

降下火砕物堆積斜面を対象にした地震時崩壊の
危険区域設定に資する崩土流下範囲の予測回帰モデルの提案

北海道大学大学院 農学研究院
北海道大学大学院 農学研究院

笠 井 美 青
山 田 孝

降下火砕物堆積斜面を対象にした地震時崩壊の 危険区域設定に資する崩土流下範囲の予測回帰モデルの提案

Estimation of runout distance of co-seismic landslides
in a region underlain by pyroclastic deposits

笠井 美青¹・山田 孝²
Mio KASAI and Takashi YAMADA

¹北海道大学大学院農学研究院 准教授

²北海道大学大学院農学研究院 教授

要 旨

2018年に発生した北海道胆振東部地震では、多数の斜面崩壊から崩土が長距離流下することで、斜面から離れた場所でも住居の破壊や人命の損失、田畑の損害、河道の閉塞などの甚大な被害が生じた。この崩土の多くは、現在設定されている土砂災害警戒区域外よりもかなり遠くまで到達したことが分かっている。流動性の高い崩土の流下及び堆積範囲を事前に推定し、将来的にハザードマップに反映させることを目指し、本研究では、胆振東部地震で発生した崩壊を対象に、崩壊斜面の地形的特徴量と土壌分類を説明変数に、崩土の流下距離（斜面末端から崩土の到達した最長距離）を応答変数として、CNN (ResNet-50) による回帰分析及び分類分析を試み、良好な結果を得た。また今後、説明変数として用いる土壌に関する指標を改善していくことを視野に、崩壊すべり面のサンプルを取得し、振動実験を行った。その結果、崩土のすべり面境界付近の高含水テフラ層が地震動によって排水し、すべり面境界付近に水膜を形成することで動摩擦係数が低減し、崩土の長距離移動につながった可能性があることが示唆された。今後は、両知見を組み合わせるとともに、分析対象とする崩壊地数、モデルのアーキテクチャやハイパーパラメータ、クラスの設定の仕方、氾濫原の地形や土地利用などを考慮し、モデルへの取り入れ方モデルの改良をはかる予定である。

〈キーワード：斜面崩壊；崩土；流下距離；テフラ層；動摩擦係数〉

1. はじめに

地震による斜面崩壊は突発的に発生する為、避難はほぼ不可能であり、多くの人命が失われる傾向にある。地震による崩壊危険箇所の推定は国内外で頻繁に実施されているが、崩壊による被害は、崩土が流下し、堆積する範囲で発生する。従って被害の軽減の為に、崩土の流下および堆積範囲も事前に推定し、ハザードマップに反映させる必要がある。2018年に発生した北海道胆振東部地震では、多数の斜面崩壊から崩土が長距離流下することで、斜面から離れた場所でも住居の破壊や人命の損失、田畑の損害、河道の閉塞などの甚大な被害が生じた。この崩土の多くは、現在設定されている土砂災害警戒区域外よりもかなり遠くまで到達したことが分かっている¹⁾。これまで胆振東部地震に関しては、保水性の高い土質に着目した崩壊のメカニズムや崩壊発生場の地形的な特徴について研究が多く実施されてきた²⁾。一方で、そのような土壌で覆われた地域に大規模地震が発生した場合にも適用できる、崩土の流下域の推定の指針となる研究の推進も求められている。そこで本年度は、胆振東部地震で発生した崩壊を対象に、崩壊斜面の地形的特徴量と土壌分類を説明変数に、崩土の流下距離（斜面末端から崩土の到達した最長距離）を応答変数として、CNN（畳み込みネットワーク）による分析を実施した。また今後、説明変数である「土壌分類」を表現する指標を改善してくために、崩壊すべり面のサンプルを取得し、振動実験を行うことで、地震時の動摩擦係数について検討した。

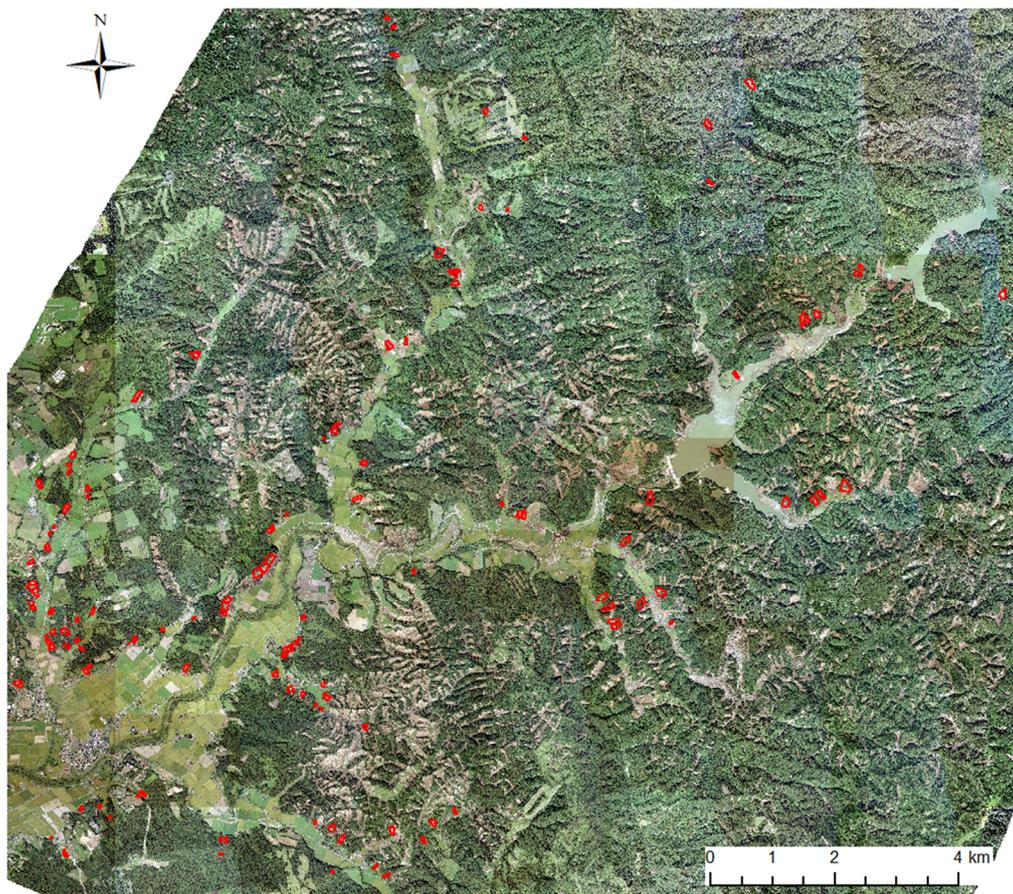


図1 厚真町管内における分析対象崩壊地の分布（赤）。背景は地震直後に取得されたオルソ写真（北海道開発局提供）

2. 研究対象地

対象地は2018年北海道胆振東部地震（Mw 6.7）にて、斜面崩壊が6000箇所以上発生した北海道厚真町管内である³⁾。地域では、広範囲に渡って降下火砕堆積物（テフラ）が表層を覆っており、それらが強風化して保水性の高い土壌をなしている斜面も多い²⁾。

3. CNNによる崩土到達距離の推定

本研究では、地震直後の空中写真、及び航空レーザー測量データ（北海道開発局提供）を視覚化した図より選択した、崩壊地154箇所を対象にする（図1）。崩壊地の選択の条件は以下の通りである。

- ① 崩土が林地、対岸の斜面、建築物、水路の存在により停止していない。なお、これらの存在があっても崩土が移動し続けた場合には、分析対象に含めた。その内訳は、林地内を移動した例が20、建築物に衝突後移動し続けた例が16、水路を通過した例が67である。
- ② 隣接する崩壊地からの崩土が重ならない。重なった例では、崩壊ごとの崩土の流下範囲の識別が困難である。

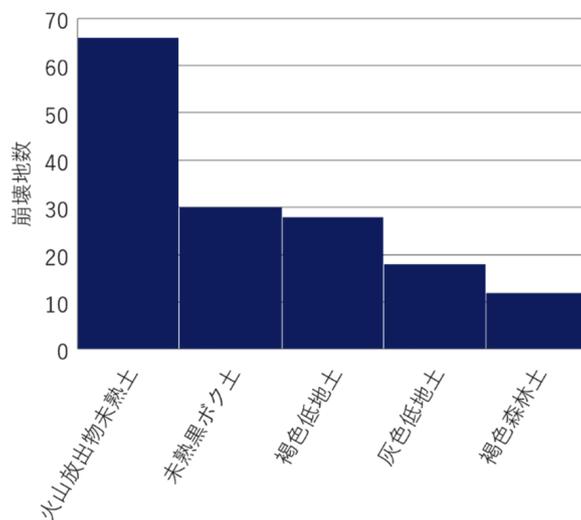


図2 土壌図（農業・食品産業技術総合研究機構）4)に基づく、分析対象崩壊地における土壌分類の頻度分布

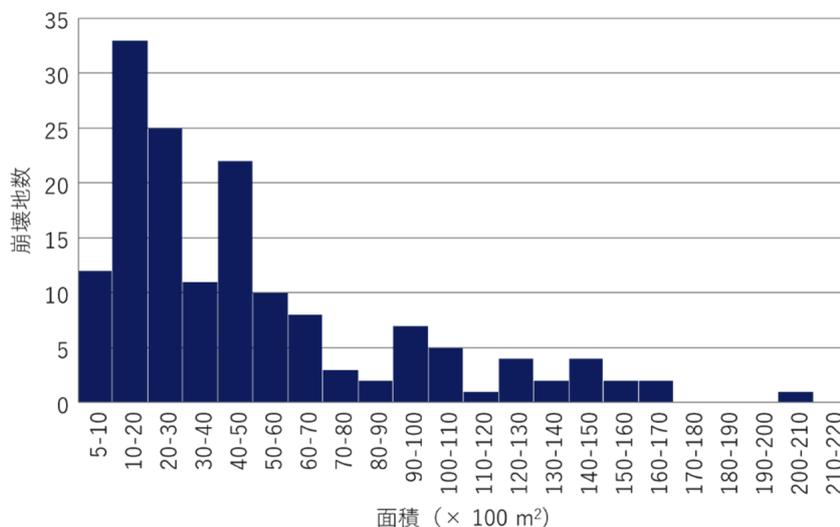


図3 分析対象崩壊地の面積の頻度分布

- ③ 斜面から生産された崩土が、直接氾濫原に達して堆積する。対象地内の小流域では、複数の斜面から生産された崩土が集まって谷を通過し、氾濫原に到達した例も多く見られる。しかしこの例では、崩壊ごとの崩土の流下範囲の識別が困難であり、また谷を通過する際の流水による崩土の運搬プロセスを検討する必要もある。
- ④ 崩土が氾濫原に到達した地点において、氾濫原の傾斜が7度以下である。本年度は、斜面の地形や土壌と、崩土の流下距離との関係を調べる。対象地域では、崩土の流下距離は、氾濫原の傾斜が7度以上で長くなる傾向が見られたため、分析対象外とした。なお、氾濫原の土地利用については、本年度は考慮していない。

農業・食品産業技術総合研究機構の土壌図⁴⁾によると、154崩壊のうちの96か所は火山降下物由来の「火山放出物未熟土」と「未熟黒ボク土」に、46か所は沖積地の「褐色低地土」と「灰色低地土」に、12カ所が降下火砕堆積物の影響が少ない「褐色森林土」に分類される（図2）。また崩壊の面積は、520から20700 m²まであり、5000 m²以下が67 %を占める（図3）。72%の崩壊地において、平均勾配は30度以下であった（図4）。

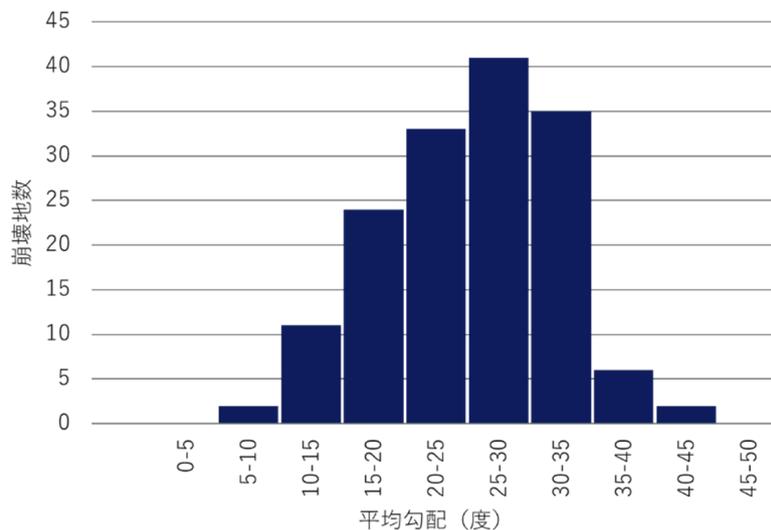


図4 分析対象崩壊地の平均勾配の頻度分布

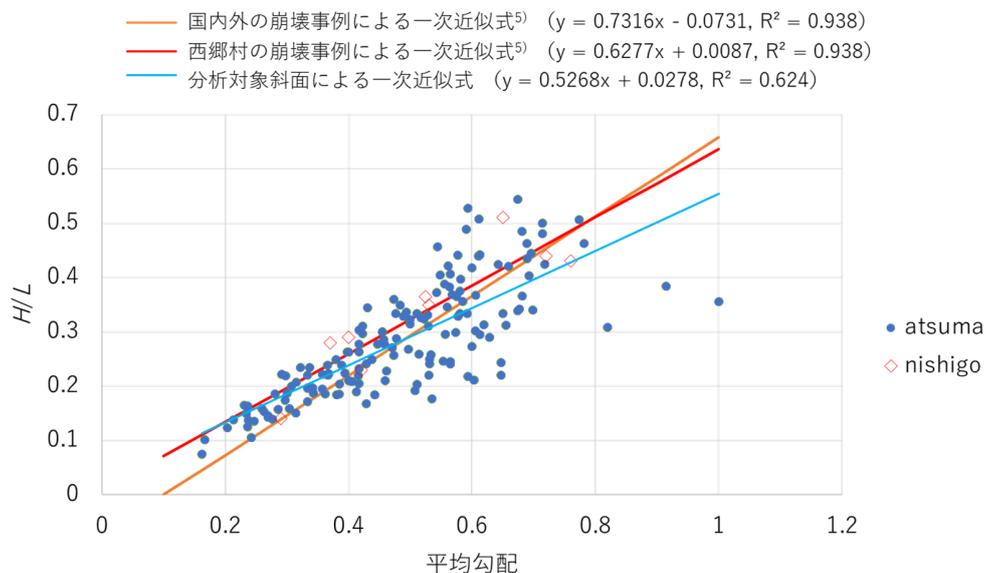


図5 崩壊発生斜面の平均勾配と等価摩擦係数. 森脇 (2000)⁵⁾に加筆

図5に、154崩壊における斜面の平均勾配と等価摩擦係数 (H/L , H : 崩壊高, L : 崩壊地の水平長と斜面末端からの崩土の移動距離) の関係を示す. 森脇⁹⁾は、集中豪雨により緩斜面で崩壊が発生し、崩土が長距離に渡り流動した福島県西郷村の崩壊事例を国内外の事例と比較した. そして、平均勾配と等価摩擦係数の関係にて前者の近似式の傾きが小さく、崩土の流動性が高かったことを示した. 崩壊数は異なるが、本研究の対象崩壊は、福島県西郷村での事例よりも近似式における傾きが小さく、崩土の流動性もより高い傾向にあったと示唆される.

(1) 方法

本年度は崩土の流下距離推定モデルについてCNN (ResNet -50) を用いて検討する. CNNは、地形的特徴を面的に表現できる利点を考慮して採用した.

a) 分析対象単位

崩土の流下距離は斜面から供給される水量と関係すると考え、崩壊を含む集水域 (斜面単位) をポリゴン (斜面ポリゴン) として表し、斜面を分析する単位とした. 崩壊発生後も斜面の地形が大きく変わるケースは稀であったことを踏まえ、集水域は、地震直後に取得された航空レーザー測量データ (北海道開発局提供) から作成した0.5 mグリッドサイズのDEMを用いてArcMap上で区分した.

b) 説明変数

斜面単位での地形的特徴を表現する説明変数として、比高、斜面勾配、平面および断面曲率、TWI (Topographic Wetness Index) を採用した. ここで地震前の地形を反映させるため、また将来的にモデルを他地域に適用できるように発展させることを考慮し、これらの値は国土地理院の10m数値標高モデルからArcGIS上で求められた. 斜面ポリゴン内における各セルの比高については、その標高と当該ポリゴン内の最低標高の差として求めた. TWIは土壌水分量の代理指標として広く用いられており、以下の式で求められる.

$$TWI = \ln(\alpha / \tan\beta) \quad (1)$$

ここで α は、当該セルに対する集水面積 (m^2), β は勾配 (ラジアン) である.

土壌に関する説明変数として、本年度は土壌図 (農業・食品産業技術総合研究機構) による土壌分類をセルごとに割り当てた.

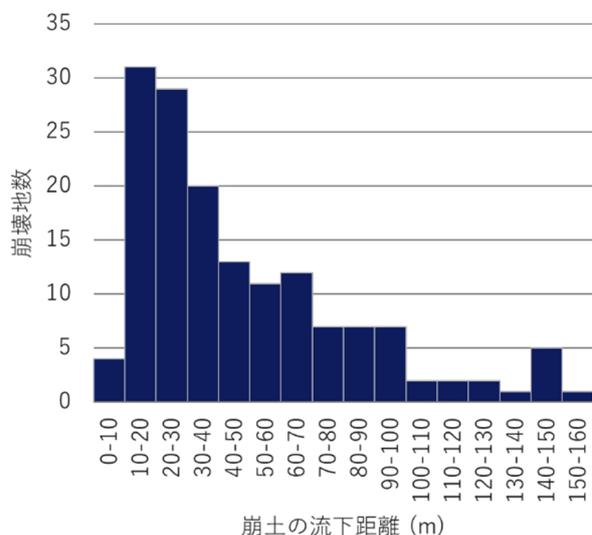


図6 分析対象崩壊地における崩土の流下距離の頻度分布

c) 応答変数

応答変数 (崩土の流下距離) は、崩壊が発生した斜面にて、発生前の斜面脚部の中央部から崩土の堆積範囲の先端までの最大水平距離として、ArcGIS上で測定して求めた. ここで斜面脚部の決定および崩土の堆積範囲の判読には、国土地理院の10 mDEMデータから作成した勾配図、地震発生前後の空中写真、地震直後に取得された航空レーザー測量データより作成した陰影図と等高線図を用いた. 対象の154崩壊における流下距離の内訳を図6に示す. 現在、急傾斜地の崩壊に対する土砂災害警

戒区域では流下距離を概ね50 m以内と設定しているが、分析対象とした崩壊の37 %では崩土が50 m以上流下している。

d) モデルの概要

CNNのモデルには、ResNet-50を採用した。まず各斜面ポリゴンについて、ポリゴンを中心にした東西260 mの範囲を、入力層のデータサイズに合わせるために224×224のセルからなる2次元配列にリサンプリングした。そして各説明変数を結合させて224×224×6の3次元配列を作成した。ここで斜面ポリゴンを含まないセルには0値を割り当てた。また地形に関する説明変数については、全てのポリゴンを対象にした際の最大値と最小値の差を分母に、各セルの値と全てのポリゴンにおける最小値の差を分子にした値を求め、正規化を行った。作成した154配列のうち1配列をテストデータとし、残りの153配列に

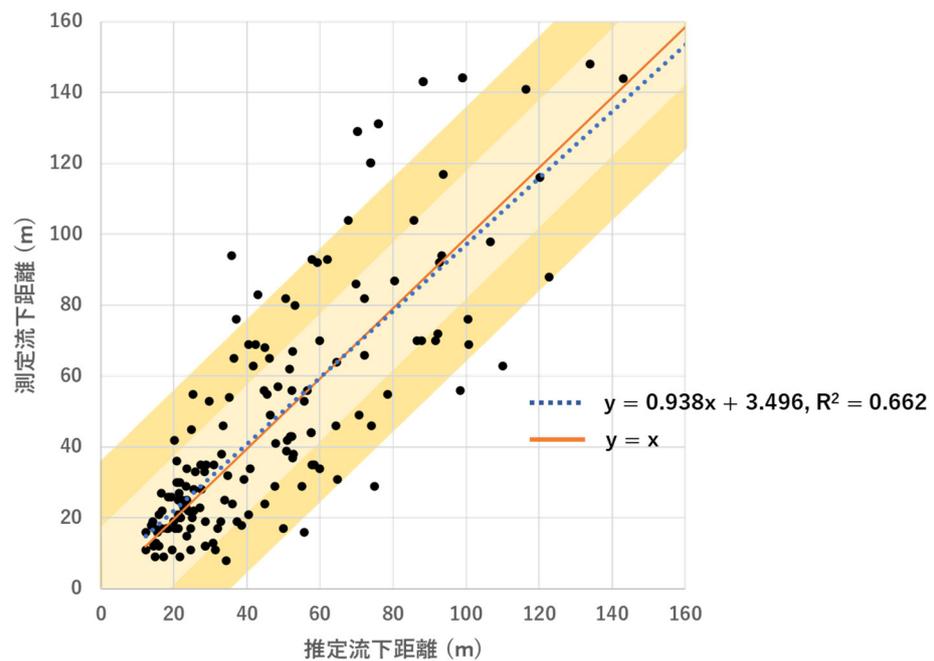


図7 回帰モデルによって推定された流下距離と、測定された距離。(薄く着色された範囲は、両者の差が±20 m、濃く着色された範囲は、両者の差が±40 m)

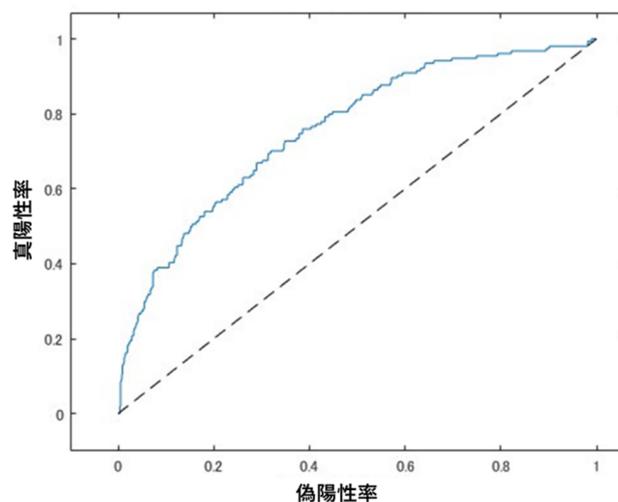


図8 分類モデルのROC曲線とAUC値 (0.757)

ついて0度、90度、180度、270度に回転させて、計612配列に拡張したのち、490配列（80%）を学習データ、122配列（20%）を検証データにランダムに分割した。この操作を、154配列が1回ずつテストデータとなるように行い、154個のデータセットを作成した。

本年度は、回帰モデルと分類モデルについて検討した。回帰モデルではResNet-50にて全結合層の出力サイズを1とし、ソフトマックス層と分類出力層を回帰出力層に変更した。分類モデルでは、斜面脚部からの距離をクラス分けし、崩土がそのクラスへと到達する確率を分類スコアとして表現することを試みた。ここで、流下距離が100 m以上となる斜面単位数が少なかったこと、また基準となるセルのサイズが10 mであることを踏まえ、1：0 m以上20 m未満、2：20 m以上40 m未満、3：40 m以上60 m未満、4：60 m以上80 m未満、5：80 m以上100 m未満、6：100 m以上の6クラスを用意した。このモデルでは、アーキテクチャにおいて、結合層及び分類出力層の出力サイズを6とした。両モデルとも、モーメント項付き確率的勾配降下法を用い、回帰モデルでは初期学習率0.0001、分類モデルでは0.00001とした。過学習を防ぐために、10反復ごとに検証データの交差エントロピー損失を出力し、検証損失が減少しなくなった時に学習を停止させたが、分類モデルは回帰モデルと比べて検証損失が減少しなくなるまでの時間が長くかかったため、初期学習率が10倍となっている。また両モデルとも、L2正則化係数0.0001で

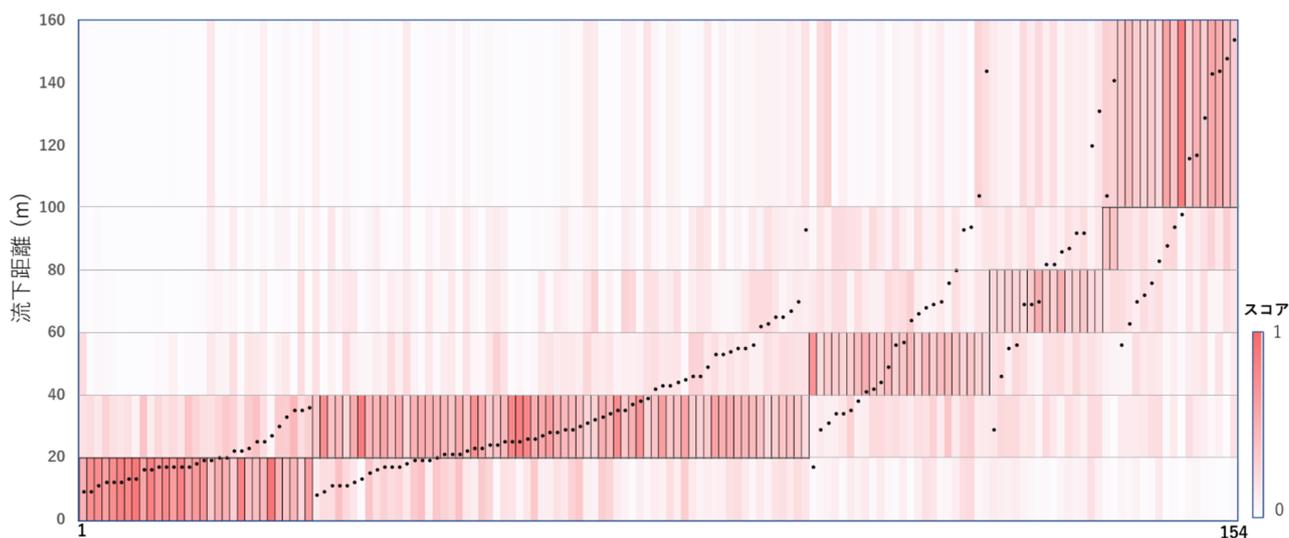


図9 各斜面単位におけるクラスごとの分類スコア。（各斜面単位にて最大の分類スコアを取ったクラスを黒枠で囲む。黒点は計測した流下距離）

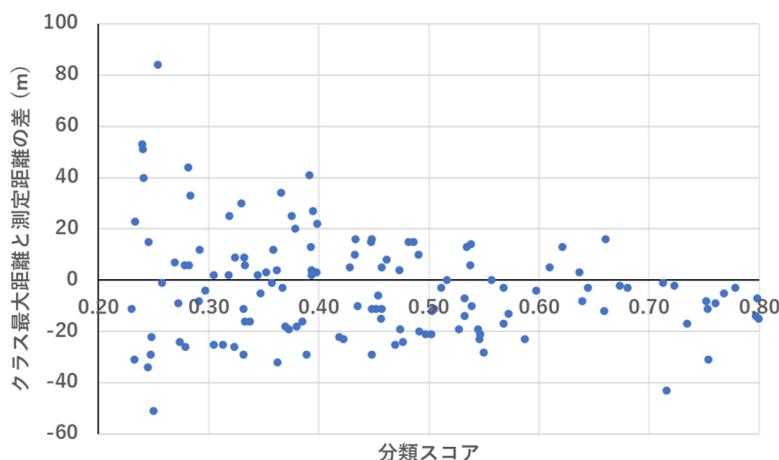


図10 各斜面単位における最大の分類スコアと、そのスコアを示すクラスの最長距離と測定距離との差。（正の値は、各クラスにおける最長距離よりも実際は長く崩土が流下したことを示す）

ミニバッチサイズを32にして全ての層で重みの学習を行った。最後の学習反復に対応するネットワークを用いて、テストデータである斜面ポリゴンに対する崩土の流下距離、もしくは崩土が停止するクラスを推定した。

回帰モデルの精度は、推定された距離と実際の流下距離との差をもって評価した。また、分類モデルでは、斜面の各クラスに対して得られた分類スコアについて、マイクロ平均法を用いてROC曲線及びAUC値を得ることにより精度を評価した。ROC曲線は、ある閾値に対する偽陽性率である $FP/(FP+TN)$ と陽性率である $TP/(TP+FN)$ を求め、閾値を変動させることにより求められる。本研究では、あるクラスにおいて、分類スコアがある値（閾値）以上をとる場合に、そのクラスにて崩土が停止する（陽性、P）とし、0から閾値までをとる場合に、そのクラスには崩土が停止しない（陰性、N）とおいた。そして、陽性と推定されたクラスにて、実際に崩土が停止した場合を真陽性（TP）、停止しなかった場合を偽陽性（FP）とした。

(2) 結果

a) 回帰モデル

回帰モデルによって推定された流下距離と、測定された距離には一次相関が見られ、決定係数は0.662であった（図7）。また分析対象とした斜面単位の94 %において、その差は±40 m以内であり、69 %において±20 m以内となった。

b) 分類モデル

分類モデルではAUC値は0.757となり、適度な精度と評価された⁶⁾（図8）。図9では、各斜面で最大の分類スコアを取ったクラスごとに、計測した流下距離を短い方から順に示している。最大の分類スコアを取ったクラスを基準とした場合、全斜面単位の34 %が、このクラスよりも長く流下し、そのうちの72 %（全体の25 %）は次のクラスにて停止していた。図10では、各クラスにおける最大の分類スコアと、クラスで設定した最大距離（例えばクラス1であれば20 m）と実際の測定距離との差を示す。分類スコアが大きくなるほど、推定されたクラス内もしくは、より短いクラスにて崩土が停止する傾向にあった。特に、スコアが0.7以上であれば、最大の分類スコアをとるクラスより長く崩土が停止したケースは見られなかった。一方、分類スコアが0.4以下になると、クラスの上限值よりも20 m以上長く崩土が流下する例が増え、0.3 以下であれば、40 m以上となるケースが増えた。以上から、最大の分類スコアを取

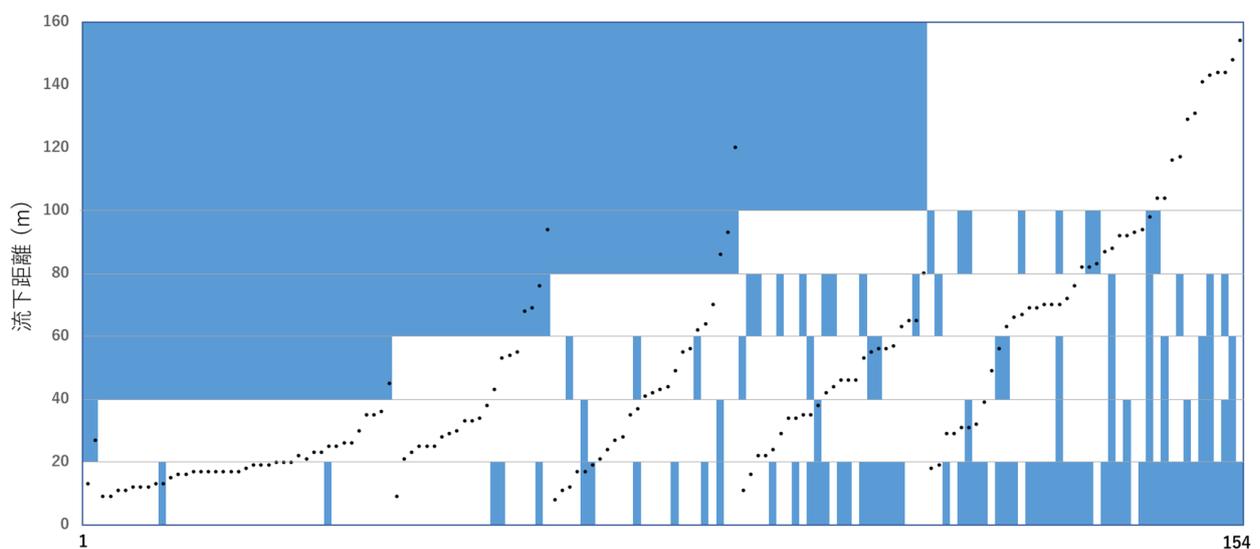


図11 各斜面単位において、分類スコアが0.1以下となったクラス。（黒点は計測した流下距離）

ったクラスを基準にする場合には、スコアが0.4以上ある斜面単位とすることが望ましいことが示唆された。図11は、分類スコアが0.1であるクラスのみ青色で示している。このクラスにて実際に崩土が停止した斜面単位は全体の12%であった。すなわち、残りの88%の斜面単位においては、崩土が停止する可能性が極めて低い範囲について、モデルにて示すことができたといえる。

4. 崩壊斜面での動摩擦係数の検討

本研究では、2018年の胆振東部地震により厚真町管内で発生した滑動型表層崩壊を対象として、すべり面境界付近のテフラ層の種類と含水状況によって崩壊斜面での動摩擦係数をパターン分類し、説明変数の一つとすることを目指す。滑動型表層崩壊とは、特定の地質境界付近から上位の斜面土層がほとんど攪乱されずに滑動し、崩土はほとんど攪乱せずに堆積したものと定義する¹⁾。ちなみに、「滑動型表層崩壊」は、従来の崩壊地形の分類⁷⁾によれば、Translational landslideのカテゴリー内のblock slideに相当する。厚真町では、滑動型表層崩壊の崩壊箇所数は、家屋に被害をもたらした崩壊箇所数の約7割を占める。またそのほとんどが、従来の土砂災害警戒区域の領域を超えたところまで崩土が到達した。こうした火山灰堆積斜面での地震による崩壊の崩土の移動は、現行の土砂災害警戒区域設定の対象となる現象ではないが、当該現象に即した想定被害区域を設定する手法を開発することは重要である。

調査の対象とした厚真町東和地区での滑動型表層崩壊のすべり面境界付近は、トレンチ調査の結果¹⁾、基岩層である泥岩の直上位層のEn-a層やTa-d風化層といったテフラ層であることが確認された。また、土壌水分状態の調査によってこれらの層は地震直前まで飽和状態であったことが明らかにされている⁸⁾。さらに、飽和テフラ層(En-a層)の不攪乱サンプルを加振すると、毛管力により保水されていた水の一部が排出されることが筆者らの予察的実験によって確認されている。

一方、滑動型表層崩壊による崩土の移動距離(氾濫・堆積幅については、横断方向の運動量変化はないとみなせるため、崩壊幅と同じとみなす)は、剛体モデルとして取り扱うのが妥当と思われるため、その距離に大きな影響を与えるのは底面摩擦力にかかわる動摩擦係数である。そこで本研究では、飽和テフラ層に保水されていた水が地震動によりすべり面境界に供給され、水膜が形成し動摩擦係数が低下することで崩土の長距離移動が起きたと仮定する。実際には、軽石などの粒子破碎や飽和テフラ層のせん断変形によっても保水されていた水の一部が排出されると考えられるが、今回は地震力によるすべり面境界付近への水分移動のみを対象とし、崩土が斜面を滑動する時の動摩擦係数を実験により求めた。

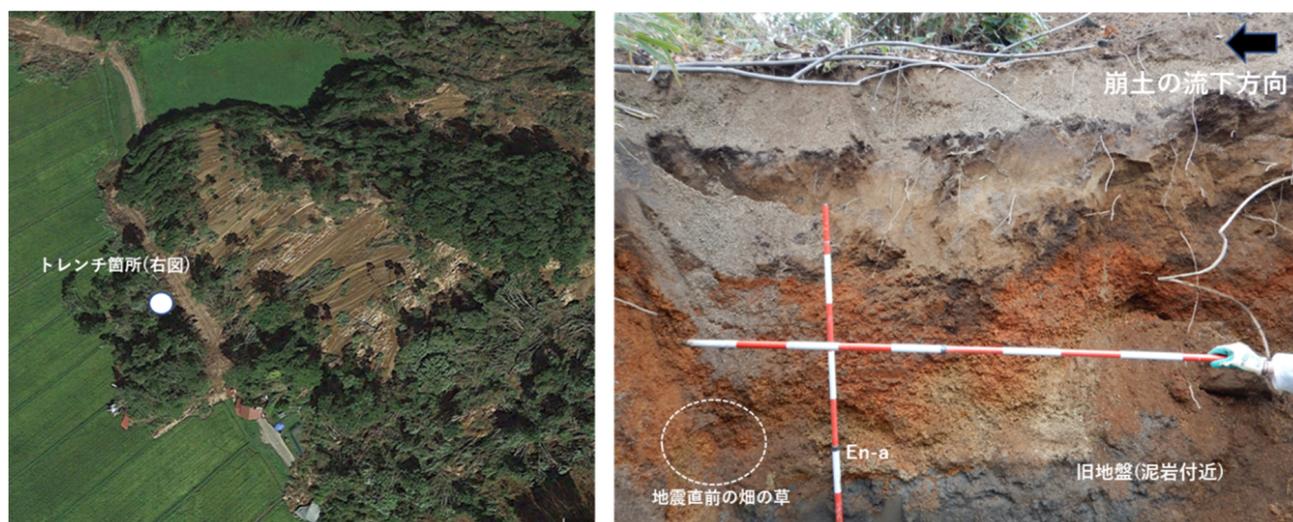


図12 厚真町東和地区での滑動型表層崩壊の事例。(左：トレンチ箇所。背景はGoogle Earth 画像(2018年9月撮影)。右：不攪乱状態の崩土内部構造。)

(1) 実験方法

図12に示す厚真町東和地区の滑動型表層崩壊現場から実験用の土砂サンプルを採取した。ここでのテフラの層序は、滑落崖での観察から、基岩（泥岩）、En-a層、Ta-d風化層、軽石を主体としTa-d層、クロボク土壌、Ta-c、Ta-a, b、森林土壌（地表面）である。すべり面としては、未だ不明確でいくつかのパターンが考えられるが、前述したトレンチ調査の結果⁹⁾、崩土と旧地盤の境界には、厚さ5cm程度のEn-a層が存在する。また、現地の崩壊後の地表面は、Ta-dの二次移動堆積物が数10 cmの厚さでEn-a層（厚さ：5～20 cm程度）を被覆し、En-a層の直下位層は泥岩（基岩）である。こうしたことから、すべり面境界は、①Ta-d風化層内部、②Ta-d風化層とEn-a層との境界、③En-a層内部の3種類の可能性が考えられる。これまでの研究ならびに本研究では、①～③のいずれかであるかを特定するには至っていない。本研究では、①～③のケースを対象とするが後述のように実際に実験可能であったのは、③のケースのみである。このことから本研究では En-a層内部で剪断が起き土塊が滑動したという仮定のもと実験を行った。En-a層の土質特性を表1に示す。En-a層との比較ができるようにするため、同じ飽和テフラ層のTa-d風化層についても同様に土塊を採取し実験を行った。すべり面よりEn-a層、Ta-d風化層から実験で用いるための不攪乱状態の土塊ブロックを10×20×5

(cm)の大きさで採取した。まず土塊を崩さずに切断できるようにじょうろで土塊採取場所付近の土壌に散水した。そして上部を切り抜いたアクリルケースを土層上に埋め込み、スコップなどで外周を掘った後に、ワイヤーソーで上部の面を切り抜かれたアクリル箱から飛び出したEn-aの土塊部分を切り取ることで採取した。採取した土塊は不攪乱状態を維持するためにサララップで包装した後に気泡緩衝材で梱包し、振動を与えないように配慮して調査地から実験室まで運搬した。振動によってどの程度の水が排水されるのかを計測する目的で振動実験を行った。振動を発生させるための装置は（株）誠研舎の小型振動台制御式DUB-233Aを用いた（図13）。この振動台は、実際の地震動のデータを振動台に接続されたPCに読み込むことで出力することができると共に、サイン波による振動を起こすことができる。実験では2018年の胆振東部地震の地震動による振動と、様々な波形を含まないサイン波を用いた実験を行った。地震動については、国立研究開発法人防災科学研究所のK-NETから地震動のデータをダウンロードして使用した。本実験では地震動の振動波形は、北

表1 En-aの土質特性

飽和度 (%)	96.2
自然含水比 (%)	92.7
液性限界 (%)	72.1
塑性限界 (%)	41.7
粘着力 c (kN/m ³)	15.9
内部摩擦角 ϕ (kN/m ³)	4.37

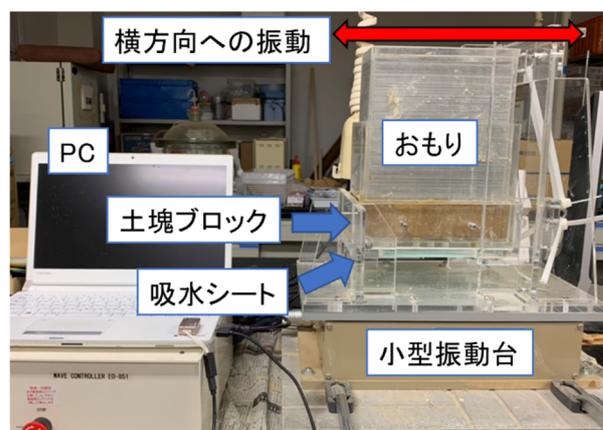


図13 振動実験機器



図14 動摩擦係数計測方法

海道胆振東部地震において最も大きい加速度を記録した、追分観測点（緯度：42.8743N 経度：141.8204E 標高：61 m）のNS方向の振動波形を用いた。この実験台では、振幅が振動台のストロークである±40 mmを超過すると、地震波形を全て±40 mm内に収めるように平坦化されてしまい、地震波形を適切に再現することができない。そのため、振幅が±40 mm内に収まるよう、地震波形は振幅倍率を実波形の50%に設定した。振動台には下から順に吸水シート、網、サンプル土塊、おもりを設置した。吸水シートは縦72 cm、横30 cmのもので1度に約150 ml吸水できるポリエチレン製の大人用紙おむつ（発売元：カミ商事株式会社）を用いた。これを土塊の底面の大きさに合うように縦10cm、横20cmの大きさに切って敷いた。加振前に吸水シートの質量を計測しておき、加振後にもう一度吸水シートの値を計測することで、加振前後の排水量の値を計測した。網については一般に売られている網戸を用い、土塊と吸水シートの上に設置した。これは土塊が崩れるのを防止すると共に、吸水シートに直接土塊が触れて吸水シートに泥がつき排水量が適切に測れなくなることを防ぐためである。おもりは土塊上部に設置されたケース内に薄い鉄板を複数枚重ねることで、実際のEn-aの上載荷重である約19.01kgを再現した。地震波形は追分観測点のNS方向の地震波形を用い、En-a層、Ta-d風化層の2種類について主要な振動が続く70 sまで10秒間隔で加振し排水量を計測した。土塊の状態はEn-a層に関しては、飽和状態にするため10分間底面に水をつけ、目視で水が滴り落ちなくなるまで土塊の水を切った。底面の水の状態以外は排水量に影響を与えないと考えられるため、底面のみを水につけた。またTa-d風化層の場合は崩土が崩れてしまうため、底面に直接吸水シートを取り付けた。その際、吸水シートは貼り付け当初は土塊底面に付いている水を吸水してしまい、排水量を適切に測れないため、吸水シートと土塊を貼り付けた際の水の時間経過ごとの吸水状況を調べた。5分程度経ったところで吸水量が一定に近づいたため、振動台実験を行う前に5分間吸水シートを直接貼り付けた状態を維持した。その後、En-a層については3回加振し平均をとったが、Ta-d風化層に関しては振動によって割れやすく排水量に土塊のひびの影響が出てしまうため、それぞれの振動時間で1回ずつ加振した。実際の地震波形では様々な波形を含み加速度ごとの排水量の挙動は分からないため、単調なサイン波を用いて加速度ごとの排水量の値を調べた。本実験では周波数を固定し片振幅を調整することにより加速度の値を設定した。振動台の特性上、加速度が1000 G付近になると安全機能により振動台が停止するため、200、400、600、800 Gの4ケースで加速度を変化させ排水量の挙動を調べた。実験①と同じ要因で、En-a層ではそれぞれの加速度で3回加振し、Ta-d風化層については1回加振し排水量を計測した。

次に、採取した土塊により崩土とすべり面を再現し、境界面の動摩擦係数を計測した。すべり面は、縦200、横10、高さ10 cmの流路上にEn-a層を敷き詰めることにより作成した。En-a層を用いたのは、前述のとおり本研究ではEn-a層内部が剪断面であると想定したためである。すべり面を流路底面に不攪乱状態で再現することは不可能であったため、採取したEn-a層を水で泥濁化させ厚さ1cmほどとなるよう流路上に流し込み、2日ほど乾燥させることで作成した。崩土に関してはアクリルケースで採取した土塊を縦10cm、横5cm、高さ5cm、に切断した。崩土の引っ張り時に崩土先端に泥がまかれて抵抗となり、動摩擦係数の値に影響が出てしまうため、崩土先端は舟形となるように整形した。崩土周囲にラップを巻き、引っ張り方向の部分にフォースゲージ（AD-4932A-50N）を取り付けた（図14）。そして計測した引張力（動摩擦力）と垂直抗力から動摩擦係数を求めた。表2に実験ケースを示す。水膜を付与した実験条件Case3では振動台実験で排水されたのと等量の水を流路底面の引っ張り区間に均一に散水した。各条件で5回ずつ動摩擦係数を求め、その平均値をとった。

表2 En-a層を対象にした動摩擦係数の計測実験ケース

	土塊ブロック（崩土）	すべり面
Case 1	不飽和（底面の水を吸水）	散水なし
Case 2	飽和（底面が水で濡れた状態）	散水なし
Case 3	飽和	※散水あり
Case 4	飽和	軟泥化

(2) 結果

a) 振動時間や加速度と排水量の関係

図15に、地震波形の振動時間と排水量の関係を示す。最終的な排水量は土塊の表面積 1cm^2 に対しEn-a層では $1.8 \times 10^{-2} \text{cm}^3$ 、Ta-d風化層は $2.2 \times 10^{-2} \text{cm}^3$ であった。振動時間の増加に伴い排水量も増加し、En-a、Ta-d風化層共に似た挙動を示す。3.7sから4 s付近で間隙水圧は上昇するがその付近で排水量も増加傾向にある。図16にサイン波を用いて振動させたときの排水量の結果を示す。加速度を増加させると直線的に排水量が増加した。

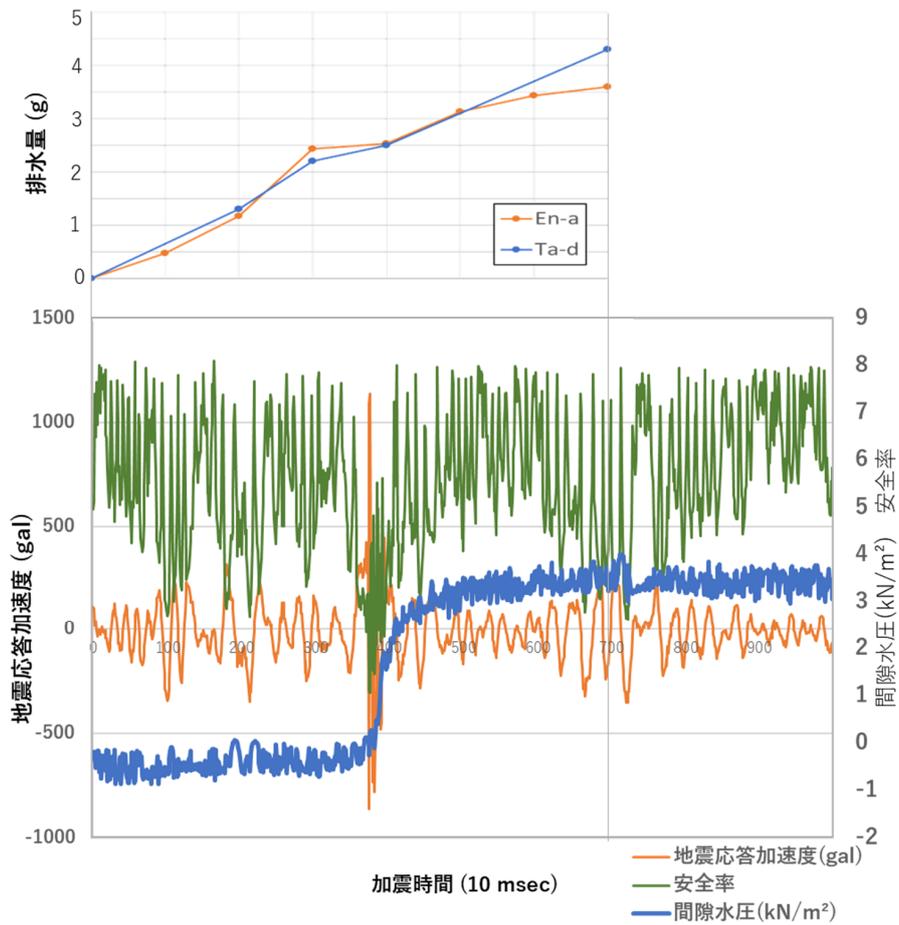


図15 加震時間と排水量

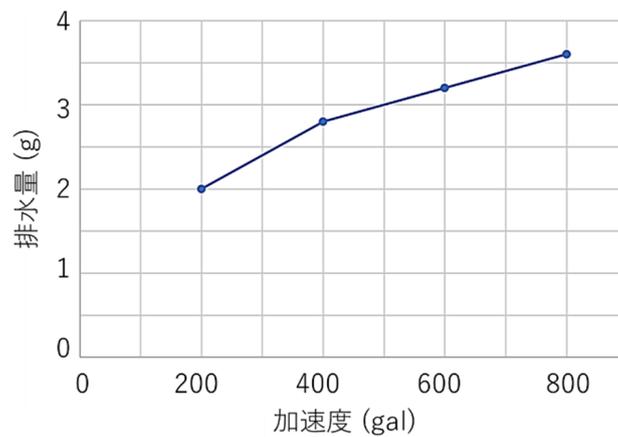


図16 加速度と排水量との関係

b) 崩土の引っ張り実験

崩土の引っ張り実験の結果を表3に示す。水膜なし、土塊が非飽和の状態のケース1で動摩擦係数は最も大きく、1.00となった。水膜なし、土塊が飽和状態のケース2は動摩擦係数が0.77、水膜あり、土塊が飽和状態のケース3は動摩擦係数が0.31と最も小さくなった。土塊が繰り返しせん断を受け、軟泥化状態になったことを想定したケース4では動摩擦係数は0.49となった。本研究の仮説の通り水

表3 En-a層を対象にした動摩擦係数の計測結果

	動摩擦係数
Case 1	1.00
Case 2	0.77
Case 3	0.31
Case 4	0.49

膜が形成したと仮定したケース3が最も対象とした実際の崩土の等価摩擦係数0.17に近くなった。これらのことから、すべり面境界に水膜が存在することで動摩擦係数が低下すること、すべり面に散水し水膜を付与すると、動摩擦係数は0.77から0.31へと半分以上低下すること、すべり面は軟泥化状態よりも水膜が形成していた場合（散水あり）の方が、動摩擦係数は低下することが分かった。崩土とすべり面境界の水が存在しない場合、土塊同士が直接擦れるため、最も動摩擦係数が大きくなったと考えられる。すべり面境界付近に水が増えると粒子間の摩擦が低下し、結果、動摩擦係数が低下すると考えられる。この点については、機械工学の分野で明らかにされているストラインバック曲線による摩擦係数の変化と類似の現象であるように思える。すべり面境界付近が軟泥化状態の場合は粘着力が働くなどの要因により、動摩擦係数が水膜形成時よりも大きくなった可能性がある。しかしながら、今回の実験で求めた動摩擦係数は、全て見かけの動摩擦係数である等価摩擦係数0.17(図12に示す現地での崩土の等価摩擦係数の値)よりも大きい。このような結果となった要因としては、実際には崩土がすべり面を滑るうちに粒子破砕(今回の実験では粒子破砕は発生していない)により粒径が、水膜の厚さに比較して相対的に小さくなったと想定されることも動摩擦係数の低下をもたらしているものと思われる。

5. まとめ

本研究では、2018年に胆振東部地震にて発生した崩壊について、機械学習による崩土の流下距離を推定する分析を行った。また、今後、説明変数として用いる土壌に関する指標を改善していくことを視野に入れ、崩壊すべり面のサンプルを取得し、振動実験を行うことで、地震時の動摩擦係数について検討した。

CNN (ResNet-50)を用いた回帰モデルでは、地形の特徴量と土壌分類名を説明変数に用いることにより崩土の流下距離をある程度推定できたが、ばらつきも大きかった。また図7で示した関係のみからは、各斜面単位を対象にした、危険区域設定の為の基準も設置しにくい。一方、分類モデルでは、分類スコアが危険区域設定の為の指標となり得る可能性が示唆された。しかし、用いるデータの解像度や測定誤差を踏まえて各クラス長を長く設定しており、また1斜面単位における分類スコアについても、全てのクラスを通じて平均的に現れる例も見られる。加えて本研究では、崩土の流下距離に影響を与えられ考えられる氾濫原における地形や土地利用タイプについて考慮していない。今後崩壊の危険区域設定に資するためのモデルへと発展させるためには、説明変数、分析対象とする崩壊地数、モデルのアーキテクチャやハイパーパラメータ、クラスの設定の仕方、氾濫原の地形や土地利用のモデルへの取り入れ方などを見直し、改良を進めていく必要がある。

一方、振動実験からは、地震動により飽和テフラ層内の水の一部が排水されること、水膜の存在によりすべり面境界の動摩擦係数が低下することが確認された。また、水膜を付与した実験条件で、最も動摩擦係数が実際の等価摩擦係数に近くなった。これらのことから、滑動型表層崩壊については、崩土のすべり面境界付近の高含水テフラ層が地震動によって排水し、すべり面境界付近に水膜を形成し、結果、

動摩擦係数の低減をもたらし、長距離移動につながる可能性があることが示唆された。今後は、すべり面（段丘堆積物、泥岩（基岩）、En-a、Ta-d風化層）と崩土底面のテフラ層（En-a、Ta-d風化層）の組み合わせパターンを変化させ、また崩土の滑動に伴う粒子破碎による粒径減少、すべり面の透水性による吸水程度の違いに着目した振動実験・動摩擦係数測定実験が必要となる。

本研究では両知見を組み合わせるまでには至っていない。今後は機械学習によるモデルに室内実験で得られた土壌物性の特性を組み入れていく手法についても検討する予定である。

謝辞

本研究で使用した航空レーザー測量データおよびオルソ写真は、北海道開発局室蘭開発部より提供いただいた。データの解析や実験の実施にあたっては、北海道大学の富安蓮君と岡田裕太君の協力を得た。本研究は、令和4年度（一財）北海道河川財団の助成で実施した。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 間片大地・山田孝：：地震に起因した火山灰堆積斜面崩壊による崩土の長距離移動実態の解明～2018年9月北海道胆振東部地震による厚真町の事例～，2020年度砂防学会研究発表会概要集，pp383-384，2020.
- 2) 「地震による地すべり」刊行委員会編：地震による地すべり災害 2018年北海道胆振東部地震，北海道大学出版会，2020.
- 3) 喜多耕一：2018北海道胆振東部地震による斜面崩壊データ，https://koukita.github.io/2018_09_06_atumatyou/
- 4) 国立開発法人農業・食品産業技術総合研究機構，土壌図，<https://soil-inventory.rad.naro.go.jp/figure.html>
- 5) 森脇寛：崩土の等価摩擦係数と流動性について—1998年豪雨による福島県西郷村—，平成12年度砂防学会研究発表会概要集，pp22-23，2000.
- 6) Swets, J. A.: Measuring the accuracy of diagnostic systems, *Science*, Vol. 240, pp.1285-1293, 1988.
- 7) Varnes, D.J., : Slope movement types and processes, in Schuster, R.L., and Krizek, R.J., eds., *Landslides—Analysis and control: National Research Council, Washington, D.C., Transportation Research Board, Special Report 176*, pp.11-33, 1978.
- 8) Aoki, T., Katsura, S., Koi, T., Tanaka, Y., and Yamada, T: Hydraulic properties of pressure-head dynamics in thick pyroclastic-fall deposits in Atsuma, Northern Japan: implications for the role of water in shallow landslides induced by the 2018 Hokkaido Eastern Iburu Earthquake, *Landslides*, Vol. 19 (8), pp1813 - 1824, 2022.