情報学
植田 允教	RAPIDE 合同会社，空間情報学