

【建設工学研究所論文報告集第 63 号〔報告〕2021 年 11 月】

## 丹波市で発生した 0 次谷における崩壊、土石流発生場の特徴と 類似した場の抽出方法

The extraction method from the 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  
Satoshi Kagamihara      Nobuyuki Nemoto

### 1. はじめに

平成 26 (2014) 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<sup>1)</sup>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面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。これまで著者らは、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、溪床堆積土砂が流動する土石流以外に 0 次谷で崩壊が発生し、土石流化している崩壊起因型土石流の事例が複数箇所確認できた。

そこで、著者ら<sup>4)</sup>は、崩壊起因型土石流の発生箇所を対象に、現地調査を実施し、システムのモデル条件との対比を行い、現地における崩壊した土層厚がモデルで想定した土層厚より厚いことを確認している。また、崩壊が発生した場が、0 次谷で土砂が堆積している地形的特徴を有していることがわかった。



写真 1 土砂災害の状況<sup>1)</sup>

本報告では、前報<sup>4)</sup>に引き続き、数値地形データから0次谷における崩壊起因型土石流が発生しやすい場の抽出について、抽出精度を高めるため、地形的特徴の見直しや閾値の検討を行った。それら一連の検討結果についてまとめ、0次谷における崩壊起因型土石流が発生しやすい場の抽出方法について提案するものである。

## 2. 丹波市域における平成26年8月豪雨土砂災害の概要

平成26(2014)年8月15日から20日にかけて前線が本州付近に停滞し、前線上を低気圧が東に進んだ。前線に向かって暖かく湿った空気が流れ込んだ影響で、西日本と東日本の広い範囲で大気の状態が非常に不安定になった。このため、局地的に雷を伴った非常に激しい雨が降り、特に16日から17日にかけては近畿地方や北陸地方、東海地方を中心に大雨となり、局地的に猛烈な雨が降ったところもあった。丹波市域では、この降雨によって人家、森林、河川、道路等への複合的な被害が発生した。

災害発生箇所近傍に位置する国土交通省所管の雨量計「北岡本」のハイエトグラフを図1に示す。この図から、災害発生より3日前の8月14日11:00頃に時間10mm程度の降雨があった後、15日9:00頃から断続的に降雨が見られる。前日の16日16:00に時間雨量35mmを記録してから10mm程度が継続し、17日3:00に最大時間雨量91mm

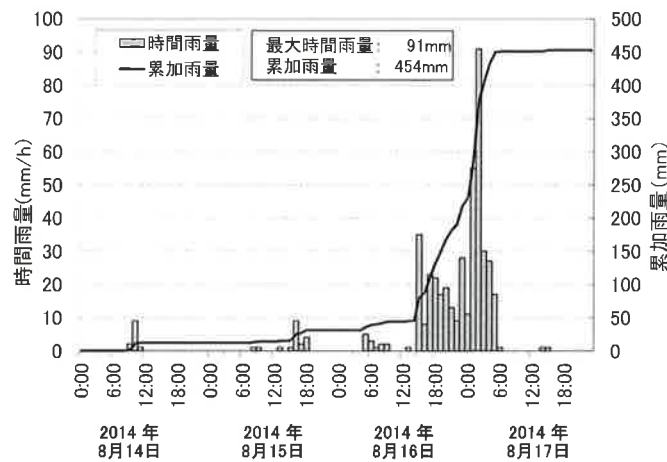
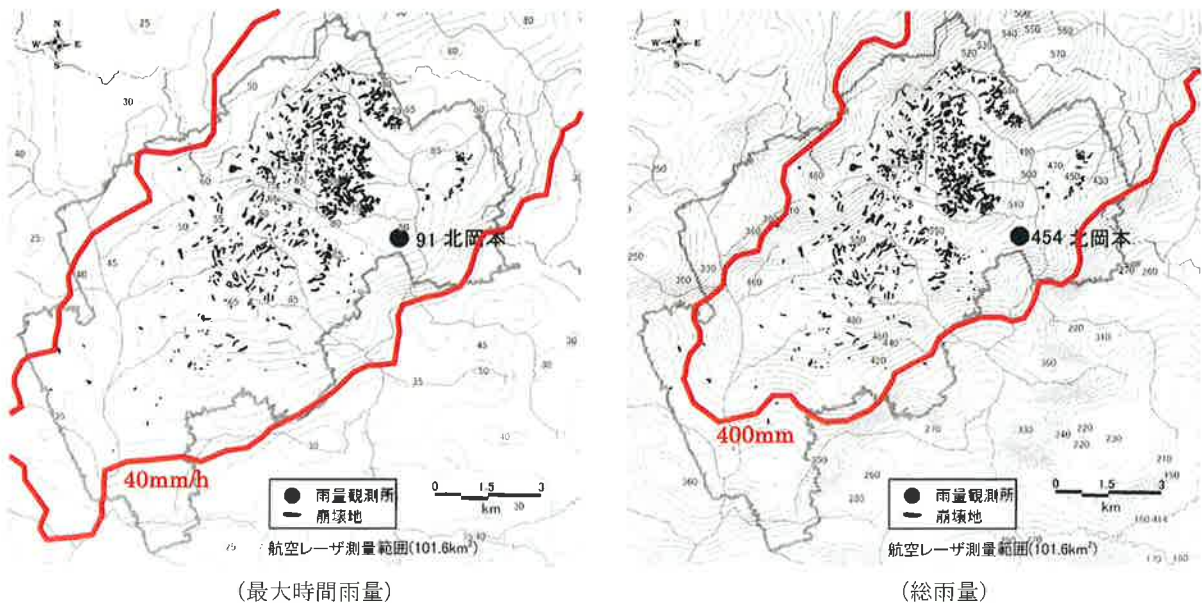


図1 平成26(2014)年8月14~17日の降雨状況(北岡本観測所)<sup>5)</sup>



(最大時間雨量)

(総雨量)

図2 災害発生時の降雨分布と崩壊発生状況<sup>5)</sup>に一部加筆

を記録した。総雨量は 454mm である。時間雨量は、100・150 年確率、24 時間雨量は 500・1000 年確率の降雨と推定<sup>5)</sup>されている。また、丹波市域における降雨（整理期間は 8 月 14 日 0 時～17 日 24 時まで）と崩壊箇所空間分布を図 2 に示す。この図に示すとおり、最大時間雨量で 40mm、総雨量で 400mm 以上の範囲で、崩壊が発生し、より最大時間雨量が大きく、総雨量が大きい箇所で崩壊が多発していると報告<sup>5)</sup>されている。また、写真 1 に示すように崩壊と土石流が多数発生している状況が確認できる。

### 3. 土石流発生箇所と 0 次谷における崩壊起因型土石流発生箇所の特徴

#### 3. 1 土石流発生箇所とその分類

丹波市域で崩壊が多数発生した箇所において、土石流危険渓流（112 渓流）を対象に土石流発生渓流とそのタイプを分類した結果が図 3 のように示されている<sup>3)</sup>。この図に示すように 112 渓流のうち 25 渓流で土石流が発生しており、土石流発生した渓流において、崩壊起因型土石流が 17 渓流、溪床堆積土砂流動型土石流 2 渓流、崩壊と溪床堆積土砂流動が発生している 6 渓流に分類されている<sup>3)</sup>。ここでは、斜面崩壊の崩土が流動化した「崩壊起因型」、溪床の不安定土砂が流動化した「溪床堆積土砂流動」と定義している<sup>3)</sup>。溪床堆積土砂流動型土石流の詳細については、沖村ら<sup>3)</sup>を参照していただき、ここでは、崩壊起因型土石流について、更に詳しく見ていくこととする。

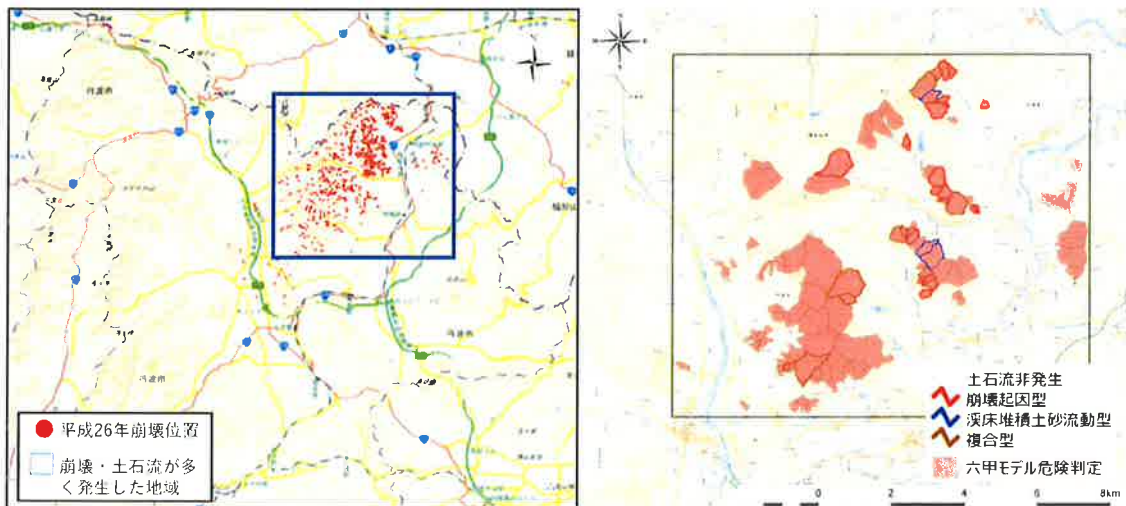


図 3 災害発生時の降雨分布と崩壊発生状況<sup>3)</sup>に一部加筆

#### 3. 2 崩壊起因型土石流発生箇所における崩壊発生状況

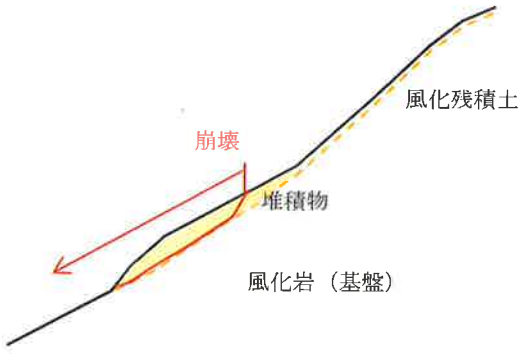
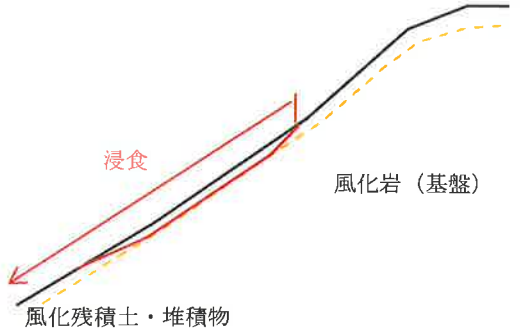
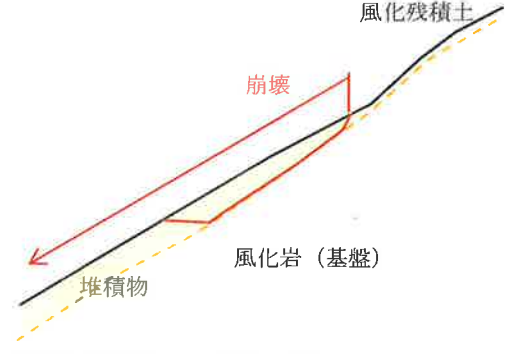
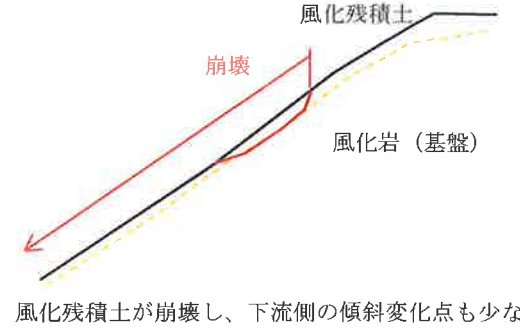
崩壊起因型土石流が発生した渓流の崩壊発生箇所について、崩壊前の空中写真ならびに崩壊前（平成 24（2012）年 1～3 月計測）、崩壊後（平成 26（2014）年 9 月計測）の 1mDEM から作成した地形図、縦断図などを用いて分析した。分析の結果、崩壊起因型土石流が発生した崩壊発生箇所は、地形的に大きく 4 つのタイプに分類することができた。タイプ分類を表 1 に示した。表に示す A タイプは、0 次谷内に比較的緩やかな傾斜地が分布しており、その下流に遷急線が認められる。崩壊は、この遷急線を含んで発生している特徴が認められる。つぎに B タイプは、溪流内に比較的緩やかな傾斜地が分布しており、その緩傾斜地内で浸食と考えられる土砂移動が発生している特徴が認められる。また、C タイプは、溪流内に比較的緩やかな傾斜地が分布し、その上流側が急傾斜地となっており、急傾斜地の下流側が崩壊している特徴が認められる。最後に、D タイプは、急傾斜地の斜面の崩壊が、そのまま最急勾配方向に直線的に斜面下部まで流動化している特徴が認められる。

ここで、B タイプは、溪流内の比較的緩やかな傾斜地で縦断的に変化が少ないことから溪床堆積土砂が浸食されて発生したものと推察される。また、D タイプは、通常の斜面崩壊が斜面下部まで流下した痕跡を土石流と判読したもので、崩壊メカニズムは、他の谷壁斜面で発生する表層崩壊と同様であると考えられる。一方、A タイプは、0 次谷内に比較

的緩やかな傾斜地が分布しており、その下流に遷急線が認められることから、0次谷の堆積物が崩壊、流動化した現象であると考えられる。CタイプもAタイプとは異なるものの0次谷の堆積物が上流側の遷緩線より下流で、崩壊が発生して、土石流化したものと考えられる。この2つのタイプで土石流化するような場を予め危険箇所として認識しておくことができれば、避難や防災対策の検討などに活用することができると考えられる。

ここでは、崩壊起因型土石流（Aタイプ）と考えられる箇所について、現地踏査、調査を行い、その発生メカニズムについて考察する。

表1 崩壊起因型土石流が発生した崩壊発生箇所の特徴の分類

Aタイプ	Bタイプ
 <p>堆積物が崩壊し、下流側へ流下</p>	 <p>風化残積土・堆積物が浸食され、下流側へ流下</p>
<p>0次谷の堆積物（下流に遷急線が認められる）が遷急線付近で崩壊し、土石流化する。 堆積物の厚さは3~5m程度。</p>	<p>0次谷の堆積物上流に遷緩線があり、急傾斜地から集まった表面流によって堆積物・風化残積土が浸食され、土石流化する。堆積物は1m程度と薄い。</p>
Cタイプ	Dタイプ
 <p>堆積物が崩壊し、下流側へ流下</p>	 <p>風化残積土が崩壊し、下流側の傾斜変化点も少ないことから、下流まで流下（落下）</p>
<p>0次谷の堆積物上流に遷緩線があり、急傾斜地から集まった表面流、地下水位の上昇によって崩壊し、土石流化する。堆積物は2m程度とBタイプより厚い。 堆積物の厚さは3~5m程度。</p>	<p>0次谷の風化残積土が崩壊、流下（落下）する。崩壊メカニズムは、これまでの谷壁斜面と同様である。 風化残積土の厚さは1m程度と薄い。</p>



#### 4. 代表的な0次谷における崩壊起因型土石流の発生メカニズムの考察

Aタイプと考えられる代表的な0次谷における崩壊起因型土石流の発生メカニズムを推定するために実施された現地調査の結果<sup>4)</sup>について、記述する。

##### 4.1 調査地の概要<sup>4)</sup>

調査地は、図4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5に示す5万分の1地質図幅「福知山」<sup>6)</sup>によると丹波帯三俣コンプレックスの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。

崩壊規模は、図6に示すように災害発生前、後の航空レーザー測量の1m等高線の比較の結果から、崩壊後の浸食による地形変化も含まれるが、幅W=16m、長さL=40m、最大深さ6.8m(縦断面で確認)であった。



図4 地形図(地質図ナビより)<sup>6)</sup>

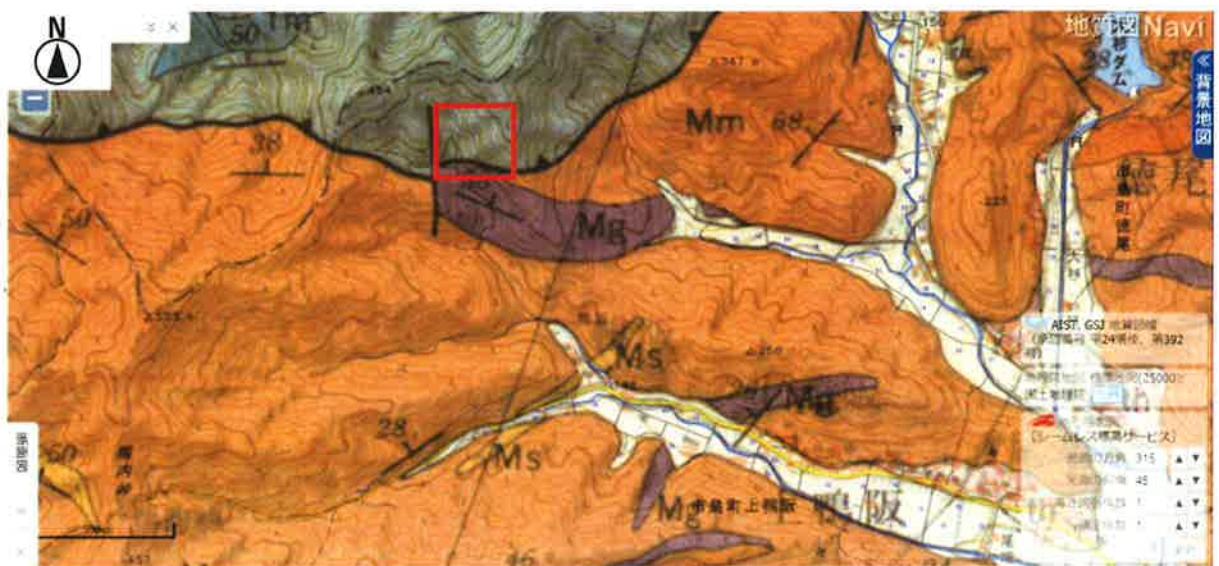


図5 地質図(地質図ナビより)<sup>6)</sup>



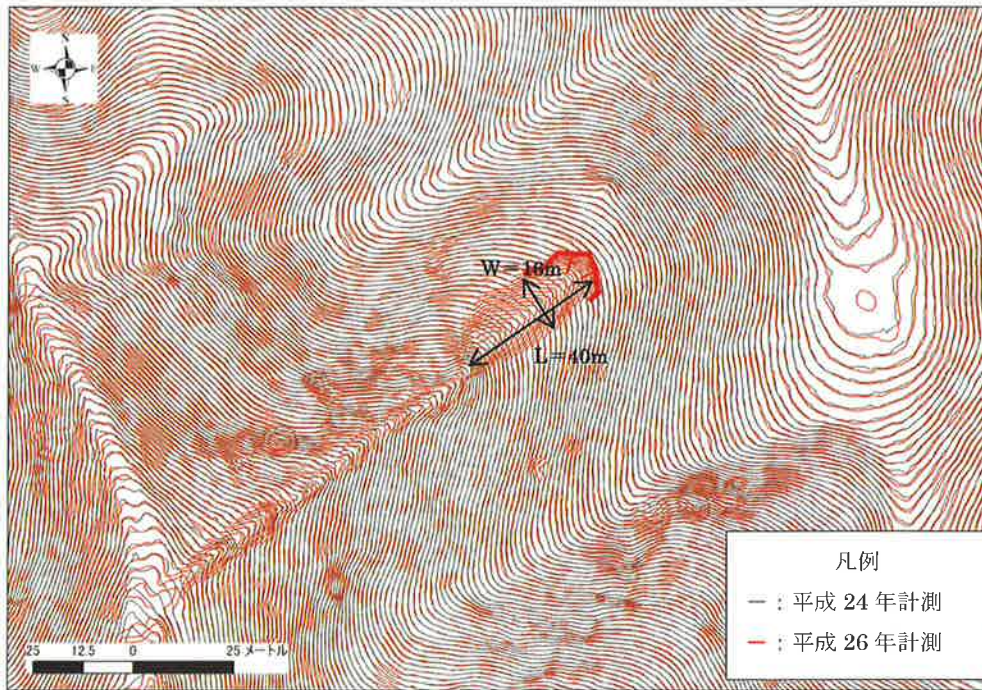


図6 崩壊地周辺の2時期航空レーザー計測データの1m等高線比較<sup>4)</sup>

#### 4. 2 机上および現地調査<sup>4)</sup>

現地調査を行うに当たって、崩壊した箇所の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。

##### (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地が確認できる。また、その緩傾斜地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、横断面図を図9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8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、古い土石流堆積場であると判読できる。また、土石流堆積場の分布域上流でV次谷が確認でき、ボトルネック地形を呈し上流部に古い堆積物が緩傾斜で分布している状況が確認できる。さらに上流部では、急傾斜地となっている。今回崩壊した箇所は、ボトルネック地形となる箇所の上流部に緩傾斜の古い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の確認でき、その遷急点から60m程度、緩傾斜地が連続している。今回の崩壊は、遷急点を含む緩傾斜地内の縦断延長40m程度の土塊が流出している。崩壊前後の地盤高の差は、4.0mから6.8m程度である。図9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も深く浸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、塊で崩壊した後、崩壊地に流れ込んだ流水によって、縦浸食と側壁の崩壊が繰り返し発生したことで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浸食されにくい状況にあるものと考えられる。図9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すると、仮定した想定基盤線より上、古い崖錐堆積物と考えられ、今回の崩壊や浸食された箇所は古い崖錐堆積物の中で起こっていると考えられる。この横断面図では、古い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。

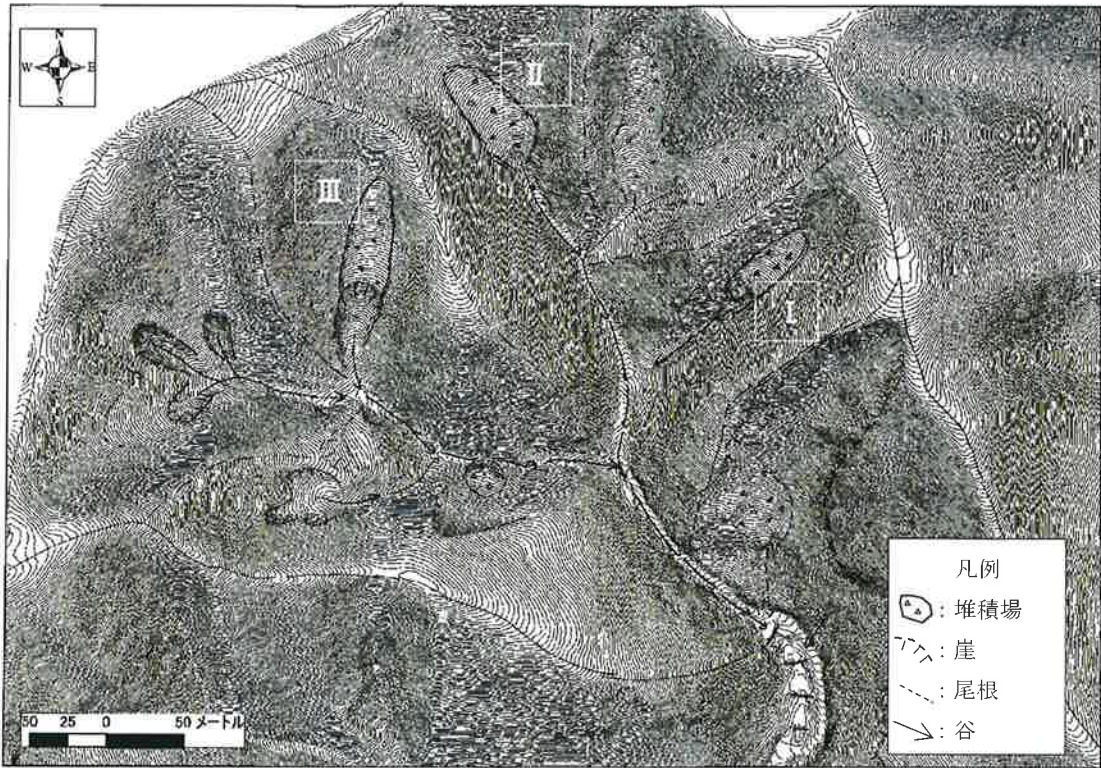


図7 地形判読結果（基図は平成24年に計測された航空レーザー測量結果をもとに作成）<sup>4)</sup>

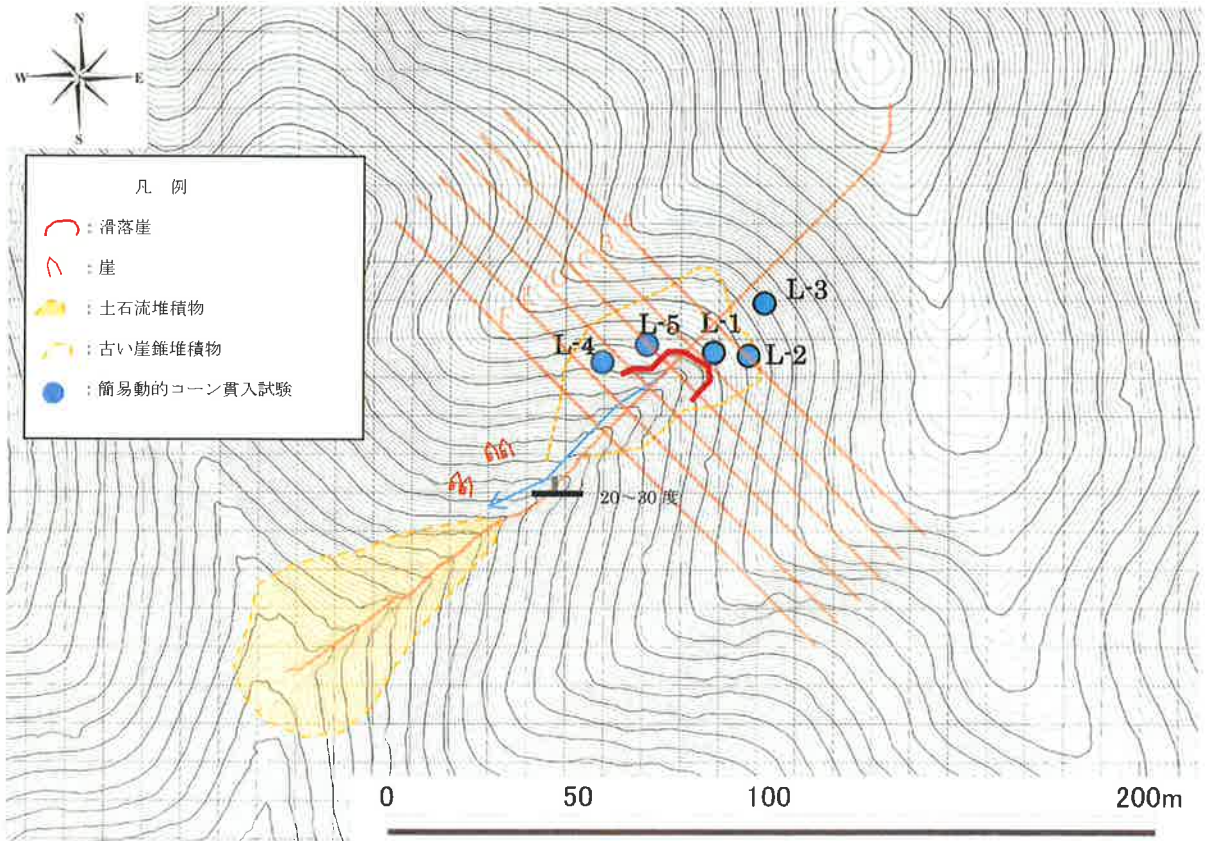


図8 崩壊後の地形図と縦横断位置、踏査結果ならびに調査箇所（図7のI箇所）<sup>4)</sup>



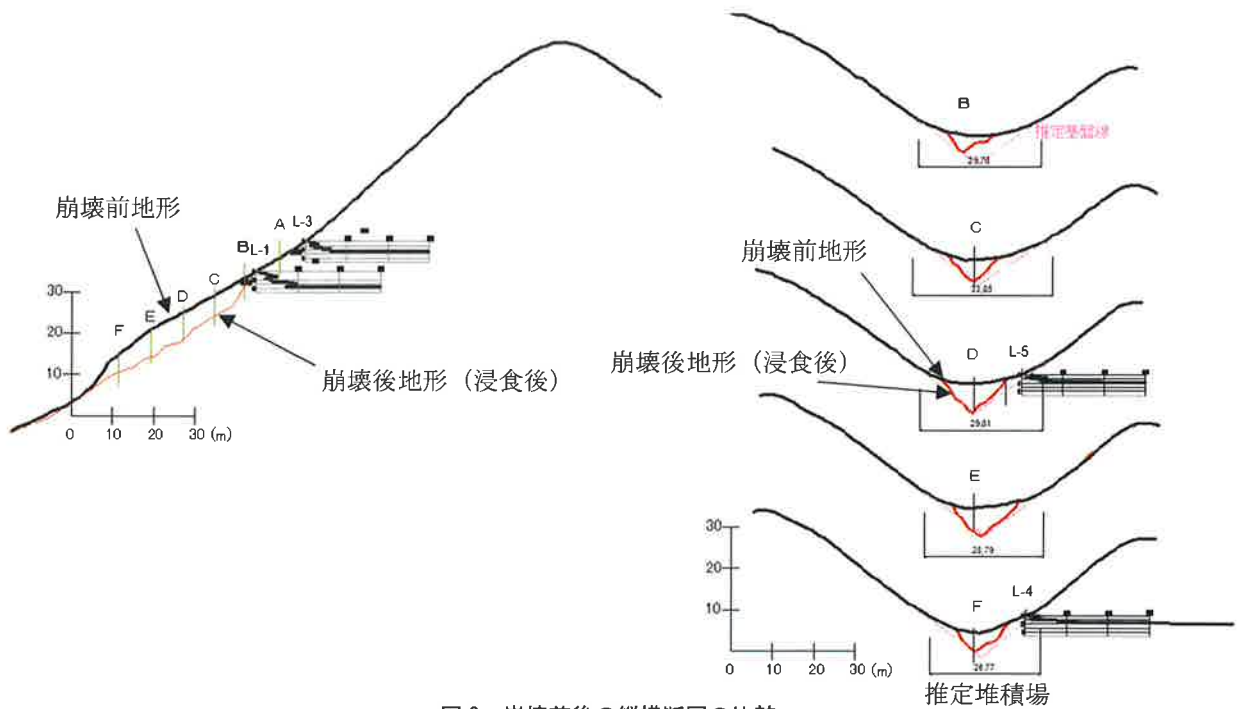


図9 崩壊前後の縦横断面図の比較

(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。

地形図で遷緩線となっている箇所では、写真2(左)に示すように兩岸の尾根が張り出しており、溪床には岩盤露頭が確認できた。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20~30°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い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)に示すよう浸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い崖錐堆積物が確認できた。この緩傾斜の古い堆積場は、基盤岩が受盤構造で地形上狭窄部を呈する箇所の上流側では土砂が供給されるものの、流下しにくくなった結果、土砂が堆積して形成されたものと推察できる。また、図8に示した古い崖錐堆積物以外の谷壁斜面では、倒木や崩壊している箇所はない。



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) 4)



つぎに、崩壊した古い崖錐堆積物の状況を確認するために、崩壊地の土流に確認できる崖面の状況を観察した。観察の結果を図10に示した。また、地表面から深さ1.5m、深さ1.8m、深さ6mの箇所では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。

- 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)

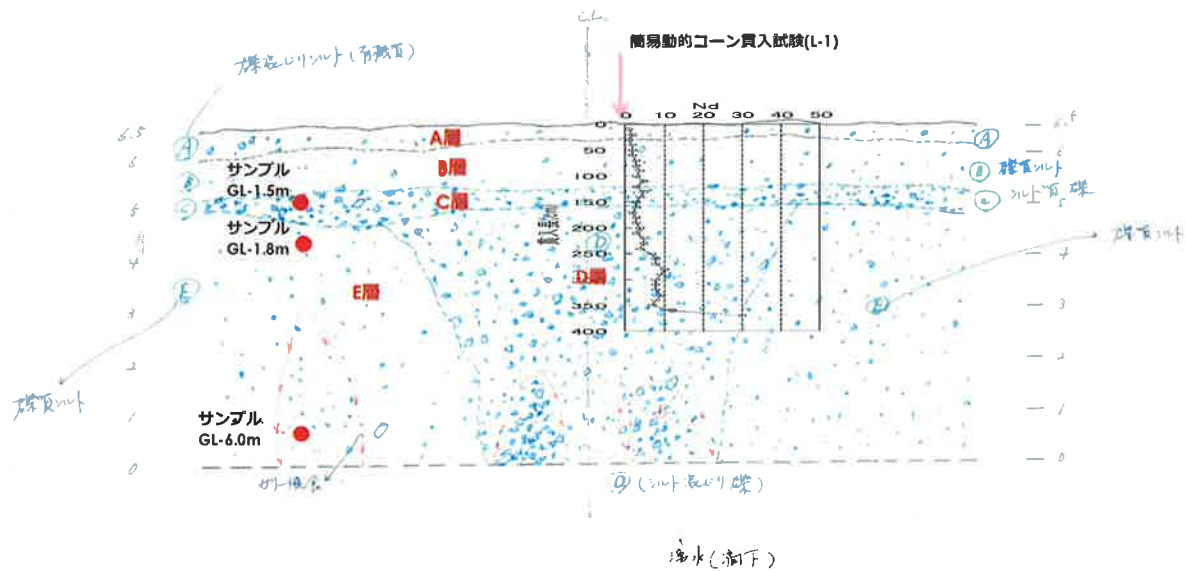


図10 滑落崖のスケッチ<sup>4)</sup>

(3) 室内試験

採取した試料の粒度を図11に示した。この図から、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。

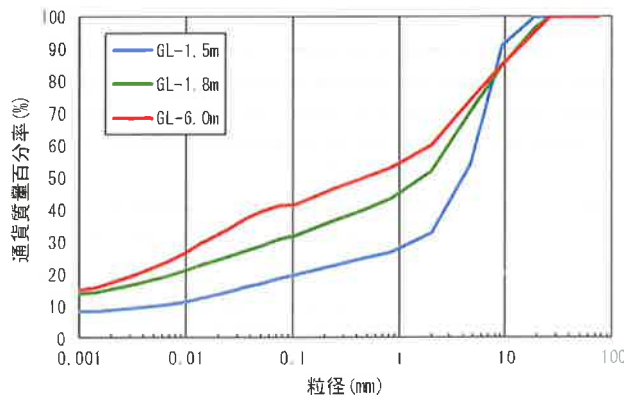


図11 粒度<sup>4)</sup>

#### (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試料を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。

### 4. 3 崩壊メカニズムの推定

崩壊前の地形と崩壊後の踏査、調査などで得られた結果をもとに崩壊メカニズムについて推定を行う。

#### (1) 検討モデル

崩壊メカニズムの検討モデルは、図 9 に示した崩壊前の地形と図 10 に示した調査結果を考慮して、図 12 に示すように仮定してモデル化した。ここで、表層から A、B 層、C 層、D(1)層、D(2)層とした。A、B 層は礫混じりシルトでやや有機質であり、厚さは 1.2m で堆積範囲全体に分布しているものと仮定した。C 層は、シルト質礫で、厚さが 0.3m 程度で堆積範囲に全体的に分布しているものと仮定した。つぎに、D 層は、シルト混じり礫で厚さが 4.7m で分布していたが、簡易動的コーン貫入試験の結果から深さ 3.6m 以深では  $N_d$  値が急激に増加していたことから、D 層を  $N_d$  値が小さい層 (D(1)) と大きい層 (D(2)) の 2 つに区分した。浸食によって掘れた土層が D(1)層と考えると現地の崩壊、浸食が、D 層の内、相対的に緩い土層が選択的に流出したものと解釈ができる。

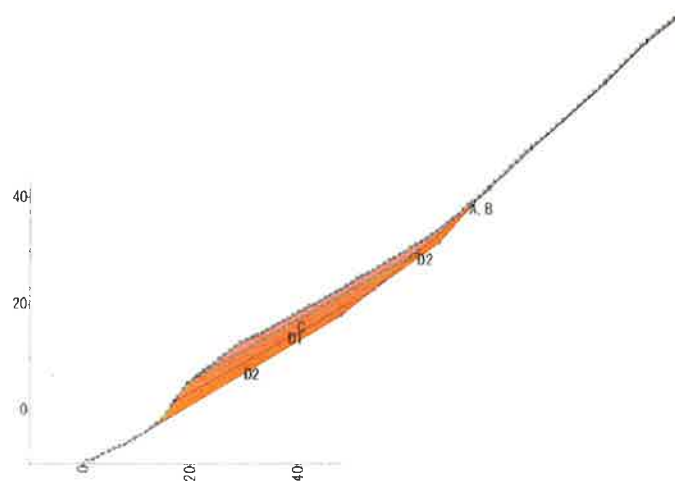


図 12 崩壊前の地形と地盤モデル



表 2 地盤区分と物性値

土層	GL	Nd	N	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	c (kN/m <sup>2</sup> )	備考
A, B	0m~-1.2m	2.5	2.5	14	15	22	2.5	$\phi$ はN値から $\sqrt{(15*N)} + 15$ より算定 地下水なしで現状安全率1
C	-1.2m~-1.5m	4.0	4.0	14	15	23	5.0	$\phi$ はN値から $\sqrt{(15*N)} + 15$ より算定 地下水上昇時で現状安全率1
D(1)	-1.5m~-3.6m	6.3	6.3	15	16	25	12.0	$\phi$ はN値から $\sqrt{(15*N)} + 15$ より算定 地下水上昇時で現状安全率1
D(2)	-3.6m以深	30.0	30.0	18	19	37	17.0	$\phi$ はN値から $\sqrt{(15*N)} + 15$ より算定 地下水上昇時で現状安全率1

それぞれの地盤区分における物性値の設定は、調査結果のNd値をもとに文献を参考に推定した。粘着力については、発災前は崩壊していない事実をもとに安全率1.0以上となるよう逆算した。D(2)層は、現地調査した際の無降雨時にも滑落崖に水の染み出しがあったこと。崩壊後に浸食でV字に洗掘されていることから、地下水位が上昇しやすい箇所と考え、地下水位が上昇しても崩壊していないと仮定した。また同様にD(1)、C層も細粒分が少ないことから、地下水位が上昇し、細粒分が流出した土層と考えた。この仮定から地下水面がCとA、B層境界まで上昇しても安全率1.0以上を保てる強度に設定した。

以上の仮定をもとに地盤区分と地盤物性値を表2に示すように推定した。設定した地盤物性値は、表層ほど土の単位体積重量、せん断強度が小さくなっており、実際の現地の状況、調査結果ともおおむね整合する。

#### (2) 安定解析による崩壊メカニズムの推定

安定解析手法は、一般的に用いられている2次元の円弧すべり解析（修正フェレニウス法）とした。地下水位は、現地計測などの情報がないことから、別途、システムで計算して得られる10mセルの時間ごとの地下水位を参考に用いることとした。具体的には、システムの計算で得られた地下水位を10mセルの層厚で除して無次元化した。この無次元化した値を10mセルと重なる2次元断面の層厚に乗ずることで設定した。

A、B層まで地下水位が上昇する時刻は、8/17の4時頃であったため、この時刻の地下水位を用いて安定解析を行った。安定解析の結果を図13に示した。この図に示すように遷急線を含む堆積物の箇所が最小安全率0.998を示し、極限状態である結果となっている。このことから、堆積物の下流側でA、B層が崩壊し、その後、崩壊した背後のA、B層が不安定して、後退性の崩壊が発生したものと考えられる。

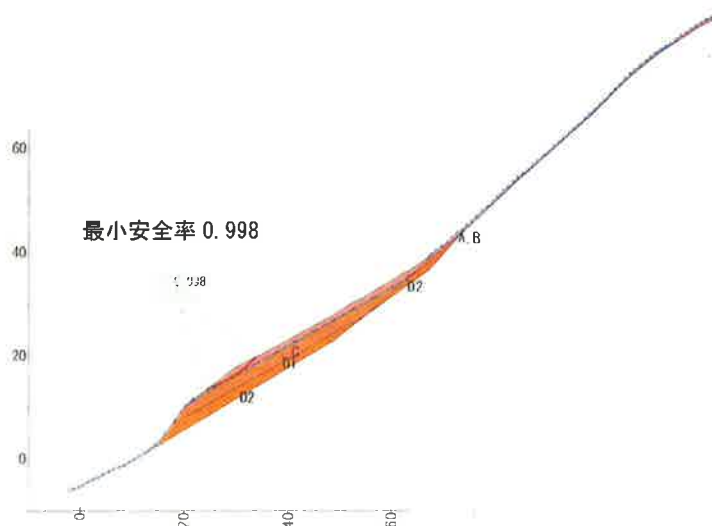


図 13 最小安全率円弧 (8/17の4時)

### (3) 崩壊メカニズムの推定

仮定が多いものの、安定解析の結果から、豪雨によって、堆積物中に雨水が集中し、地下水位が上昇、堆積物の下流側遷急線上流側の A、B 層が崩壊し、後退性の崩壊が発生。さらに、崩壊が進む中、堆積物内に貯留された水の移動によって、堆積物が流動化し、さらに周辺から集水される水の流れによって、谷中央が浸食され、その結果、谷壁が不安定となり、谷壁斜面の崩壊が進んだものと推察される。結果的に D(2)層まで浸食され崩壊後の縦横断面図で確認された地形となり、安定化したものと考えられる。また土石流化したことを考えると、A、B 層の崩壊、後退性崩壊はわずかな時間で連続的に発生したものと想像する。

当該箇所では推定した 0 次谷における崩壊起因型土石流は、崩壊した箇所において、ボトルネックとなる狭窄部があり、ボトルネックとなる箇所は遷急線となり、明らかにその背後が緩傾斜地となっているという特徴を有している。そのような場では、豪雨時に 0 次谷内に雨水が集中し、地下水位が上昇、結果的に崩壊が拡大しながら堆積物内に貯留された多量の水によって崩壊、土石流化することが予想される危険箇所であると言える。このような場と特徴が似通った箇所を事前に抽出しておくことは、防災、減災上重要な事である。そこで、広域から同様の地形場を抽出するために、崩壊、土石流化した箇所を地形判読することによって、地形場の特徴を整理し、近年整備が進められている数値地形を用いて、広域から抽出する方法についてさらに検討を進めることとした。

## 5. 地形的に 0 次谷における崩壊起因型土石流が発生しやすい場の整理ならびに抽出方法の検討

### 5. 1 1m 等高線図を用いた地形的に 0 次谷における崩壊起因型土石流が発生しやすい場の整理

崩壊前の詳細な地形を用いて、0 次谷における崩壊起因型土石流が発生した箇所の地形を整理した。図 7 に示したように、0 次谷内に堆積物と考えられる緩傾斜地が分布している特徴を有していた。そこで、目視で判読した緩傾斜地を 1m 数値地形図にトレースして、地表面傾斜角を調べたところ、32 度未満であることが分かった。その地表面傾斜角 32 度未満の面積は、950m<sup>2</sup> 程度であった。また先に示した縦断形状からも明らかであるが、緩傾斜地の下流部は明瞭な遷急点があり、さらに下流部には谷底の遷緩線が認められる特徴を有している (図 14、図 15、図 9 参照)。遷緩点となるポイントまでの集水面積は、4,500m<sup>2</sup> 程度である。

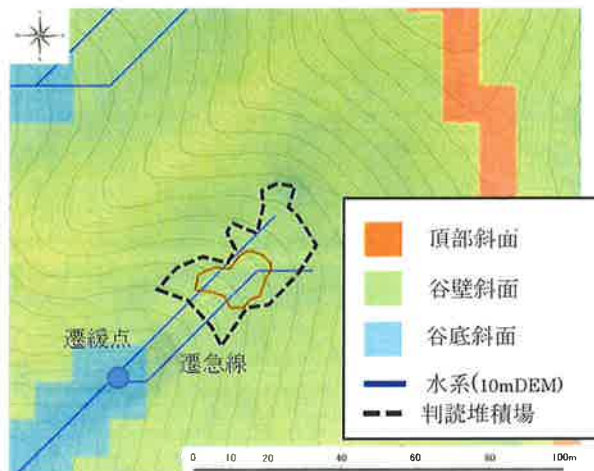


図 14 システムの地形区分と判読した堆積場

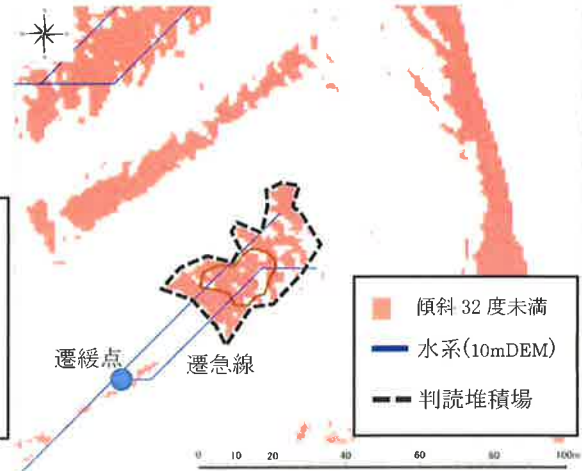


図 15 1mDEM を用いた 32 度未満の傾斜分布

以上の地形的特徴を整理すると以下のとおりである。

- ① 遷緩点までの集水面積 4,500m<sup>2</sup> 以上の 0 次谷である
- ② 1m 数値地形図の地表面傾斜角 32 度未満が分布、その面積は 950m<sup>2</sup> 程度である
- ③ 緩傾斜地の下流部は明瞭な遷急線と遷緩点が認められる

次に、崩壊起因型土石流が発生したと考えられる箇所について、同様に地形図、縦断面図を確認した。図 16 に示すよう



に、集水面積は 4,500m<sup>2</sup> 程度の 0 次谷で、傾斜角 32 度未満の緩傾斜地が分布していることが確認でき、その面積は 950m<sup>2</sup> 以上であった。さらに、緩傾斜地の下部には明瞭な遷急線と遷緩点が認められ、同様の地形的特徴を示している。崩壊前後の縦断面図を確認すると、先に述べた箇所と同様に堆積物と考えられる緩傾斜地の下流側の遷急線上流側が崩壊していると考えられ、下流側はほとんど地形が変わっていないことから、溪床が岩盤で浸食されていないものと考えられる。したがって、先に述べた崩壊箇所と同様の地形的特徴を有しており、崩壊のメカニズムは同一と推察される。

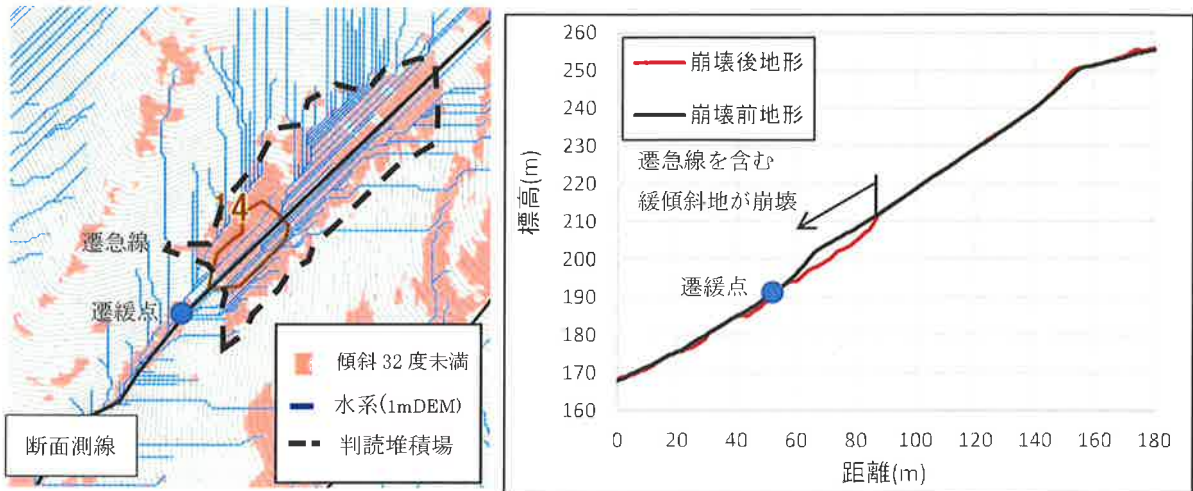


図 16 崩壊前の地形図と縦断地形（崩壊地 ID14）

## 5. 2 数値地形を用いた地形的に 0 次谷における崩壊起因型土石流が発生しやすい場の抽出方法の検討

崩壊起因型土石流が発生した箇所の特徴の一つとして、地形的特徴を整理した結果、集水面積、緩傾斜地（堆積場）、その面積、さらに緩傾斜地下部の遷急線が特徴であり、同様の地形場を示す箇所において、遷急線を含む緩傾斜地が崩壊し、土石流化していることが分かった。このことから、同様の地形場を広域から抽出しておくことで、同様な崩壊メカニズムが発生しやすい場所を抽出できる可能性があることがわかった。

そこで、数値地形データを用いて、広域から同様の地形的特徴を有している箇所を抽出するために、地形的特徴を表現できる DEM サイズについて、1m、5m、10mDEM を用いて検討を行った。

### (1) DEM サイズによる検討

#### 1) 谷地形の抽出

0 次谷であることが条件として挙げられる。谷を数値地形データから抽出するために、木下らの方法<sup>7)</sup>を参考に、DEM による平均曲率を用いて水系網を作成し谷を抽出した。この方法は、平均曲率 (H) は、曲面上の 2 点間を結ぶ最短距離の曲線の曲率の最大値と最小値の平均で定義される量と定義し、斜面の最大傾斜方向の曲率（縦断曲率）と、それと直交する方向の曲率（横断曲率）により斜面形状を地形量として表現するもので、縦断形状が上に凸の地形であれば縦断曲率は負の値となり、横断形状が凸地形であれば横断曲率は正の値となる。これら 2 つの曲線が両方も凸であるならば尾根地形を示し、平均曲率の値は負となる。また、両方も凹であるならば谷地形を示し、平均曲率の値は正となるもので、DEM サイズと閾値の設定で、目視で確認できる 0 次谷を抽出することができる。図 17 に示すように崩壊起因型土石流が発生した 0 次谷を抽出するために DEM サイズを 1m、5m、10m に変化させて検討を行った結果、1mDEM では、抽出すべき 0 次谷が不鮮明であり、5m、10mDEM では鮮明になることがわかった。したがって、谷地形を抽出するためには、5m、10mDEM を用いて評価する必要があると言える。

#### 2) 集水面積による対象箇所の抽出

遷緩点までを一つの集水として対象の 0 次谷を抽出するために、1m、5m、10mDEM の標高から最急勾配方向を求

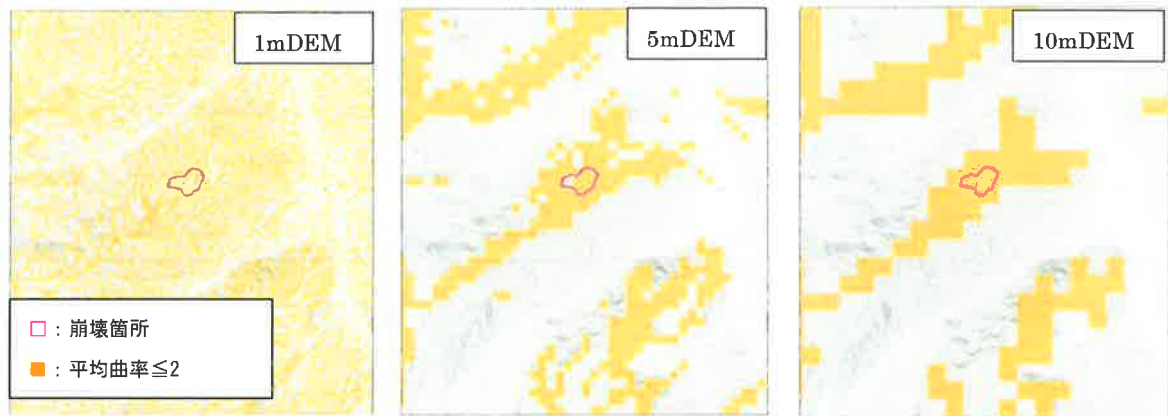


図 17 DEM サイズを変化させて、谷地形を抽出した例

め、累積面積を求めた (図 18 参照)。それぞれのメッシュサイズが異なるため、水系の上流端の位置が異なる。この検討では、1m、5mDEM を用いた場合、集水面積 4,500m<sup>2</sup> 以上となる水系上流端と目視で判断した遷緩点とが一致する。一方、10mDEM の場合、遷緩点と水系上流端の位置が一致しない結果となった。これは、抽出に用いるセルの大きさが適切でないためと考えられ、遷緩線までを一つの流域として対象の 0 次谷を抽出するためには、1mDEM、5mDEM を用いて、抽出する必要があると言える。

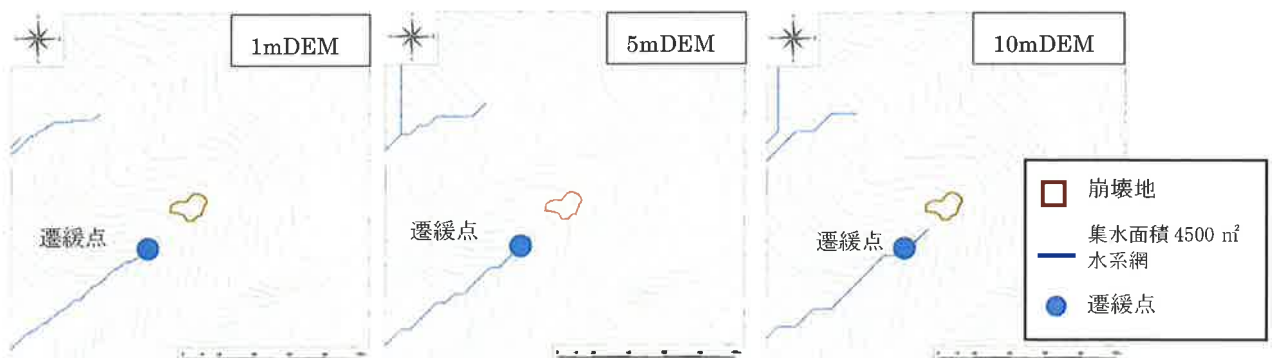


図 18 DEM サイズを変更し、集水面積 4,500m<sup>2</sup> 以上の 0 次谷を抽出した例

### 3) 0 次谷内に分布する堆積場の抽出

0 次谷における地表面傾斜角 32 度未満の堆積場が集合している箇所について 1m、5m、10mDEM の表面傾斜角を用いて抽出を行った (図 19 参照)。いずれの場合も目視で判読した堆積場を抽出することができている。しかしながら、

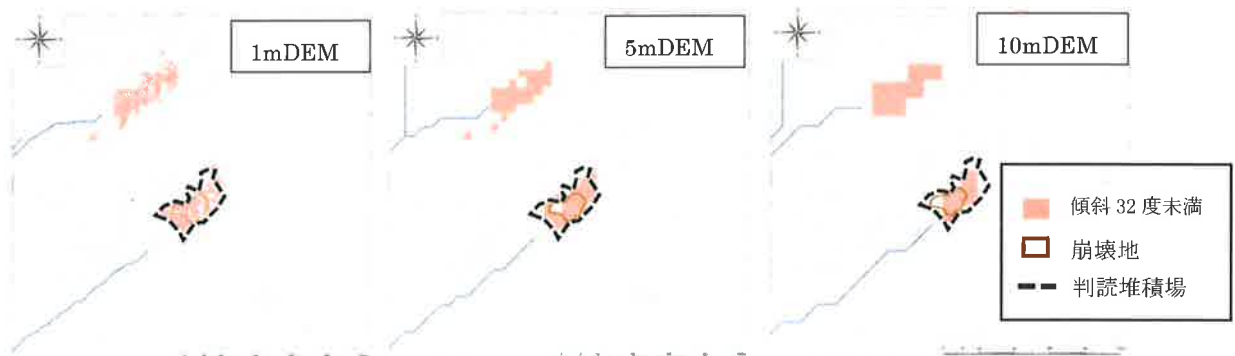


図 19 DEM サイズを変更して堆積場と考えられる地表面傾斜角 32 度未満セルを抽出した例



10mDEM の場合は、目視で判読した堆積場より小さい面積となっており、同様な地形を抽出する際には、堆積場の集合している箇所を評価できず、見逃してしまう可能性があると考えられる。このことから、1mDEM、5mDEM を用いて、抽出するのが良いと言える。

#### 4) 緩傾斜地下部の遷急線の抽出

緩傾斜地下部の遷急線を 1m、5m、10mDEM を用いて確認した (図 20 参照)。この図からも DEM のサイズが細かいほど遷急線が明瞭になっている。10mDEM では、遷急線が不明瞭で、遷急線の判断ができないことがわかる。一方、1mDEM を用いた場合、緩傾斜地下部の遷急線が明瞭であり、1m、5mDEM を用いて緩傾斜地下部の遷急線を抽出する必要があると言える。

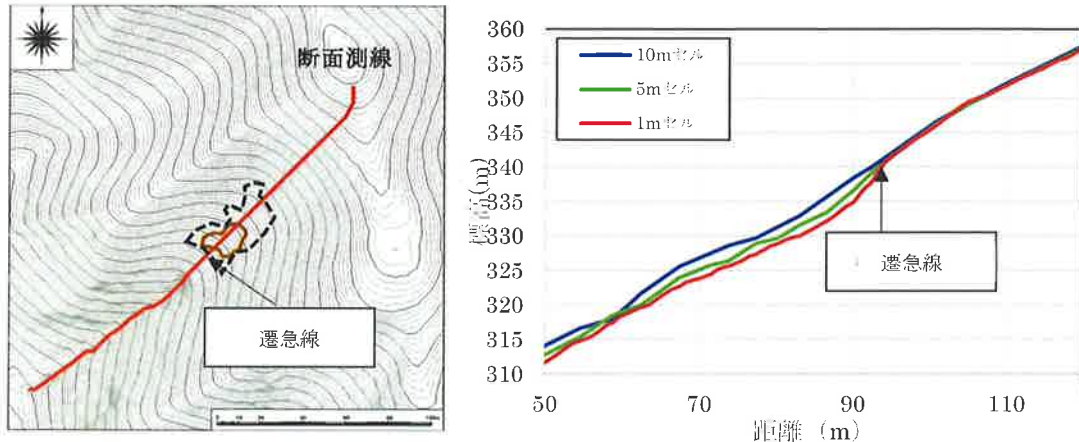


図 20 DEM サイズを変更して緩傾斜地下部の遷急線を確認した例

#### 5) 対象箇所の絞り込みに適した DEM サイズのまとめ

崩壊起因型土石流が発生した溪流を対象に、発生箇所の谷地形、集水面積、0次谷内に分布する堆積場、さらに緩傾斜地下部の遷急線の地形的特徴を整理した結果、対象とした箇所を抽出するためには、1mDEM では詳細な地形変化が反映されてしまい、抽出箇所の地形的特徴の設定が難しい場合があることがわかった。一方、10mDEM では遷急線下部の急崖が不鮮明であり、今回抽出を試みている地形場を正しく評価するには DEM サイズが粗いと言えた。一連の検討の結果、5mDEM はいずれの地形的特徴も概ね良好に表現できており、今回抽出を試みている地形場を正しく評価できると判断できる。したがって、地形的特徴から崩壊起因型土石流が発生する可能性の高い箇所を絞り込むためには、5mDEM が最適であると判断して、以降の検討に用いることとした。

#### (2) 5mDEM を用いた 0 次谷における崩壊起因型土石流が発生しやすい場の抽出条件の設定

現地調査を実施した崩壊地 (ID252) は、先に述べたように、①集水面積 4,500m<sup>2</sup> 以上の 0 次谷である、②地表面傾斜角 32 度未満が分布、その面積は 950m<sup>2</sup> 程度である、③緩傾斜地の下流部は明瞭な遷急線と遷緩点が認められる。この地形的特徴を 5mDEM で表現し、広域から効率的に同様な地形場が抽出できるよう抽出条件について検討した。

抽出する 0 次谷を絞り込むために、まず、5mDEM を用いて、標高から最急勾配方向を求め、累積面積 4,500m<sup>2</sup> 以上の水系上流端を求めた。この水系上流端は、0 次谷の下部の遷緩点と考えた。求めた水系上流端から水系沿いに急傾斜地 35 度以上が 10m 程度連続していることを条件とした。これは、現地調査した調査地の崩壊前の 5mDEM から作成した縦断面図 (図 21 参照) から、遷急線下部の斜面が、35 度以上で、10m 程度連続しており、ボトルネックとなる箇所で、浸食と堆積の境界部で地形的に急崖が形成されやすくなる場で特徴的な地形を表しているのではないかと考える。

この条件を崩壊地 (ID252) に適用した例を示す。この方法を使うことで、図 22 に示すように遷緩点とその上流の急傾斜地が抽出でき、図の上にある 0 次谷は、急崖の条件に該当しないため、抽出されず、絞り込みがうまくできていると言える。

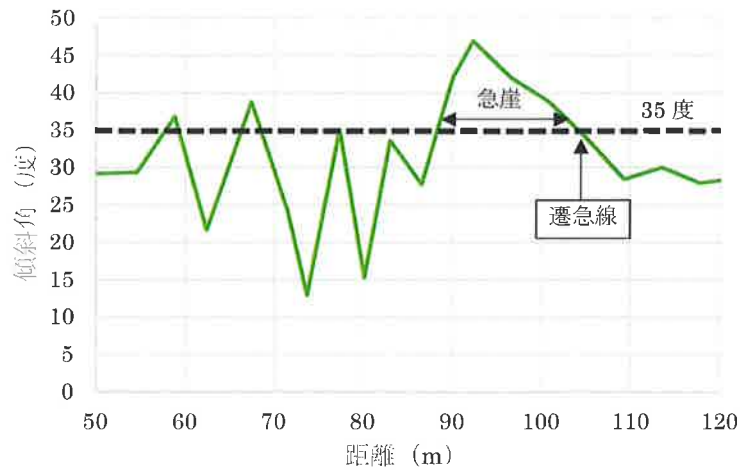


図 21 縦断面における 5mDEM の地表面傾斜角の変化 (ID252)

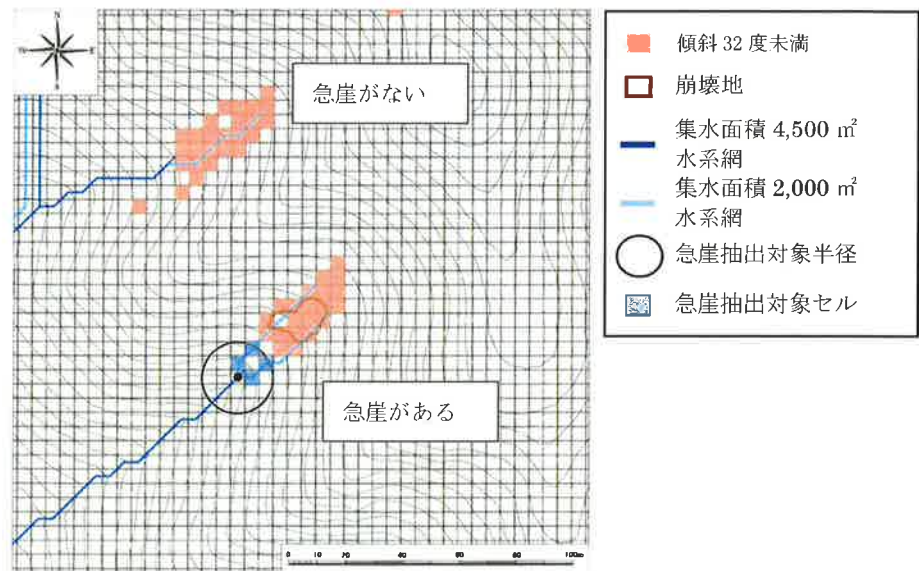


図 22 遷急線下部の急崖抽出条件設定と適用結果 (ID252 周辺)

次に、遷急線上流側の緩傾斜地（堆積場）の抽出条件について検討した。調査地は、地表面傾斜 32 度未満の堆積場で崩壊が生じていたが、傾斜があまりにも緩やかな場合、地下水位が上昇したとしても崩壊に至らないと考えられることから崩壊地 (ID252) 周辺を目視で判読した堆積場の地表面傾斜角についてその分布状況を確認した。その結果、目視で判読した堆積場の地表面傾斜角は 28 度以上 32 度未満であったことから、堆積場の抽出条件として、地表面傾斜角の抽出条件を 28 度以上 32 度未満に設定した。この堆積場の地表面傾斜角は、堆積している材料に依存しているものと考えられる。一般的な砂礫の安息角が 30 度程度と考えると安息角に近いと言える。

さらに遷急線上流近傍の緩傾斜地で、かつ谷地形を呈している場の面積を定義することで、今回の調査地のように崩壊後、後退性崩壊が発生し、土石流化する危険性の高い 0 次谷を抽出できると考え、条件の整理を行った。

調査地では、遷急線上流側に谷地形で地表面傾斜角 28 度以上 32 度未満が遷緩点（累積面積 4,500m<sup>2</sup>以上の水系上流端）から 80m 以内に 525m<sup>2</sup>分布していたことから、この値以上を抽出条件のしきい値とした（図 23 参照）。



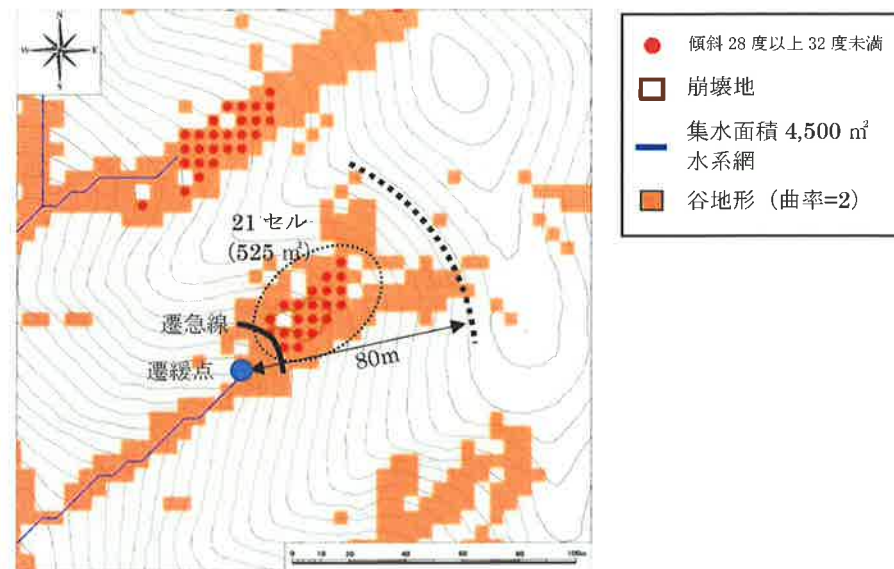


図 23 抽出条件の設定 (ID252)

以上の抽出条件を用いることで、詳細検討した調査地 (ID252) と同様な地形的特徴を有し、0 次谷における崩壊起因型土石流が発生しやすい特徴を有する地形場が 5mDEM を用いて抽出できると考えられる。この抽出条件ならびに GIS を用いた抽出の手順について、図 24 に示した。地形、地質が変わる場合は、集水面積や、曲率、急崖や緩傾斜地の傾斜角など、抽出条件のしきい値について検討することで今回の崩壊メカニズムと同様の土砂移動が発生しやすい危険性の高い 0 次谷の抽出が可能となると考えている。

## 6. 5mDEM データから 0 次谷で崩壊起因型土石流が発生しやすい場の抽出とその場の検証

崩壊前の 5mDEM を用いて、図 24 に示した流れで、平成 26 年 8 月豪雨によって丹波市域で崩壊、土石流が多発した地域 (図 3) を対象に 0 次谷で崩壊起因型土石流が発生しやすい場の抽出を行った。

抽出した結果を図 25 に示した。抽出の結果、現地調査を実施した崩壊地 ID252 と類似する箇所は、13 箇所あり、その内、0 次谷の堆積物 (下流に遷急線が認められる) が遷急線付近で崩壊し、土石流化 (A タイプ) したと判断された崩壊地 3 箇所 (ID14、30、73) が抽出される結果となった。また、抽出された箇所と災害が発生した平成 26 年 8 月豪雨時の最大時間雨量の分布図を図 26 (左)、最大時間雨量観測時刻までの累積雨量分布を図 26 (右) に示す。

この図から、A タイプの崩壊、土石流化した 4 箇所は、最大時間雨量 50mm 以上の範囲内であつ、最大時間雨量観測時刻までの累積雨量が 250mm 以上の範囲内に集中している。一方、同様の降雨を受けている範囲内に位置するにもかかわらず崩壊、土石流が発生していない箇所が 3 箇所ある。なぜ、この場所で崩壊、土石流が発生していないか、現時点では不明である。今後、現地調査を行い確認する必要がある。

崩壊、土石流が発生していない 6 箇所は、降雨が集中した範囲外にあり、まとまった降雨を受けたが、わずかに崩壊に至る地下水条件にならなかったものと推察する。

以上、地形的な特徴が同様な箇所を広域から抽出することができ、同様な崩壊メカニズムで発生した箇所を抽出することができた。今後、現地調査による確認を行い、抽出された箇所の状況を確認し、地形、地質構造、土層の分布状況、堆積物の性状などを確認したい。

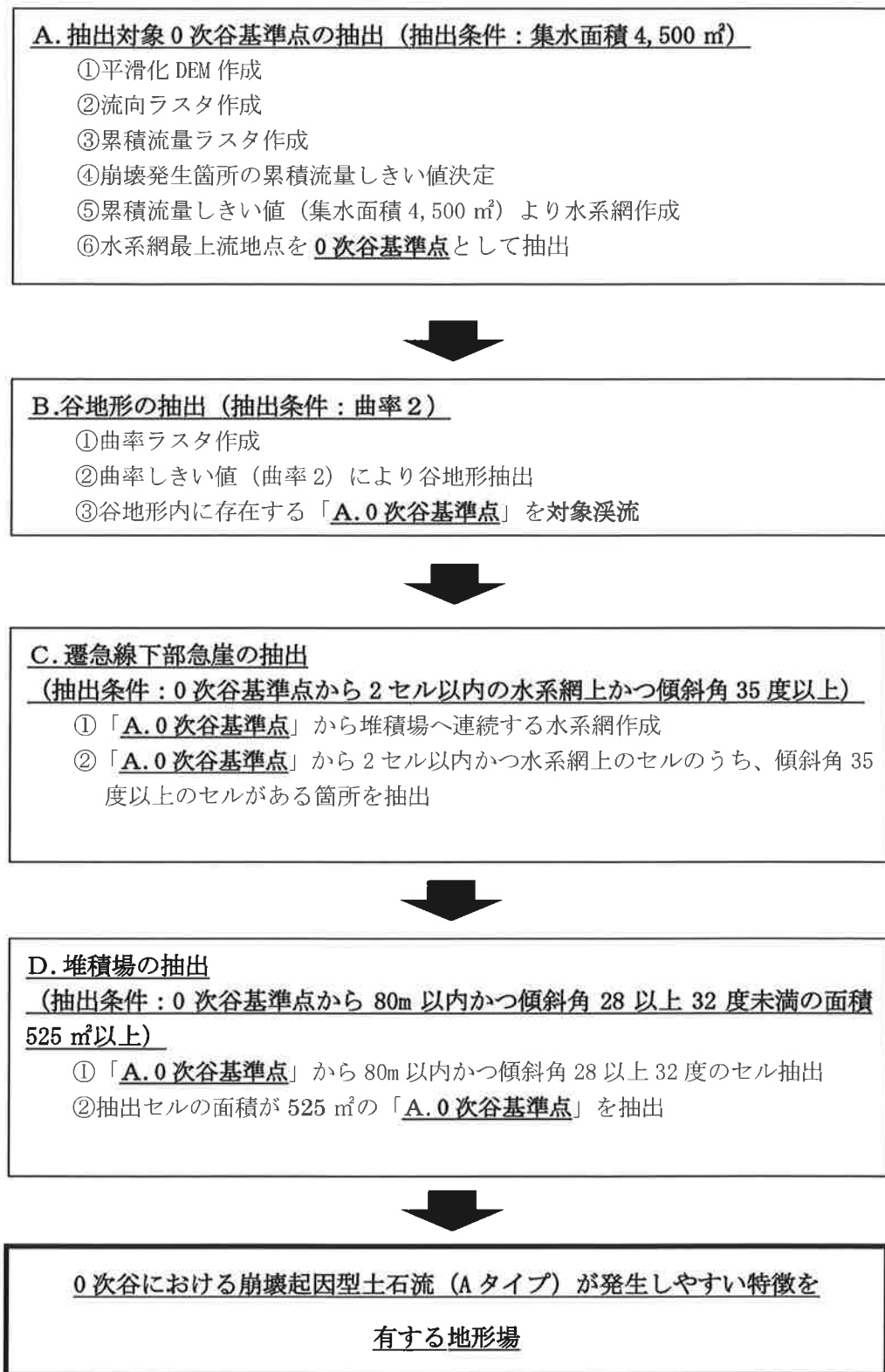


図 24 0 次谷における崩壊起因型土石流が発生しやすい特徴を有する地形場抽出の流れ



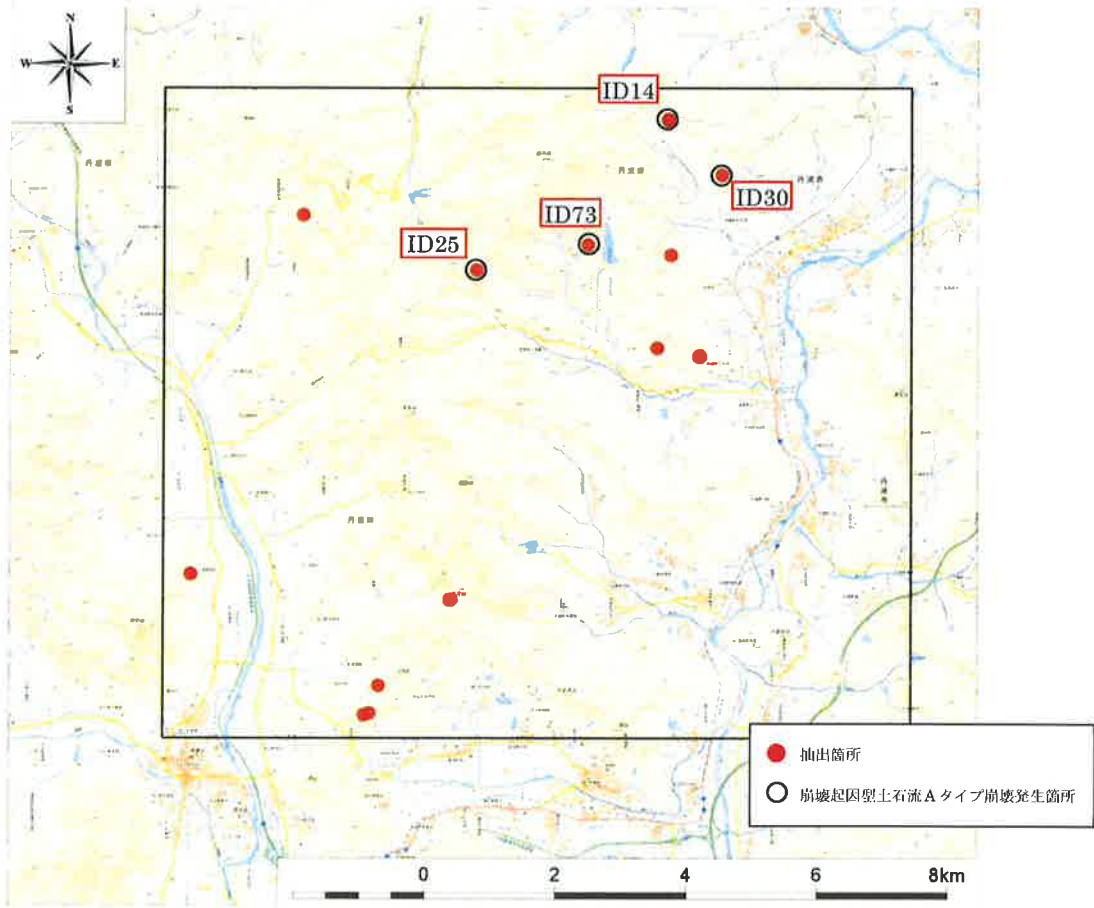


図 25 0 次谷における崩壊起因型土石流が発生しやすい特徴を有する地形場の抽出結果

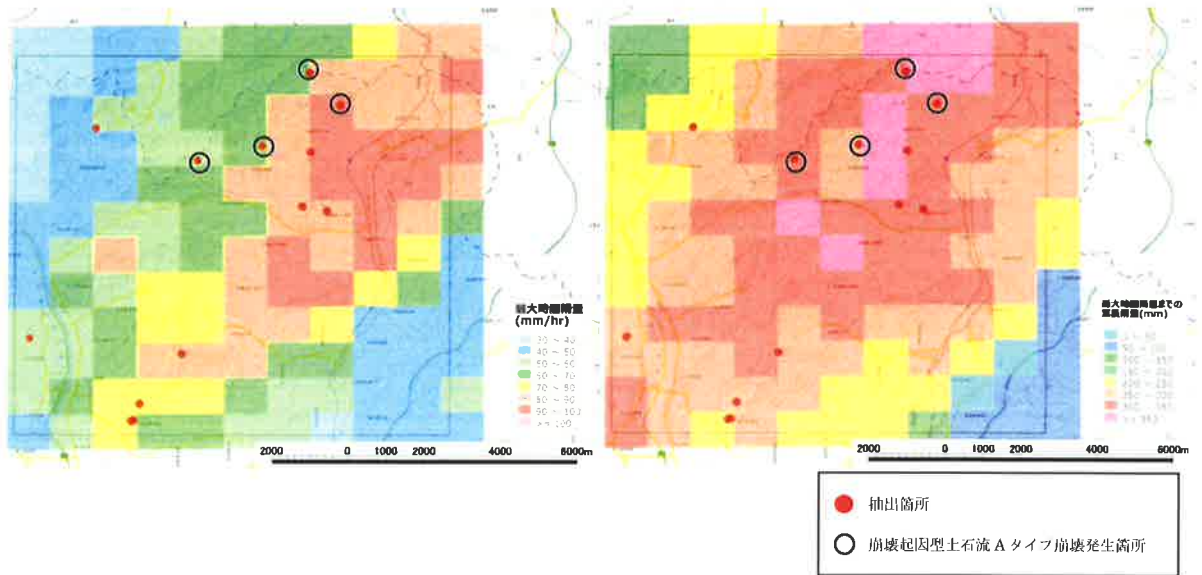


図 26 抽出箇所と最大時間雨量分布、最大時間雨量時間までの累積雨量分布

## 7. おわりに

本報告では、数値地形データから0次谷における崩壊起因型土石流が発生しやすい場の抽出について、抽出精度を高めるため、過去に行った検討の結果を踏まえ、地形的特徴の見直しやしきい値の検討を行った。それら一連の検討結果についてまとめ、0次谷における崩壊起因型土石流が発生しやすい場の抽出方法について提案した。抽出の結果、現地調査を実施した崩壊地と類似する箇所は、13箇所であり、その内、0次谷の堆積物（下流に遷急線が認められる）が遷急線付近で崩壊し、土石流化する（Aタイプ）と判断される3箇所（ID14、30、73）が抽出されて、妥当な結果となった。このことから、崩壊起因型土石流（Aタイプ）の発生場を抽出することができた。一方、抽出された10箇所については、同様な地形的特徴を有するものの崩壊、土石流化していない。今後、これらの箇所について、地形、地質構造、土層の分布状況、堆積物の性状などを調査して分析を進めたい。

最後に、この成果を現在運用されているシステムに、取り込み、降雨条件によるしきい値や危険度判定方法に工夫を加え、崩壊起因型土石流の発生を警戒避難情報に活用したいと考えている。

### 【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。この場を借りて厚く御礼申し上げる。

### 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・孝子綸図：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) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則・鏡原聖史・根本信行・植田允教：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，建設工学研究所論文報告集，62，pp. 67-80，2020.
- 5) 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.
- 6) 地質図Navi：<https://gbank.gsj.jp/geonavi/geonavi.php#15,35.23880,135.08135>，(2021.9.11閲覧)
- 7) 木下博久・長谷川修一・野々村敦子・山中稔：谷密度を指標とした流域スケールにおける斜面崩壊危険度評価手法の検討，応用地質，59巻6号，pp. 472-484，2019.

### 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