

# 動的変動が事前に観測されない地すべりの規模予測に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 31～令 3

担当チーム：地すべりチーム

研究担当者：杉本宏之、神山嬢子

## 【要旨】

明瞭な地すべり変動が観測されない潜在的な地すべりでは、地すべりの規模や被害範囲の予測が難しい。そのため、ボーリングコアを用いたすべり面判定手法として、すべり面の画像を学習したディープラーニングモデルを構築し、入力画像の留意点について検討した。また、地震により火山灰被覆丘陵で発生する崩壊性地すべりの危険斜面抽出のために、すべり面となりうる軽石の物理的性質の調査、および崩壊性地すべりの発生に係る要素の抽出を行った。また、被害範囲予測のために長距離移動メカニズムの調査を行った。

キーワード：すべり面判定、ディープラーニング、火山灰、崩壊性地すべり

## 1. はじめに

地すべり対策において、地すべりの規模を決定し、被害範囲を推定することが重要である。しかし、明瞭な地すべり変動が観測されない場合や、明瞭な地すべり地形が認められない斜面で発生する潜在的な地すべりにおいては、地すべりの規模の決定や、被害範囲の推定が難しい。そのため、本研究では、動的変動が事前に観測されない潜在的な地すべりの規模、および被害範囲を予測する手法として、①ボーリングコアを用いたすべり面判定手法、および②地震により火山灰被覆丘陵で発生する崩壊性地すべりの危険斜面抽出手法と被害範囲予測手法について検討を行った。

## 2. すべり面判定手法に関する検討

地すべり滑動に伴う明瞭な地中変位が観測されない場合、ボーリングコアを元に判定が行われるが、これには専門的な知識・経験が必要である。しかし、技術者が多くのすべり面判定の経験を積むことには時間を要する。また、すべり面判定の際に参考となるコアの風化や破砕の程度等を定量化するには労力を要する。一方、多くのデータを蓄積し学習することで、入力されるデータの特徴を機械的に抽出可能なディープラーニング技術は、これらの課題解決につながり、効率的なすべり面判定を支援できる可能性がある。

そこで、本検討では、すべり面の画像を学習したディープラーニングモデルを構築し、モデルに入力する画像データの違いが、モデルがすべり面かどうかを分類する結果に与える影響を検討したり。

## 2.1 検討方法

ディープラーニングモデルは、画像分類の手法を用いた。「すべり面を含む画像」と「すべり面を含まない画像」のラベル付き画像を訓練データとして学習させ、検証のために与えられた画像データがこのうちどちらであるかを分類するものである。画像データは、ボーリングコア標本を鉛直方向に切断した際の切断面のスキャン画像を用いた。標本は、エポキシ樹脂等を用いてコアを樹脂で固め、鉛直方向に切断・研磨したもので、切断面にはすべり面に特徴的な微細な構造が観察できる<sup>2)</sup>。

モデルに入力する画像は、画像の中央付近にすべり面が配置されるように調整した縦横比 2:1 (320×160pixel) の長方形の画像とした(表-1)。この画像に対し、図-1 に示す①カラー画像、②画質が粗い画像 (①を1/2縮小後に2倍に拡大)、③グレースケール画像を作成し、各画像の訓練データを学習したモデルを構築した。なお、学習には、畳み込みニューラルネットワークを用いて、各画像とも同じパラメータを用いた。また、画像ごとにモデルが評価データを分類した結果を比較した。

表-1 使用した画像データ

	すべり面を含む画像	すべり面を含まない画像	合計
訓練データ	6	69	75
評価データ	9	9	18
合計	15	78	93

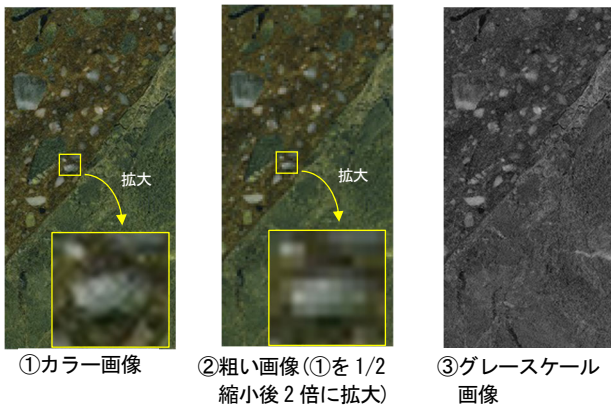


図-1 データ画像例

## 2.2 検討結果

各画像を学習したモデルにより評価データを分類した結果、正解率は72%~89%であった(表-2)。すべり面を含む画像の再現率は、①カラー、③グレースケール、②粗い画像の順となった。ただし、①と③の差は小さく、③と②の差が大きい。画像の色調の違いによる影響より、画像サイズ(画質)による評価結果への影響が大きいことが考えられる。また、すべり面を含まない画像では、全てのケースで再現率が1.0となった。これは、すべり面を含まない画像の訓練データ数が多いことによるものと考えられる。

モデルの学習に用いる画像データが少ないことに課題があるものの、入力画像の解像度に留意することで、ディープラーニングモデルがすべり面判定の支援に活用できる可能性があることが分かった。

表-2 モデルの分類結果

画像データの種類	分類結果		再現率(%)	正解率(%)
	正解	すべり面と分類 すべり面ではないと分類		
①カラー画像	すべり面を含む画像	7	77.8%	88.9%
	すべり面を含まない画像	0	100.0%	
②粗い画像	すべり面を含む画像	4	44.4%	72.8%
	すべり面を含まない画像	0	100.0%	
③グレースケール画像	すべり面を含む画像	6	66.7%	83.3%
	すべり面を含まない画像	0	100.0%	

## 3. 地震により火山灰被覆丘陵で発生する崩壊性すべりの危険斜面抽出手法と被害予測手法の開発

2018年北海道胆振東部地震、2016年熊本地震など、火山灰に被覆された斜面において地震に伴う崩壊性すべりが多発している。崩壊性すべりは、勾配30°未満の緩斜面で地すべり地形が認められず、土砂災害警戒区域等の指定基準に該当しない斜面で発生し、土塊が長距離移動している例が多く見られる<sup>3)</sup>。地震時

に突発的に発生し、急速かつ移動量大きい土砂移動を伴う現象であるため、防災対策を行うためには、事前の危険斜面の抽出と被害予測を行う必要がある。

そこで、本検討では、地震により火山灰被覆丘陵で発生する崩壊性すべりの危険斜面抽出に向けて、すべり面となりうる風化軽石の物理的特性の調査と、発生に関連する要素の抽出を行った。また、土塊が長距離移動するメカニズムの解明に向けて、土塊底面付近における堆積構造の分析を行った。

### 3.1 すべり面となりうる風化火山灰の物理的特性の調査

杉本ら(2012)は、2011年東北地方太平洋沖地震により白河丘陵において発生した崩壊性すべりについて、発生場の地形・地質的特徴の調査を行い、同地域における危険箇所抽出手法を提案している<sup>4)</sup>。この中で、崩壊性すべりは、風化軽石層中の粘土の弱層がすべり面となっていることを踏まえて、危険箇所抽出のための詳細調査において、すべり面となりうる弱層の有無及び連続性を調査することが提案されている。しかし、どの程度の強度に低下すると崩壊性すべりが発生するかは明らかになっていない。そのため、崩壊性すべりの危険斜面抽出に向けた検討として、風化程度の異なる軽石の土質試験により、すべり面となった軽石の物理的性質を調査した<sup>5)</sup>。

#### 3.1.1 調査方法

すべり面となった軽石の物理的性質を調査するため、滑落崖や側方崖に露出したすべり面と同一層準の軽石から試料を採取し、含水比試験、土粒子の密度試験、粒度試験、および液性限界・塑性限界試験を実施した。試料は2011年から2019年にかけて土木研究所地すべりチームが採取したもので、その諸元を表-3に示す。軽石の風化の程度は、試料採取時に強風化と弱風化に区別した(図-2)。弱風化軽石は、火山灰の組織が残存し、指圧で破碎出来る程度のものである。強風化軽石は、軽石の組織の境界が不明瞭で、指圧により容易に変形する軟弱なものである。

表-3 採取試料一覧

地震	地区	すべり面となった軽石	試料数	
			弱風化	強風化
2016年 熊本地震	南阿蘇村高野台	草千里ヶ浜軽石	2	1
2011年 東北地方 太平洋沖地震	白河市堂ヶ作	TkP	1	2
	白河市葉ノ木平	Sr10	0	2
1984年 長野県西部地震	王滝村御岳高原	On-Pm1	0	2

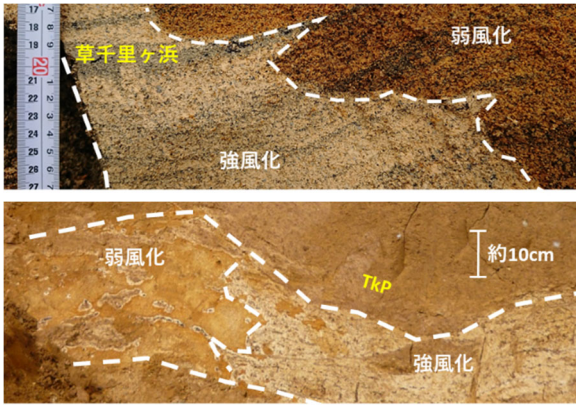


図-2 弱風化と強風下の火山灰の例

### 3.1.2 調査結果

採取試料の液性限界と塑性限界の関係を図-3 に示す。自然含水比が液性限界と同程度、もしくは高い値のものが 10 試料中 8 試料あり、これらは液状もしくは液状に近い塑性状であった。自然含水比はばらつきが見られるが、強風化は概ね液性限界が 110 以下であった。また、図-4 に塑性図を示す。すべり面と同一層準の試料は、B 線より右側かつ A 線より下側に分布しており、A 線にほぼ平行な直線付近に集まる傾向が見られた。グラフの左下側に強風化軽石、右上側に弱風化軽石が分布する傾向が見られ、風化の進行によって液性限界と強度が低下すると考えられる。塑性図上で弱風化軽石はばらつきが見られるが、強風化軽石は塑性指数が 20~50、液性限界が 60~110 の範囲にある。

調査の結果、すべり面となりうる強度にまで風化が進んだ軽石は、液状もしくはそれに近い塑性状であり、風化の進行による塑性指数と液性限界の低下が考えられた。また、異なる地域の試料において、強風化軽石の塑性図中の分布が集まる傾向が見られたことから、液性限界や塑性指数、自然含水比等を指標に、地域によらずすべり面となりうる弱層の判定に用いることができる可能性があることが分かった。今後、さらに事例を蓄積し、弱層の判別指標や判別基準を設定することが課題である。

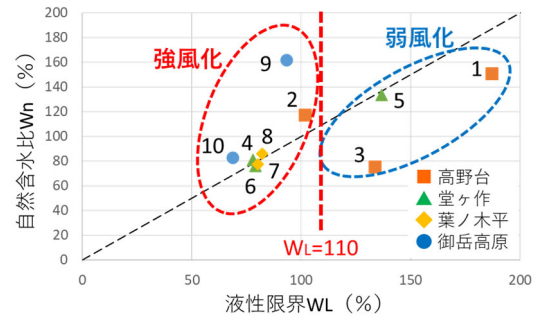


図-3 自然含水比と液性限界の関係

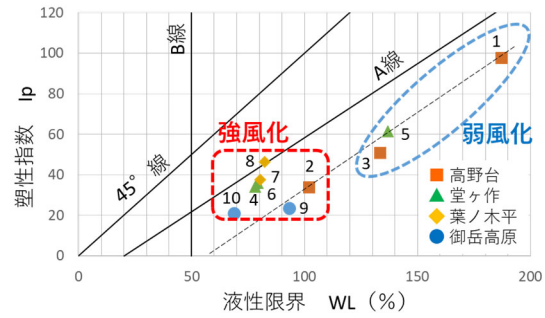


図-4 塑性図

## 3.2 崩壊性地すべりの発生に関連する要素の検討

崩壊性地すべりを引き起こした地震事例において、2018 年北海道胆振東部地震では多数の崩壊性地すべりが密集して発生した一方、2011 年東北太平洋沖地震では北海道胆振東部地震に比べて発生数が少なく、発生数に著しい違いが見られる。そのため、崩壊性地すべりの崩壊面積率の高低にかかわる要素を明らかにすることは、崩壊性地すべりの予測手法を開発する上で、重要なことと考える。そこで、本件等では、複数の崩壊性地すべり事例を対象に、崩壊面積率に着目し、これとすべり面が形成された火山灰の年代、地震の震度、先行降雨との関連性を比較した。

### 3.2.1 検討方法

検討対象は、すべりの火山灰年代が明らかな 6 地域、7 層準の火山灰を対象とした (表-4)。なお、北海道胆振東部地震では、主に年代の異なる火山灰をすべり面

表-4 対象地震と崩壊地ポリゴンデータ一覧

地震	震度/(Mi)	都道府県名	主な地区名	テフラ層と降下年代	崩壊地ポリゴンデータ
1968年5月16日 十勝沖地震	5 [5強相当] (7.9)	青森	八戸	To-HP (15ka)	樽垣ほか(2015) <sup>7)</sup> の崩壊地ポリゴンを 空中写真判読で確認・修正
1978年1月14日 伊豆大島近海地震	5.5 [6弱相当] (7.0)	静岡	見高 入谷	鉢ノ山火山 噴出物(38ka)	大八木(1978) <sup>8)</sup> 、Chigira(1982) <sup>9)</sup> 及び 空中写真判読から崩壊地ポリゴンを作成
1984年9月14日 長野県西部地震	6 [6強相当] (6.8)	長野	御岳 高原	On-pm1 (90ka)	科学技術庁(1985) <sup>10)</sup> 及び空中写真判読 から崩壊地ポリゴンを作成
2011年3月11日 東北地方太平洋沖地震	6強 (9.0)	福島	白河 丘陵	Sr9,10(300ka) Tkp(330ka)	杉本(2014) <sup>4)</sup> の空中写真判読から 崩壊地ポリゴンを作成
2016年4月16日 熊本地震	6弱 (7.3)	熊本	高野台	Kpfa(31ka)	種平ほか(2021) <sup>11)</sup> の崩壊地ポリゴンを使用
2018年9月6日 北海道胆振東部地震	6強 (6.7)	北海道	厚真川 安平川	Ta-d(9ka) En-a(20ka)	村上ほか(2022) <sup>12)</sup> の崩壊地ポリゴンを使用

とした崩壊性地すべりが発生しており、千木良ら(2020)<sup>6)</sup>を参考に、それぞれの火山灰の崩壊が優勢と考えられる2地域を対象とした。

崩壊面積率の算出には、既往研究において作成された崩壊発生域のポリゴン、または空中写真判読結果を基に作成したものをを用いた。なお、長野県西部地震と十勝沖地震の一部では、空中写真判読に基づき、既往研究におけるポリゴンに追加・修正を行った。算出に用いる崩壊地は、対象地域の全てで判読可能な崩壊面積400m<sup>2</sup>以上の規模を対象とした。また、現地に調査や文献等の記載から基盤岩が滑動していることが明らかかな場合は、地すべりと判断し対象から除外した。

崩壊面積率は、単位面積内の全崩壊地ポリゴンの面積の総和に対する単位面積の比により求める(式(1))。

$$\text{崩壊面積率} = \max\left\{\frac{\text{単位面積内の全崩壊ポリゴン面積}}{\text{単位面積}}\right\} \dots \text{式(1)}$$

図-5に崩壊面積率の算出方法を示す。崩壊地ポリゴンを含める長方形(以下、「調査範囲」)を1km格子で区切り、個々の1km<sup>2</sup>内の崩壊地ポリゴン面積(ΣC<sub>k</sub>)を算出した。次に、一辺が1km~5kmとなる矩形を単位面積として、調査範囲内で矩形を1kmずつスキップしながら走査し、各単位面積において最大となる崩壊面積率を求めた。

地震事例における震度は、気象庁震度データベースから調査範囲の最大値とした。震度データがない長野県西部地震と伊豆大島近海地震は、既往文献を参照した。先行降雨は、千木良ら(2020)<sup>6)</sup>の数値を用いた。先行降雨は地域や日数が異なるため、10日間、30日間、60日間の先行降雨量を各日数で除し、さらに100年確率日降水量で除して、日あたりの先行降雨に対す

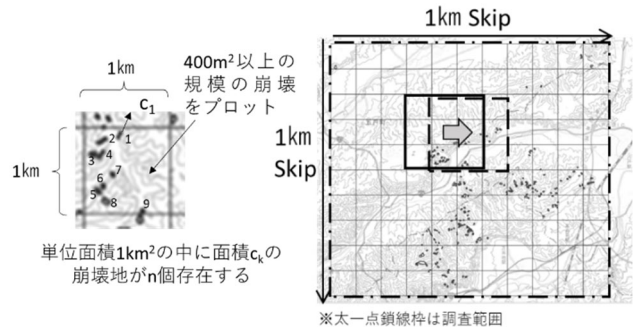


図-5 崩壊面積率の算出方法(単位面積3km<sup>2</sup>の例)

る100年確率日降水量の比を求めた。

### 3.2.2 検討結果

図-6に単位面積における崩壊面積率、および対象地域毎の崩壊面積率と火山灰年代、震度、先行降雨の関係を示す。単位面積と崩壊面積率の関係をみると、単位面積の大小による崩壊面積率の大小の順位は変わらない。単位面積1km<sup>2</sup>の崩壊面積率と火山灰年代の関係では、十勝沖地震を除けば火山灰年代が新しいほど崩壊面積率が大きくなる正の相関がみられ、どの単位面積においても同様の結果であった。崩壊面積率と震度、先行降雨/100年確率日降水量比もしくは100年確率降水量では、60日間先行降雨/100年確率日降水量比において長野県西部地震を除けば相関があるようにも見えるが、震度や降雨指標において明瞭な相関性は認められなかった。震度別に崩壊面積率と火山灰年代の関係を見ると、火山灰年代が新しいほど崩壊面積率が大きく、同程度の火山灰年代では震度が大きいほど崩壊面積率が大きいことが示唆された(図-7)。

これにより、火山灰被覆丘陵における崩壊面積率は、同程度の震度においては火山灰年代が若いほど大きく、震度が大きいほど大きいことが分かった。

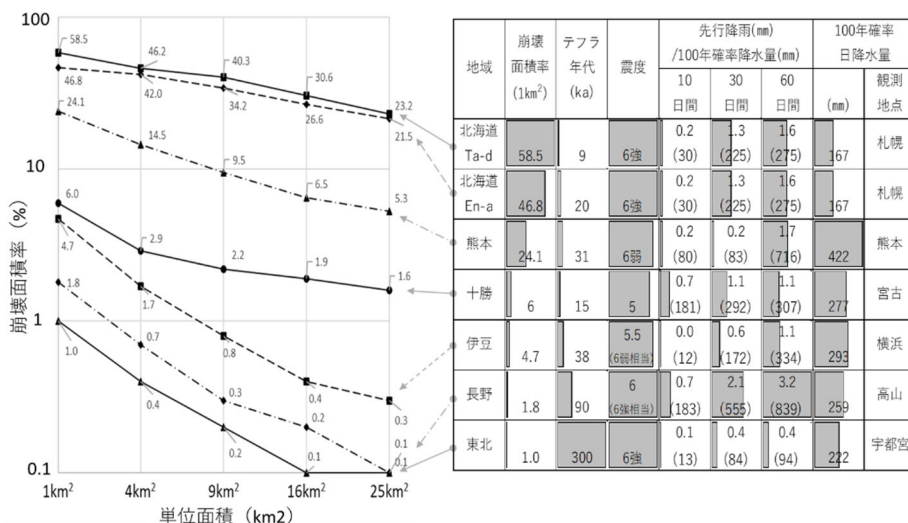


図-6 単位面積における崩壊面積率と火山灰年代、震度、先行降雨との関係

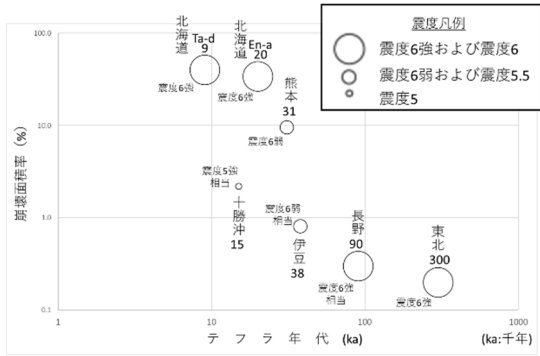


図-7 震度別の崩壊面積率と火山灰年代の関係

### 3.3 移動土塊の長距離移動メカニズムに関する調査

崩壊性地すべりの移動土塊の到達範囲を予測するためには、長距離移動時の土塊の移動プロセスの実態を把握し、土塊が長距離移動する機構を解明することが重要である。長距離移動した土塊や土塊底面のすべり層の構成物質や構造についての特徴、さらにはそれらの移動に伴う変化はあまり検討されておらず、土塊と地表面との境界で生じている現象の実態が解明されているとは言い難い。そこで、地震により崩壊性地すべりが発生し土塊が長距離移動した事例において、対策工事中に現れた法面等に露出したすべり面及び崩壊土砂底面において試料を採取し、大型樹脂固定標本を作成して堆積構造の分析を行った<sup>13)</sup>。

#### 3.3.1 調査方法

2011年東北地方太平洋沖地震によって白河市で発生した葉ノ木平地区の崩壊性地すべりにおいて、図-8に示す5箇所で作製のためにブロックサンプリングした試料を用いた。地点A~Cは地すべりの発生域のすべり面、地点Dは移送域の崩壊土砂底面、地点Eは堆積域の崩壊土砂底面である。ブロック試料はスコリアや火山灰土、黒土からなり、そのままでは脆くて観察が難しいため、樹脂固定標本<sup>14)</sup>を作製した。標本の観察面をスキャンし、観察しやすいように明度・コントラストを調整し、すべり面及び崩壊土砂底面の堆積構造を観察した。

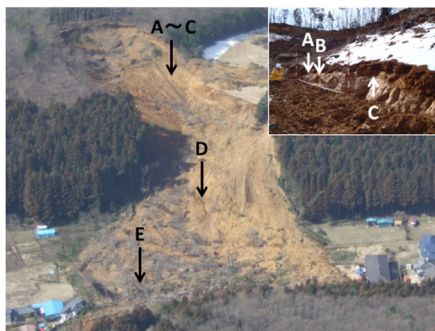


図-8 調査位置

### 3.3.2 調査結果

地点A~Eの大型樹脂固定標本の観察面のスキャン写真を図-9に示す。葉ノ木平地すべりのすべり面は風化したスコリア層であり、すべり面の下位は粘土質火山灰土、すべり面の上位は火山灰土・スコリア層となっている<sup>15)</sup>。すべり面から採取した試料A~Cにおいては、すべり面の上位がスコリア・火山灰土の混在層、下位は乱されていない粘土質火山灰土・スコリアである。移送域から採取した試料Dにおいては、すべり面の下位は地すべり地外の地表面に存在していた黒土層であり、すべり面の上位は風化火山灰(粘土質)と黒土の混在物である。すべり面付近にあった風化火山灰(粘土質)の中に黒土を巻き込んでいる様子がわかる。堆積域から採取した試料Eは、スコリア、風化火山灰と黒土の混在物である。この試料はすべり層の一部を採取したため、試料全体がかく乱されている。

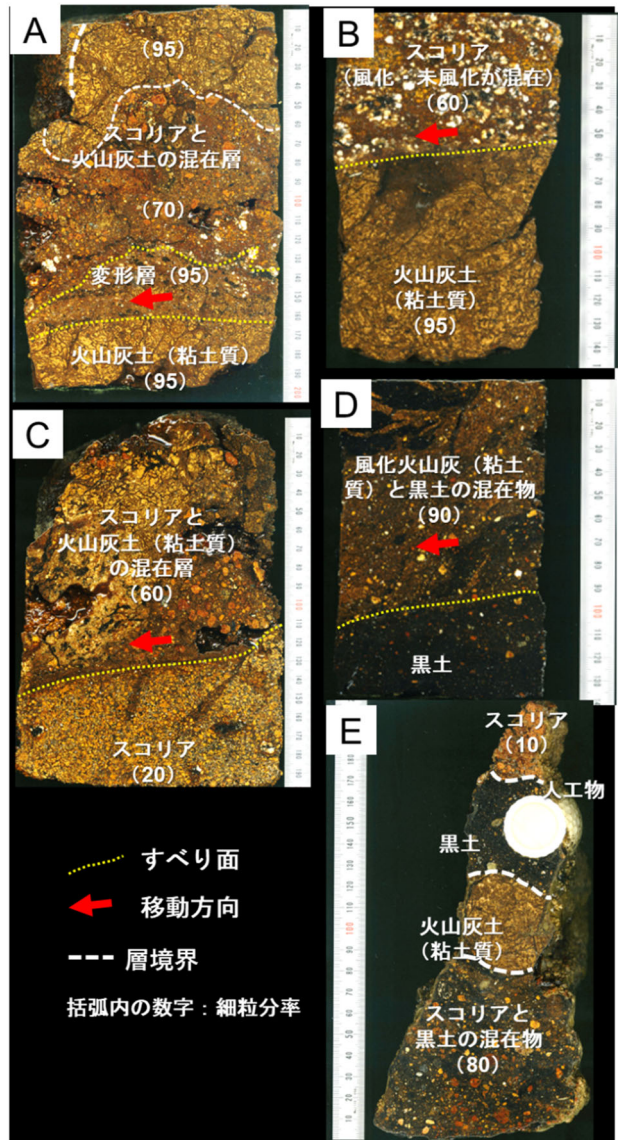


図-9 大型樹脂固定標本のスキャン写真

移送・堆積域は、発生域と比べて、すべり面直上層の細粒分率が高く、軽石等の散在状態が均質である。長距離移動に伴い、すべり層において砂質材料の混合が進んでいることが考えられる。

#### 4. まとめ

動的変動が事前に観測されない潜在的な地すべりの規模、および被害範囲を予測する手法として、①ボーリングコアを用いたすべり面判定手法、および②地震により火山灰被覆丘陵で発生する崩壊性地すべりの危険斜面抽出手法と被害範囲予測手法の検討を行った。

その結果、①ボーリングコアのすべり面画像を学習したディープラーニングモデルは、入力画像の解像度に留意することで、すべり面判定の支援に活用できる可能性があることが分かった。②崩壊性地すべりの危険斜面抽出に向けた検討においては、すべり面となった軽石の物理的性質の調査により、すべり面となりうる弱層の判定において液性限界や塑性指数、自然含水比等を指標として用いることができる可能性があることが分かった。また、崩壊性地すべりの発生に関する要素の検討において、崩壊性地すべりの崩壊面積率と火山灰年代に一定の関係性があることが示された。長距離移動メカニズム調査の結果、移動土塊の堆積構造はすべり層を構成する層準の細粒分率が高く、礫が均等に散在する特徴を有することが分かった。

本研究では、限られたデータや事例の調査であったため、今後は、データや事例の蓄積をもとに、研究結果の検証等を行うことが課題である。また、地震により火山灰被覆丘陵で発生する崩壊性地すべりについては、火山灰の残存状況や斜面安定性に影響を及ぼすと考えられる火山灰年代や地形の傾斜量等の要素を含め、崩壊性地すべりの発生可能性や発生密度の大小を評価する広域リスクマップの検討が課題である。

#### 参考文献

- 1) 藤原一啓・櫻本智美・杉本宏之・藤平大：ディープラーニングによるすべり面の画像認識、第58回日本地すべり学会研究発表会講演集、p.28、2019.8
- 2) 土木研究所：樹脂固定法によるすべり面標本の作製マニュアル（案）：土木研究所資料第4227号、2012.5
- 3) 杉本宏之・柴崎宣之・中野英樹・樽角晃・石井靖雄・檜垣大助：火山灰被覆丘陵における地震起因の斜面変動の土塊到達距離、第53回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp.157、2014.8
- 4) 杉本宏之：地震によって火山灰被覆丘陵で発生する崩

壊性地すべりの危険斜面の抽出、平成26年度日本地すべり学会シンポジウム—大規模地震に備えた地すべり技術の展望、pp.18-21、2014.6

- 5) 野坂隆幸・杉本宏之・神山嬢子：地震によって発生した崩壊性地すべりのすべり面となった軽石の物理的性質、第59回日本地すべり学会研究発表会講演集、p.11、2020.9
- 6) 千木良雅弘・田近惇・石丸聡：地震による地すべり災害2018年北海道胆振東部地震2.5すべり面の形成層準—風化・粘土鉱物、「地震による地すべり災害」刊行委員会、pp.62-68、2020.9
- 7) 檜垣大助・林一成・濱崎英作・（公社）日本地すべり学会河川砂防技術研究開発実施チーム・蒲原潤一：日本地すべり学会による国土交通省河川砂防技術研究開発課題の実施—地震による斜面変動発生危険地域評価手法の開発—、地すべり学会誌、第52巻、第2号、PP.37-44、2015.7
- 8) 大八木規夫：1978年伊豆大島近海地震による見高入谷・大池周辺のランドスライド、地すべり技術、第5巻、第1号、pp.52-53、1978.3
- 9) Chigira.M. : Dry debris flow of pyroclastic fall deposits triggered by the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake: The collapsing landslide at Nanamagari, Mitaka, Southern Izu Peninsula, Journal of natural disaster science, Vol.4, No. 2, pp. 1-32, 1982.
- 10) 科学技術庁国立防災科学技術センター：昭和59年(1984年)長野県西部地震災害調査報告.主要災害調査報告、第25号、p.141、1985.3
- 11) 種平一成・坂井佑介・山越隆雄・平田育士・藤原康正・末富岩雄「地震時斜面崩壊における各種条件が崩壊規模に及ぼす影響の分析」令和3年度砂防学会研究発表会概要集、No.88、pp.491-492、2021.5
- 12) 村上泰啓・水垣滋・藤浪武史：平成30年北海道胆振東部地震による斜面崩壊で発生した土砂・倒木量の推定、砂防学会誌、vol.74、No.6、pp.3-10、2022.3
- 13) 杉本宏之・神山嬢子・櫻本智美・斎藤翼：樹脂固定標本観察による葉ノ木平地すべりの崩壊土砂底面の堆積構造、第58回地すべり学会研究発表講演集、pp.6、2019.8
- 14) 武士俊也・杉本宏之・本間宏樹・宇都忠和：樹脂固定標本によるすべり面標本の作製マニュアル（案）、土木研究所資料第4227号、2012.
- 15) 杉本宏之・宇都忠和・本間宏樹・武士俊也：東北地方太平洋沖地震により白河丘陵で発生した地すべりの発生斜面の地形・地質的特徴、土木技術資料、Vol.54、No.10、pp.18-21、2012.10

# RESEARCH ON TECHNOLOGY FOR PREDICTING THE SCALE OF LANDSLIDES WHERE NO LANDSLIDE MOVEMENT IS OBSERVED

Research Period: FY2019-2021

Research Team: Landslide Team, Erosion and Sediment Control Research Group

Author: SUGIMOTO Hiroyuki

KAMIYAMA Joko

Technology is needed to predict the scale of a landslide and the extent of damage when no landslide movement is observed. Therefore, we investigated a method to determine the slip surface using a deep learning model. We also investigated the physical properties of the slip surface and the factors related to the occurrence of landslides for collapse-type landslides on gentle slope that occur on volcanic ash-covered hills due to earthquakes. Long-range movement mechanisms were also investigated to predict the extent of damage.

Keywords: Slip surface determination, Deep learning, Tephra, collapse-type landslides on gentle slopes