

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	笠井美青
北海道大学大学院	農学研究院	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。本研究では、現象の解明を目指し、滑動型表層崩壊とその崩土の長距離移動の概念モデルを提案する。このモデルに基づき地震動により走路表面が液状化した状態を再現して土塊引張実験を実施した結果、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境界近傍に地震動によって泥水膜が生成され、地震加速度最大値以降、加速度500gal未満の中・小震動が継続することで泥水膜状態が維持されて動摩擦係数が減少し、結果、崩土が長距離移動できることが示唆された。また、現象の解明において実際に着目すべき斜面の範囲を求める為にCNN（ResNet-50）を用いた崩土の流下距離推定モデルについてGrad-CAMによる可視化を行った結果、斜面上方の地形が末端部よりも崩土流下範囲に影響を及ぼすことが示唆された。

《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は、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。

本研究では、現象の解明を目指し、滑動型表層崩壊とその崩土の長距離移動の概念モデルを提案する。また、CNN (ResNet-50) を用いた崩土の流下距離推定モデルについてGrad-CAMによる可視化を行うことにより、その解明のために実際に着目すべき斜面の範囲を求める。

2. 研究対象地

対象地は2018年北海道胆振東部地震 (Mw6.7) 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. 滑動型表層崩壊とその崩土の長距離移動の概念モデル

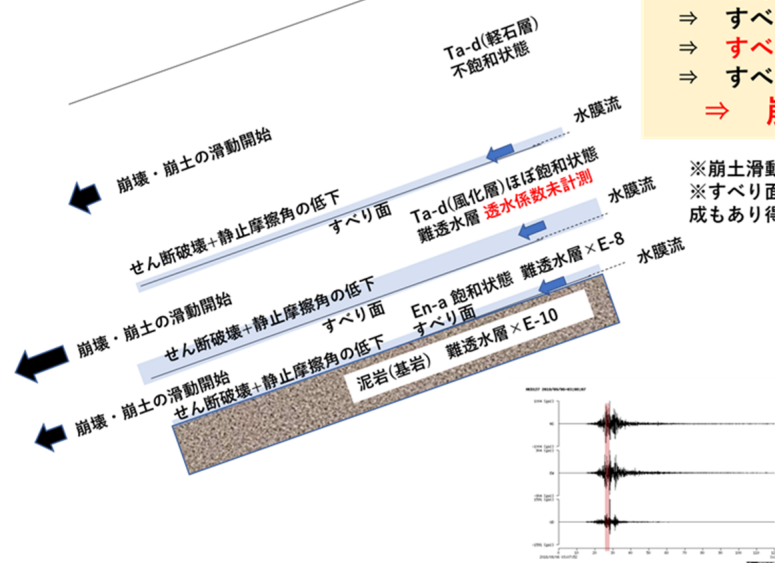
2018年の北海道胆振東部地震により、厚真町では多くの滑動型表層崩壊が発生し、甚大な土砂災害をもたらした。本報告では、滑動型崩壊とは、特定の地質境界付近から上位の斜面土層がほとんど攪乱されずに滑動し、崩土がほとんど攪乱せずに堆積したものと定義する。従来の崩壊地形の分類⁴⁾のTranslational Landslideのカテゴリー内のblock slideに相当する。

滑動型崩壊とその崩土の運動の特徴としては、テフラ構成斜面で発生したこと、勾配20°未満の緩勾配斜面においても崩壊していること、短時間で崩土が長距離移動したことが挙げられる。特に、崩土は、現行の土砂災害警戒区域を大幅に超過して移動した事例が多い。なぜ緩勾配斜面でも崩壊が発生したのか、崩土が長距離移動できたのかについて、関連する先行研究では次の事項が明らかにされている。

- ・ すべり面となったEn-aやTa-d風化層は高含水状態 (飽和に近い) ⁵⁾
- ・ En-aやTa-d風化層は繰り返しせん断によって容易に軟泥化する。特に小さな振動を継続的に与えると軟泥化が著しい¹⁾
- ・ 実際の地震動に近い振動実験では、En-aブロックやTa-d風化ブロックの上面と底面からブロック内の水が排出され、それらの表面近傍がわずかに軟泥化する⇒液状化とみなせる⁶⁾
- ・ 実際の地震動に近い振動実験では、En-aやTa-d風化ブロック底面から水が排出される。En-aブロック底面から排出される水量を流路に与えて、En-aブロックの引張試験を行うと、動摩擦係数は0.3程度に減少する。実際の崩土の等価摩擦係数 (みかけの動摩擦係数) 0.18までは低下しない⁷⁾
- ・ すべり面液状化⁸⁾
- ・ 液状化地盤の側方流動に及ぼす「水膜現象」⁹⁾

こうした研究成果などを基に概念モデルを考察した。以下にそのポイントを示す（図1, 2）。

【地震発生時・崩壊・崩土の滑動開始】



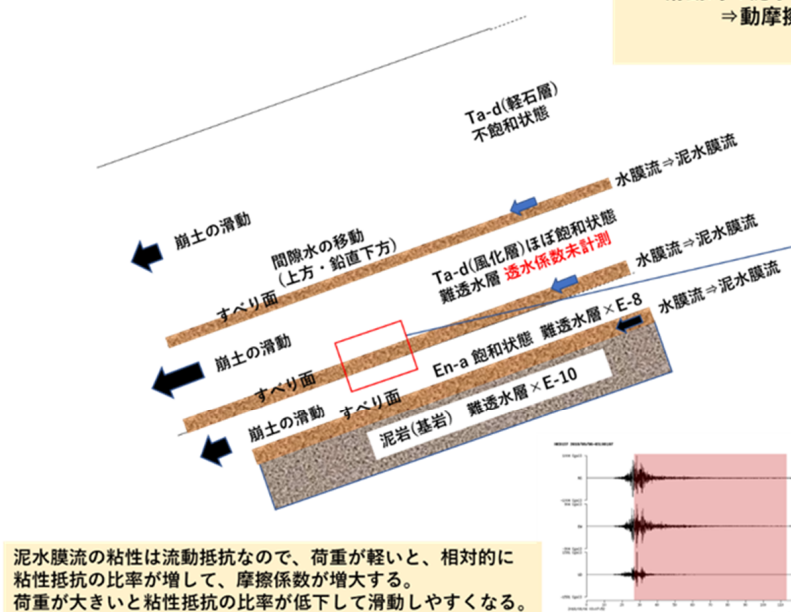
○テフラ層内高含水帯でのせん断力が粘着力を超過

- ⇒ せん断破壊によるすべり面の形成
- ⇒ すべり面に高含水帯から水が流入
- ⇒ **すべり面での水膜流の形成**
- ⇒ すべり面での静止摩擦係数の低下
- ⇒ **崩壊・崩土の滑動開始**

※崩土滑動時のすべり面近傍のさらなるせん断変形は考慮しない。
※すべり面は、必ずしも層境界とは限らない。テフラ層内での形成もあり得る。

図1 滑動型表層崩壊と崩土の移動の概念

【地震発生時・崩土の滑動中】

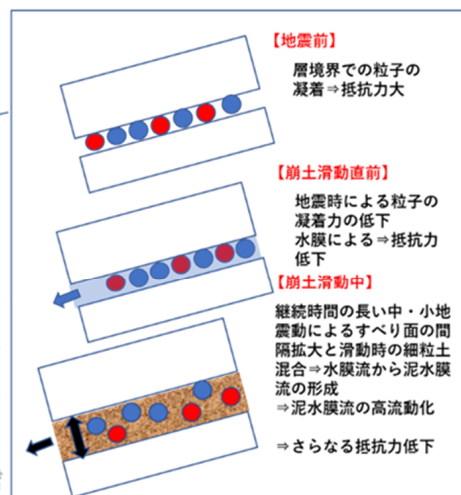


○水膜流から泥水膜流に変化

○大きな振動の後の継続時間の長い中・小地震動

- ⇒ 滑動時の泥水膜流内の粒子の接触摩擦や粒子乗り越えの軽減
- ⇒ 動摩擦係数のさらなる低下促進
- ⇒ **崩土の長距離滑動**

泥水膜は、粘土やシルトが水に混入した「微粒子懸濁液(サスペンション)」



泥水膜流の粘性は流動抵抗なので、荷重が軽いと、相対的に粘性抵抗の比率が増して、摩擦係数が増大する。
荷重が大きいと粘性抵抗の比率が低下して滑動しやすくなる。

図2 滑動型表層崩壊と崩土の移動の概念(図-1の続き)

- ・ 震動SH波の繰り返しせん断によって、透水係数が小さな飽和Ta-d層、飽和En-a層の表面近傍で、非排水条件でのダイレイタンス（収縮）が発生する。それによって、表面近傍での間隙水が上昇し、表面近傍での液状化が開始する（有効応力が0となる）。合わせて、地震力が毛管力を上回ることにより、鉛直下向きに間隙水が移動する。
- ・ こうした間隙水の移動により、飽和Ta-d層、飽和En-a層の境界付近には、高含水帯が形成される。飽和Ta-d層、飽和En-a層の表面近傍での液状化状態が継続する。せん断抵抗力は粘着力のみの状態となる。
- ・ 高含水帯でのせん断力が粘着力を超過した時にせん断破壊によるすべり面が形成され、高含水帯から水が流入し、水膜流が形成される。それにより、真実接触面積が急減してすべり面での静止摩擦係数が低下し、崩壊・崩土の滑動がはじまる。
- ・ 崩土が滑動を開始すると、大きな地震動の後の継続時間の長い中・小地震動によって、滑動時のすべり面の間隔が拡大する。すると、すべり面に形成された水膜に細粒土（粘土、シルト）が混合し、泥水膜に変化する。泥水膜流内の細粒土粒子は地震動によって常に分散した状態となり、泥水膜流となる。結果、粒子同士の接触摩擦の軽減や他の粒子の乗り越えやすさにも貢献する。こうしたことから動摩擦係数のさらなる低下が促進される。

崩土が不攪乱状態を保持したまま、変形せずに剛体としてすべり面と斜面下部の区域を滑動する場合は、動摩擦係数が重要なパラメーターになる。筆者らは、厚真町管内東和地区などでの現地調査によって崩壊形態とすべり面を推察し、発災直後の現地踏査での報告^{2), 10)} や土質試験の結果から、すべり面近傍での液状化発生を想定して内部摩擦角 ϕ を0とすれば、安全率が1を下回り、崩壊する計算結果となった。さらに地震時せん断を模擬した振動実験での観察結果から、せん断面直上位層の境界近傍のみで液状化の状態が発生・継続することが想定された。崩壊プロセスにおいても、通常の斜面安定解析で想定する「せん断面直上位層内で間隙水圧が上昇して有効応力が低下する」ことが支配的な要因ではないように考えられた。

以上の予察を踏まえ、本研究では、地震動によってすべり面境界付近が液状化し、大きな地震動の後の継続時間の長い中・小地震動の継続によってその状態が維持されるために動摩擦係数が急減し、結果、崩土は長距離移動できると考えた。そこで、地震動により走路表面が液状化した状態を再現して土塊引張実験を実施し、土塊底面と走路との動摩擦係数の変化を計測し、厚真町東和地区などでの滑動型表層崩壊現場から得られた等価摩擦係数（見かけの動摩擦係数）との比較を行った。

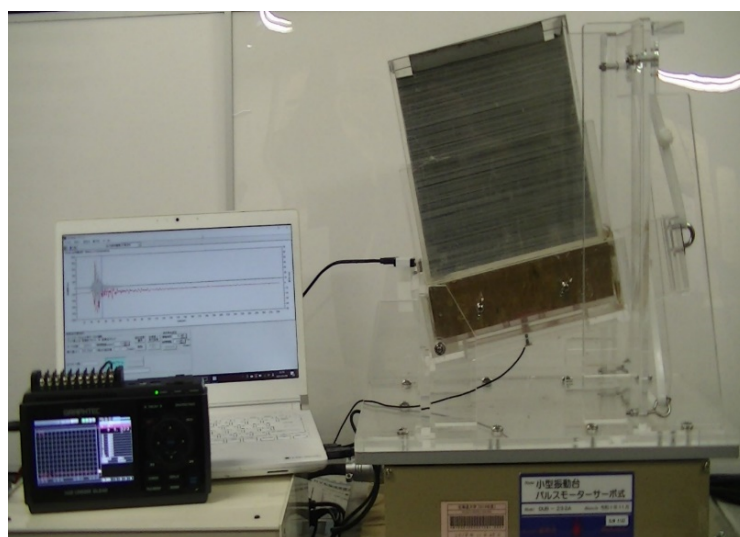


図3 実験装置 (小型振動台)

(1) 実験装置

実験に使用した小型振動台は、(株)誠研舎の小型振動台パルスモータ制御式DUB-233Aである(図3)。この振動台は正弦波の他に、国立研究開発法人防災科学技術研究所のK-NET(全国強震観測網)で観測された地震波形などを出力して加振することができる。振動台のテーブル寸法は400×250(mm)、搭載質量は30(kg)まで(これ以上の搭載で加振加速度が小さくなる)、制御方式はパルスモータ制御方式、最大加振加速度は1000(gal)、最大加振変位は振動台のストロークで±40(mm)、周波数は0.1-20.0Hzである。

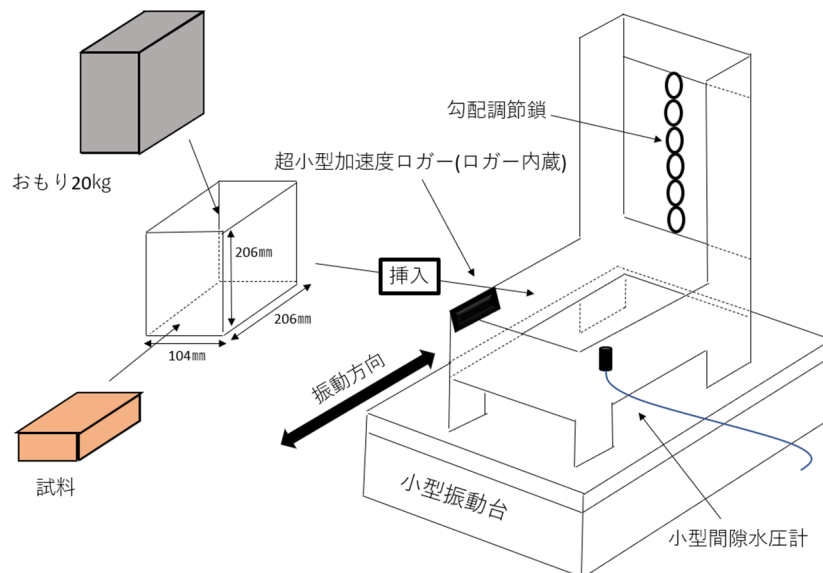


図4 模型斜面の概要

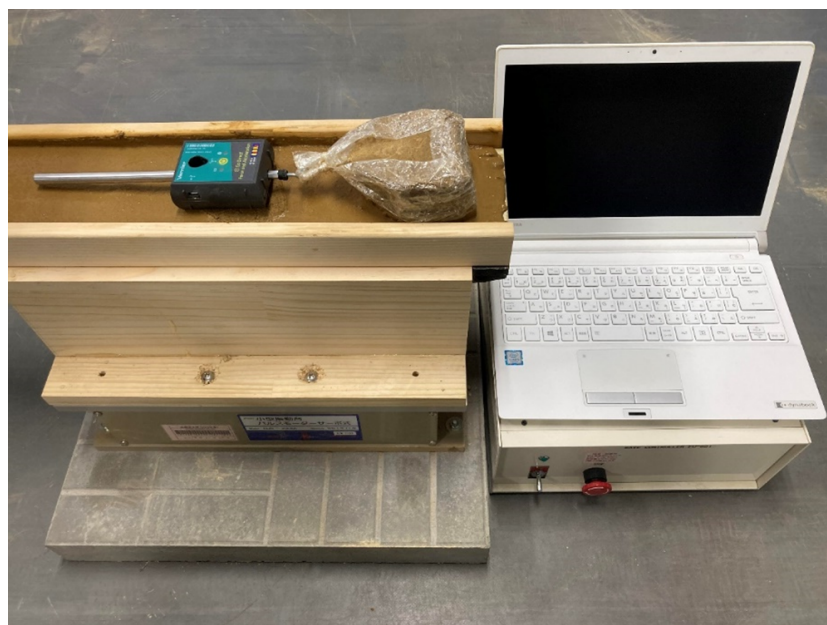


図5 土塊引張実験装置

実験に使用した模型斜面を図4に示す。以下の(2)地震時せん断の実験においては、加振中に上載荷重が試料に加わる状態を維持するために、おもり(鉄板)と試料の接面積を等しくし、おもりが加振によって動かないように結束バンドで固定した。また、以下の2.3 崩土長距離移動を想定した土塊引張実験に使用した荷重計は、(株) NaRiKaのワイヤレス力/加速度センサ GDX-FOR (Go Direct) である。測定範囲は±50N、最小表示は0.01Nである(図5)。

(2) 地震時せん断の実験

厚真町東和地区の滑動型表層崩壊発生後のすべり面付近から不攪乱のEn-a試料(19.5mm×9.5mm×5mm)を採取し、それを模型斜面に設置した。En-a上層分の20kg(前述の試料上面に作用する荷重)に相当する鉄板のおもりを積載し、K-net追分観測所の地震波形により加振した。その後、模型斜面からEn-a試料を取り出し観察したところ、表層近傍が泥濘化しており(図6)、内部摩擦角はゼロに近いことを確認した。このEn-a試料の表層近傍の泥濘化部分を「泥水膜」と呼び、滑動型表層崩壊の発生とその崩土の移動に際して、その摩擦抵抗(粘性抵抗)が重要なパラメーターになると想定した。実験条件として、En-a試料の飽和度、En-a試料に加える上載荷重、地震波形、振動時の排水条件については、竹中ら⁶⁾に則している。

振動を開始すると、まず試料の表面と底面の近傍部分に水が移動して高含水帯を形成し、次第に高含水帯は厚みを増し、水膜を形成した。加振終了後に試料を模型斜面から取り出して観察すると、前述のとおり、表面近傍部分のみが泥濘化した泥水膜の状態であることが確認された。

以上のことから、飽和したEn-a層が地震動を受けて表面および底面近傍に発生する水膜・泥水膜が崩土とすべり面との接触面に介在することで摩擦抵抗(静摩擦)が低下し、崩壊に至ったと考えられる。地震中の崩壊の発生タイミングについての現地情報はないが、大きな地震動の時に崩壊土層の初期せん断が生じて土層が滑動を開始する準備ができたとも想像できる。地震動による非排水条件での繰返しせん断によって土層の間隙水圧が上昇し、有効応力が低下することで、土層全体のせん断抵抗力が低下した結果、崩壊に至るという従来の崩壊プロセスとは異なる可能性が想定される。



図6 En-a試料加振後の表面の泥濘化

(3) 崩土長距離移動を想定した土塊引張実験

(2) にて使用した振動台上の模型斜面を取り外して木製流路（幅100mm×長さ600mm）を設置し、木製流路に泥水膜を散布した。等速運動中のEn-a試料の引張力と垂直荷重との比から摩擦係数を算出した。En-a試料先端を舟形に成形し、試料側面を食品用ラップで包み、荷重計を手動で引っ張った。舟形に成形した理由は、試料先端と泥水膜の接地付近で、泥水膜がめくれ上がって試料前方に付着・堆積することによる抵抗を軽減するためである。実験パラメーターは振動加速度 a (gal) と泥水膜の含水比 ω (%) である。振動加速度は0, 100, 200, 300, 400, 500の6通り、含水比は0, 50, 100の3通りとした。振動加速度の最大値を500 (gal) とした理由は、地震加速度最大値付近にて斜面が不安定化し、崩土が滑動を開始した後にその運動に影響を及ぼすと考えられる加速度が最大500 (gal) とみなせるからである（図7）。含水比については、 $\omega=0$ (%) は絶乾状態（現実にはあり得ない条件であるが、条件コントロールのため設定した）、 $\omega=50, 100$ (%) は、現地での計測データを基に泥水膜が形成されたことを想定している。動摩擦係数の決定方法は、En-a試料が滑動を開始し等速運動となった時点を始点、En-a試料が流路末端に到達した時点を終点とし、その間の摩擦係数の平均値を採用した。

土塊引張実験での摩擦抵抗を計測するうえで、En-aに5%含まれる粗砂（4.45-2mm）、細礫（19.4-4.75mm）、中礫（7.5-19mm）は、試料と走路との間で大きな接触抵抗をもたらし、それらの泥水膜内での不規則な移動や泥水膜からの突出等のために実験結果の再現性を損なうと考えた。そこで、実験の再現性を高めるために、ストライベック曲線の考え方を導入した。ストライベック曲線とは、トライボロジーの世界で広く受け入れられている、物体2面間の摩擦係数の変化に関する概念的な曲線である。摩擦係数の変化は、物体二面間の表面粗さ R と潤滑膜 h との大小関係によって3つの潤滑状態に分けられる。（Ⅰ）流体潤滑状態（ $R \ll h$ ）では、物体2面間が潤滑膜によって隔てられており、その厚さが表面粗さに比べてかなり大きい状態を指す。（Ⅱ）混合潤滑状態（ $R=h$ ）では、荷重は一部が潤滑膜により、

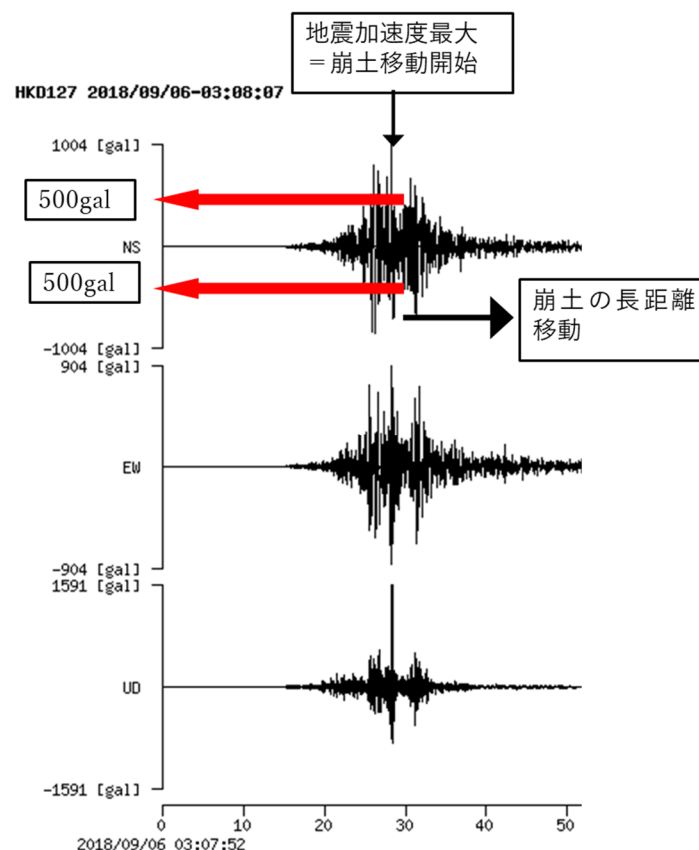


図7 土塊引張実験で用いた地震加速度最大500gal値設定の根拠

また一部は表面接触により支えられる．(Ⅲ)境界潤滑状態 ($R>h$) では、固体接触が頻繁に起こり、潤滑膜によって支えられる荷重・接地面が極端に少なくなる．また、摩擦係数 f は次式 (1) のように表現されている．

$$f = (\eta \times V) / Fn \quad (1)$$

ここで、 η ：潤滑膜の粘度、 V ：物体2面間のせん断速度、 Fn ：荷重

本実験での泥水膜の作成については、「流体潤滑状態」を想定した．En-a試料と泥水膜の作成にあたっては、不攪乱採取したEn-aをオープンにて110℃で24時間加熱した絶乾状態のEn-aをふるいにかけて粗砂以上の土砂成分を除去したものを使用した．粒度分布の質量百分率については、砂分が50.7(%)、粘土・シルト分が48.7(%) とほぼ等しいことから、試料と泥水膜に使用する土の質量比が1：1となるように電子はかりで調節した．試料は密度を調節した後におもり20kgを上に乗せて24時間圧密した．また、試料を水で飽和したEn-a土塊とするために3日間程度浸水させ、「JIS A 1203 土の含水比試験法」に従い飽和度を確認した．泥水膜は、含水比 $\omega=50$ (%) の場合は質量比で土：水=2：1、含水比 $\omega=100$ (%) の場合は土：水=1：1とし、十分に攪拌させた．

流体潤滑状態における摩擦抵抗は潤滑膜内の内部摩擦によるため、潤滑膜の粘度 η が重要となる．振動加速度 α 、含水比 ω のいずれも膜内土粒子の分散度合に繋がる．せん断速度 V は、荷重計を手引きで等速運動させるために低速条件とした．荷重 Fn は、崩土が変形せずにかつ質量不変の状態に剛体運動することやおもりを載せて引張実験をすることは困難であったことから加えていない．走路上の傾斜 β は水平とした．

土塊引張実験で得られた摩擦係数の変化の事例を図8に示す．また、含水比ごとの、縦軸を動摩擦係数 μ' 、横軸を振動加速度 α (gal) として整理した結果の事例を図9に示す．図8によると、含水比、振動加速度のいずれも増加に伴い、摩擦係数は減少する傾向がある．また、振動加速度の増加に伴い、明瞭なピークを示さなくなる傾向も認められる．これには実験手順上の影響が考えられる．流路に泥水膜を散布してからEn-a試料を静置し、振動台によって加振するまでの時間にEn-a試料底面と泥水膜とが結合するが、加振が始まると泥水膜の特に表面近傍にて泥滓化が始まり、試料底面との結合が切断された．含水比、振動加速度ともに小さいほど、土塊を引っ張る前段階での試料底面と泥水膜表面の結合が強く、結合を切断するためにより大きな力を必要とする．含水比0%の振動加速度0～200gal、含水比50%の振動加速度0～200galの場合に表れた明瞭なピークは結合が切断される瞬間であり、この時の摩擦係数は静摩擦係数と推定される．一方で、含水比、振動加速度ともに大きいほど、土塊を引っ張る前段階での試料底面と泥水膜表面の結合が弱く、結合を切断するために必要な力が小さくてすむため、明瞭なピークを示さなくなると考えられる．以上のように、含水比、振動加速度が大きくなると静摩擦係数と動摩擦係数の差が小さくなり、静摩擦係数の評価は困難となった．静摩擦係数を滑動型表層崩壊の説明変数とすることは今後の課題である．

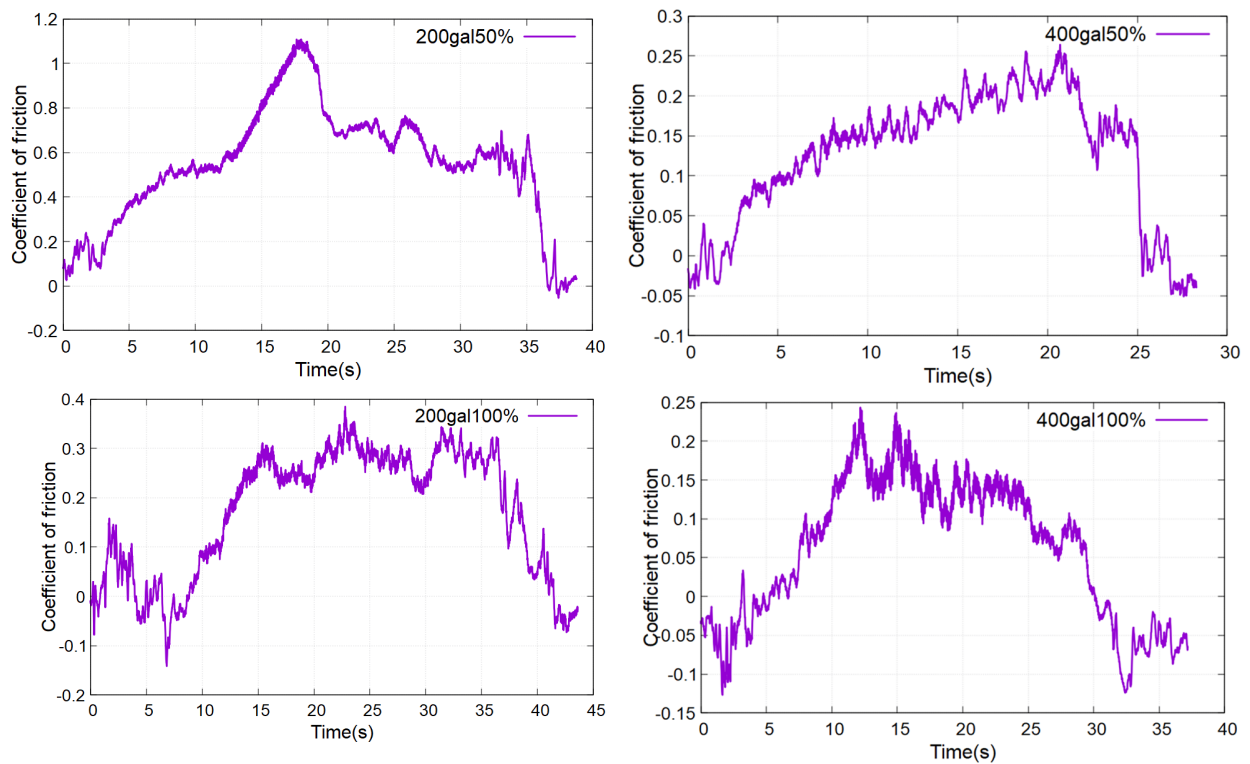


図8 土塊引張実験で得られた摩擦係数の変化の事例（図右肩の数値は振動加速度と含水比）

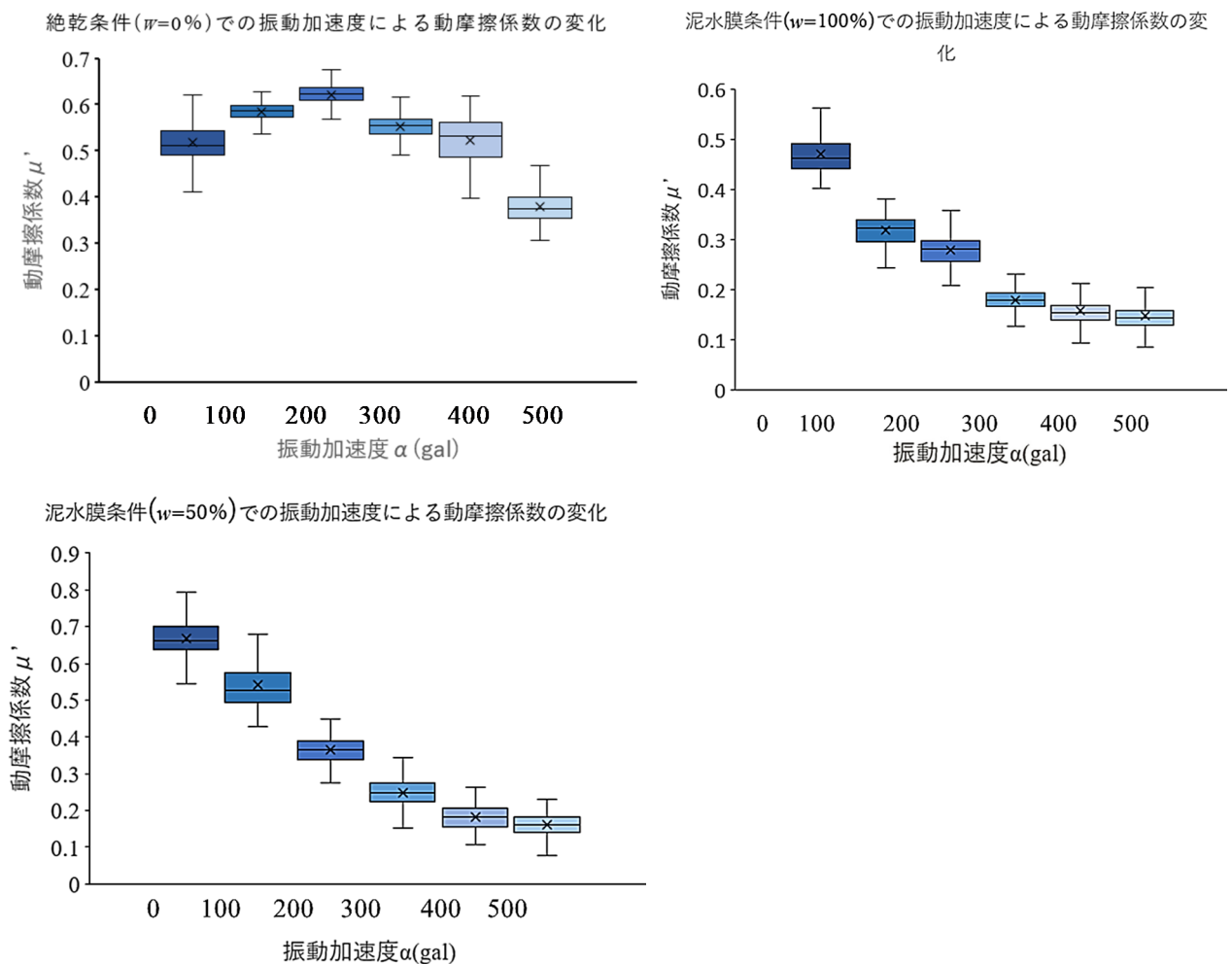


図9 土塊引張実験で得られた振動加速度と動摩擦係数との関係

(4) 実験結果

地震動により高含水テフラ層内の間隙水の一部が表面・底面近傍に排水されること、泥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。さらに泥水膜の含水比が高いほど、振動加速度が大きいほど動摩擦係数は減少することも確認された。間片ら⁹⁾は、平成30年北海道胆振東部地震で発生した滑動型表層崩壊の7事例の等価摩擦係数は0.14～0.35であったと報告している。等価摩擦係数とみかけの動摩擦係数は力学的に等しいことから、本実験で得られた泥水膜存在時の動摩擦係数をみかけの動摩擦係数とみなした場合、含水比50%かつ振動加速度400～500gal、含水比100%かつ振動加速度300～400galの場合に厚真町東和地区での実際の等価摩擦係数0.18に近い動摩擦係数となる(図9)。岡田⁷⁾は、En-aブロック底面から排出される水量を流路に与えて、En-aブロックの引張試験を行うと、動摩擦係数は0.3程度に減少するが、実際の崩土の等価摩擦係数0.18までは低下しないことを明らかにしている。ただし、この実験は、引張試験時に地震動を与えていない。

これらの結果から、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境界近傍に地震動によって泥水膜が生成され、地震加速度最大値以降、加速度500gal未満の中・小地震が継続することで泥水膜状態が維持されて動摩擦係数が減少し、結果、崩土が長距離移動できることが示唆された。

崩土の長距離移動に関わる要因として、力学的エネルギー的観点からは、崩土が滑動を開始する際に地震動によって初速が与えられることや、崩壊・滑動区間から流下・堆積区間へ移行する際の勾配変化が緩やかであることが、崩土が地面に衝突する際の運動エネルギー損失が抑えられることも考えられる。

本研究では、継続的な中・小地震動によるシアニング現象によって泥水膜の粘度が低下し、その粘性抵抗が減少することに着目できる。崩土の滑動中に、滑動による振動を崩土は受けるが、地震誘因の場合はさらに継続的に中・小地震動を受ける。この中・小地震動によって、泥水膜内土粒子の分散状態が維持される(土粒子骨格が破壊された状態)と想像できる。水膜・泥水膜に混入するのは細粒土であるため、泥水膜は微粒子懸濁液となり、そのような擬塑性流体は繰返しせん断によって粘度が低下するシアニング現象により、速度と荷重が変化しなければ、ストラインベック曲線で定義されるように摩擦係数が減少すると考えられる。

4. 崩土到達距離に影響を与える斜面範囲の推定

本研究では、地震直後の空中写真、及び航空レーザ測量データ(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10)。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。
- 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¹¹⁾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か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11）。また崩壊の面積は、520から20,700 m²まであり、5,000 m²以下が67 %を占める（図12）。72%の崩壊地において、平均勾配は30度以下であった（図13）。

（1）CNN（ResNet -50）を用いた崩土の流下距離推定モデル

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0.5mグリッドサイズのDEMを用いてArcMap上で区分した。

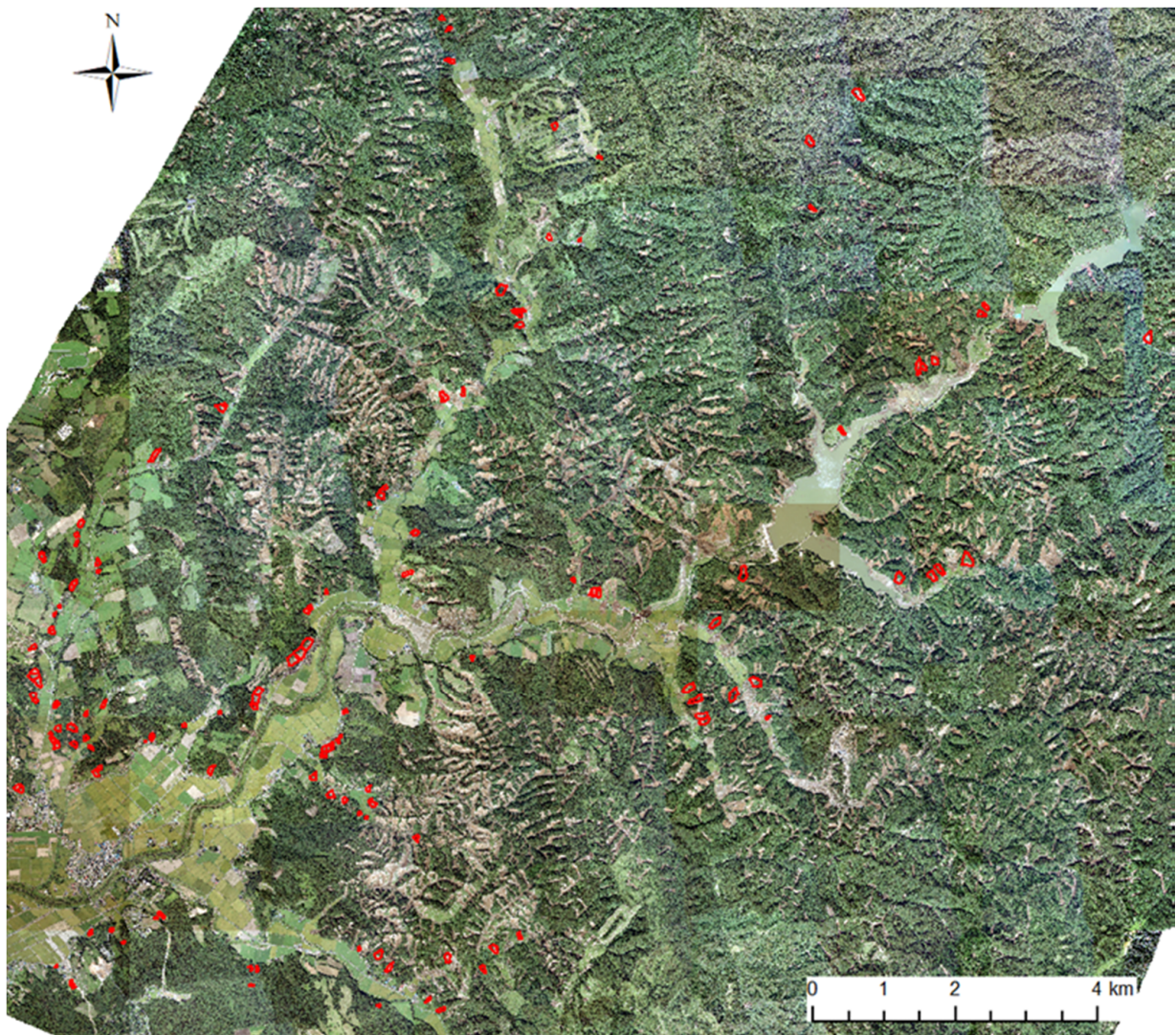


図10 厚真町管内における分析対象崩壊地の分布（赤）。背景は地震直後に取得されたオルソ写真（北海道開発局提供）

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数値標高モデル（東西方向9.1m，南北方向12.3mサイズ）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．

$$TWI = \ln (\alpha / \tan \beta) \quad (2)$$

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．

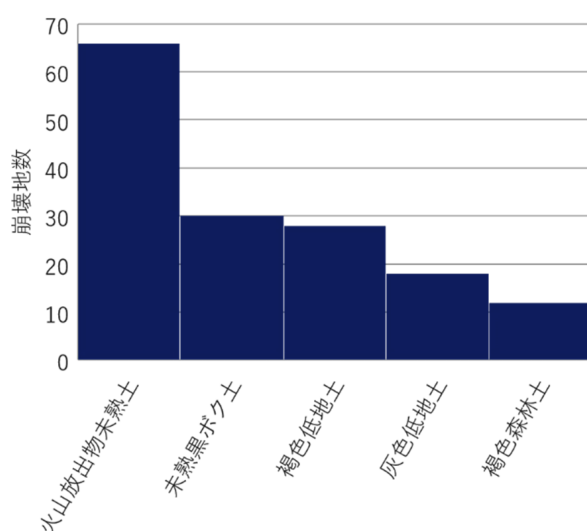


図11 土壌図（農業・食品産業技術総合研究機構）11)に基づく，分析対象崩壊地における土壌分類の頻度分布

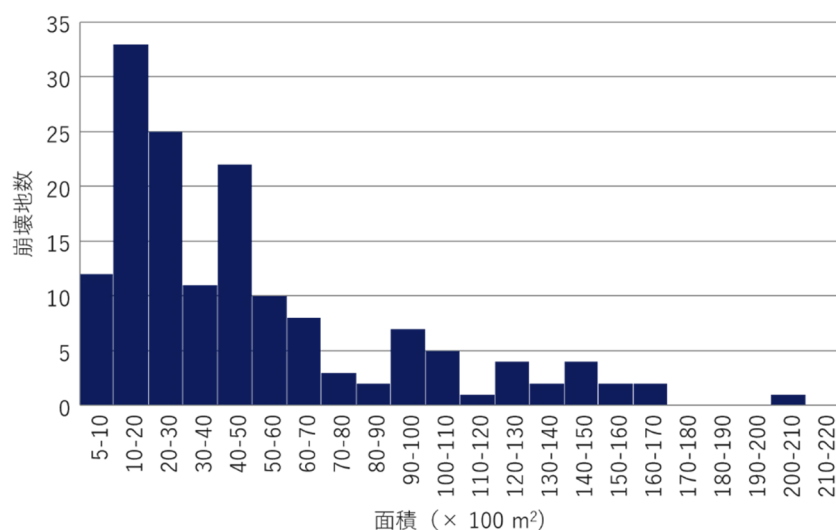


図12 分析対象崩壊地の面積の頻度分布

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、国土地理院の数値標高モデル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。

d) CNNによる分類モデルの概要

CNNの分類モデルには、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方向236m、南北方向320m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。応答変数として、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した。ここで、流下距離が100m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、A：0m以上20m未満、B：20m以上40m未満、C：40m以上60 m未満、D：60m以上80m未満、F：80m以上100m未満、G：100m以上の6クラスを用意した。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。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。モーメント項付き確率的勾配降下法を用い、初期学習率0.0001とした。過学習を防ぐために、15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、3度目に検証損失が前の最小損失を上回った時に学習を停止させた。L2正則化係数0.0001で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。検証損失が最小となる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に対して、崩土が停止するクラスを推定した。

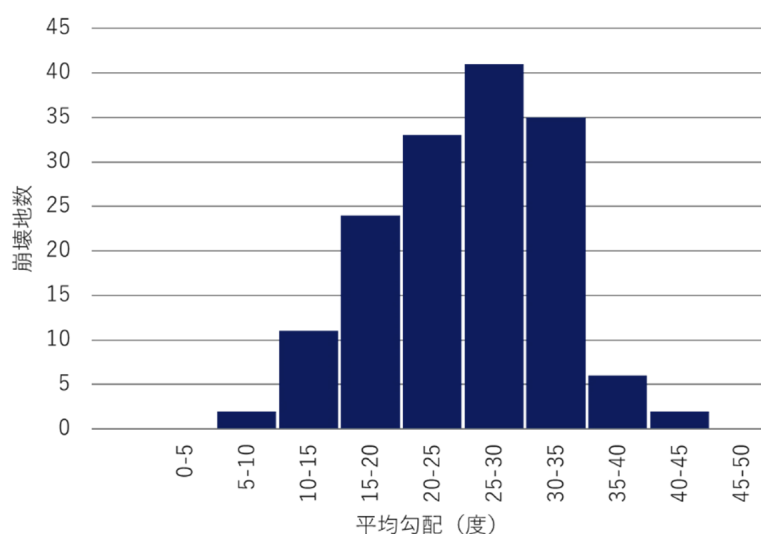


図13 分析対象崩壊地の平均勾配の頻度分布

分類モデルの精度は、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。本モデルでのAUC値は0.715であり、Grad-CAM手法を実施するに十分な精度があった。

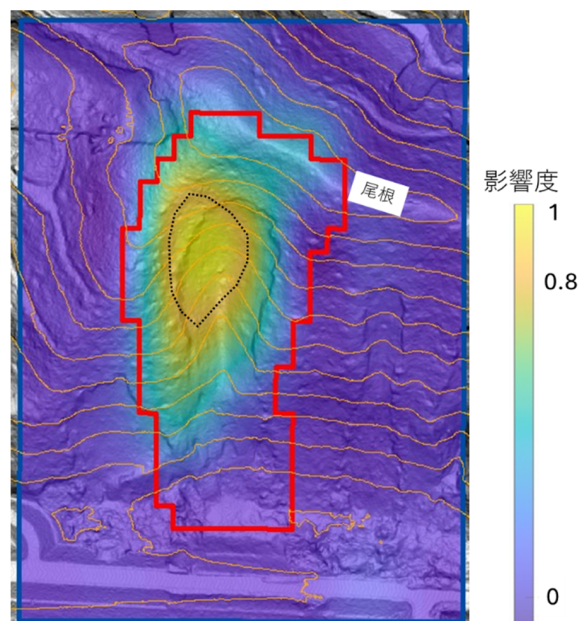


図14 解析対象地における影響度の分布例。(等高線は10m間隔。赤枠内：集水域、黒点線枠内：影響度が0.8以上。領域3と判断)

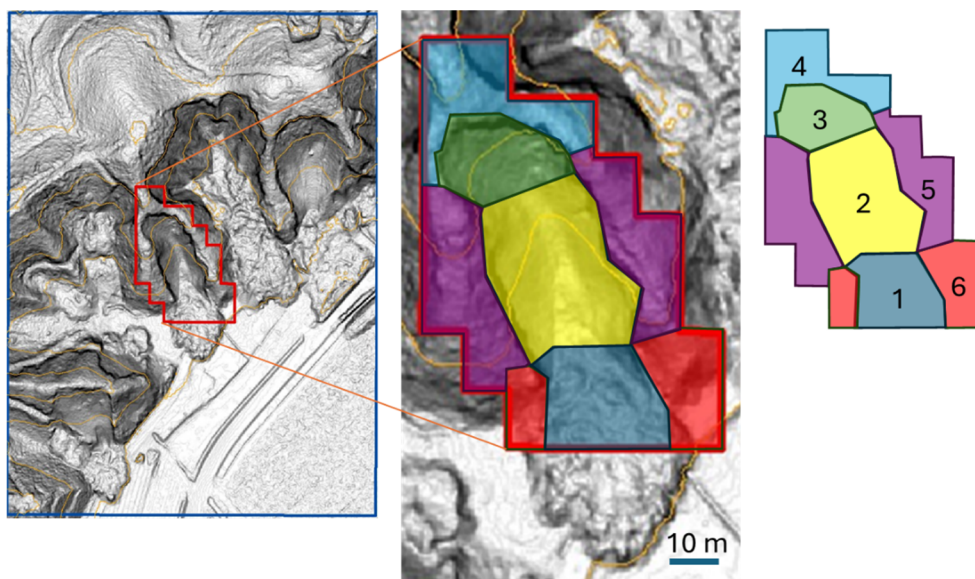


図15 斜面の領域分類

(2) Grad-CAMによるCNNの可視化

CNNにて得られた各斜面における長距離流動距離のクラスのカテゴリスコアに大きく影響を与えた斜面の領域を、Grad-CAM¹²⁾手法を採用することにより求めた。この手法では、各部位のカテゴリスコアの決定に与えた影響の大きさ（以下、影響度）を可視化することができる。モデルにおいて流動距離を決定するに重要な斜面の領域を抽出できれば、モデルの精度向上に加え、土質サンプルの採取箇所の選定に役立てることができると考えられた。

Grad-CAM手法では、各154斜面において、最終畳み込み層の7×7の特徴量マップ2048チャンネルそれぞれで、カテゴリスコアが最大となったクラス（以下、最大クラス）に対するカテゴリスコアの疑似的な勾配を得る。この勾配を該当の7×7の特徴量マップにかけ合わせたものを、2048チャンネル分合計して、7×7の2次元配列を得る。この配列をReLU関数に通することにより、カテゴリスコアの増加に影響のある場（座標）を強調できる。それに双三次内挿を使用してアップサンプリングし224×224の2次元配列を得たのち、

表1 各斜面の最大クラスに対して、その決定に影響を与えた斜面領域。数字は斜面数

		最大クラスの決定に影響を与えた斜面領域					
		1	2	3	4	5	6
最大クラス	A	2	0	1	7	4	0
	B	9	5	13	11	8	0
	C	6	4	6	3	3	0
	D	1	2	3	1	0	1
	E	0	2	2	0	0	0
	F	3	3	5	1	2	1

表2 各斜面において実際に崩土が到達したクラスに対して、最大クラスの決定に影響を与えた斜面領域。数字は斜面数

		最大クラスの決定に影響を与えた斜面領域					
		1	2	3	4	5	6
最大クラス	A	0	0	1	5	3	0
	B	2	1	8	5	4	0
	C	1	3	2	2	0	0
	D	0	1	1	1	0	0
	E	0	1	1	0	0	0
	F	1	1	2	0	1	0

表3 最大クラスに実際の到達距離が含まれた斜面数の割合と、最大クラスの決定に影響を与えた斜面領域。

		最大クラスの決定に影響を与えた斜面領域					
		1	2	3	4	5	6
最大クラス	A	0	NA	1.00	0.71	0.75	NA
	B	0.22	0.20	0.62	0.45	0.50	NA
	C	0.17	0.75	0.33	0.67	0.00	NA
	D	0	0.50	0.33	1.00	NA	0.00
	E	NA	0.50	0.50	NA	NA	NA
	F	0.33	0.33	0.40	0.00	0.50	0.00

配列の最大値を1とおくことで、各座標における相対値を求める。この相対値を影響度とする。各斜面において、最大クラスに対する影響度の分布を図化し、影響度が0.8～1.0の範囲を、流動距離を決定するに重要な斜面の領域とみなした（図14）。この領域については、各斜面の集水域において、①：斜面末端部（勾配変化点から氾濫原まで）、②：①より上方で滑落崖を含まない範囲、③：滑落崖を含む斜面頭部、④：滑落崖上部から尾根までの範囲、⑤：②の側部、⑥：①の側部の未崩壊斜面領域（斜面末端を含む）、の6領域に分類した（図15）。この領域の設定および分類に際しては、崩壊斜面の頭部や斜面下端の形状が、崩土の到達距離に影響を及ぼしたとする既往研究を参考にした^{13), 14)}。ここで、影響度0.8～1.0の部分が①と②に出現する場合には①に、②と③に出現する場合には、③に斜面を分類することにした。

表1に、各斜面の最大クラスに対して、その決定に影響を与えた斜面領域を示す。表2は、表1に示した斜面のうち、実際に各クラスで崩土が停止した斜面数、表3には、表1中の数を表2中の数で除した値を示す。ここで表において斜面数が5以下の場合には、参考値（薄く斜体で表した数字）として示している。これらの表からは、斜面末端部よりも上部の方の地形が、崩土が少なくともBのクラスに到達する場合に重要であることを示唆している。また解析対象の斜面数が少ないために明言はできないものの、他のクラスについても同様の結果が得られる可能性も示されている。なお表からは、集水域外が影響を与えたとされたケースは除外している。それらのケースについては、斜面の地形が最大クラスの決定にさほど影響していないとも考えられ、その際には土質が崩土の到達距離に関する主な因子となる可能性もある。一方で、モデルに使用しているDEMのサイズが粗い為、斜面の面積が小さいとその地形をモデルに十分に反映できていない可能性もある。

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、振動台を用いた土塊引張実験を実施することにより、以下の知見を得ることができた。

- ①テフラ構成緩勾配斜面における地震誘因の滑動型表層崩壊では、高含水テフラ層の境界付近のみで液状化状態が発生し、水膜・泥水膜が形成される。
- ②振動台を用いた土塊引張実験から、泥水膜の含水比が大きいほど、崩土滑動中に継続的に作用する中小地震動の加速度が大きいほど、崩土底面とすべり面との接触面における動摩擦係数は低下することが明らかになった。
- ③厚真町東和川流域において発生した滑動型表層崩壊の等価摩擦係数と実験で得られた動摩擦係数を比較すると、泥水膜の含水比が50%の場合は加速度400gal以上、含水比100%の場合は加速度300～400galの地震動が継続すると、両者は近似する。
- ④震動によってすべり面境界付近が液状化し、大きな地震加速度の後の継続時間の長い中・小地震動の継続によって滑動時の泥水膜内土粒子の分散状態が維持されるために動摩擦係数が減少し、結果、崩土は長距離移動できると考えられる。滑動型表層崩壊と崩土の移動の概念モデルのすべてが説明できているわけではないが、概ね、妥当であると考えられる。

また、Grad-CAMによるCNNの可視化からは、斜面を集水域単位で捉えた際、末端よりも上方の形状が崩土の到達距離に影響を及ぼしていることが示唆された。今後は崩壊の発生域の地形及び土質に着目して、解析を進める予定である。

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、北海道大学の竹中源弥君と富安蓮君の協力を得た。

本研究は、令和5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，pp.383-384，2020.
- 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) 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.
- 5) 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 Iburi Earthquake, *Landslides*, Vol. 19 (8), pp.1813 - 1824, 2022.
- 6) 竹中源弥・山田孝：平成30年北海道胆振東部地震で発生した緩勾配斜面崩壊に関する実験的研究，2021年度砂防学会研究発表会概要集，pp.521-522，2021.
- 7) 岡田裕太：北海道胆振東部地震の滑動型表層崩壊における崩土到達範囲の再現手法，北海道大学農学部卒業論文，2023.
- 8) Sassa, K., Fukuoka, H., Morikawa, H., and Ochiai, H. : Achievements of aerial prediction of earthquake and rain induced rapid and long-travelling flow phenomena (APERITIF) Project, 京都大学防災研究所年報, Vol.48(C), pp.31-52, 2005.
- 9) 國生剛治：砂層の成層構造による液状化時の水膜形成と地盤安定性への影響，応用地質，第41巻，第2号，pp.77-86，2000.
- 10) 小山内信智・海堀正博・山田孝・笠井美青・林真一郎・桂真也・柳井清治・竹林洋史・藤浪武史・村上泰啓・伊波友生・佐藤創・中田康隆・阿部友幸・大野宏之・武士俊也・田中利昌・小野田敏・本間宏樹・柳井一希・宮崎知与・上野順也・早川智也・須貝昂平：平成30年北海道胆振東部地震による土砂災害，砂防学会誌，第71巻5号，pp.54-65，2019.
- 11) 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>
- 12) Selvaraju R. R., Cogswell, M., Das, A., Vedantam, R., Parikh, D., and Batra, D. : Grad-CAM: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization, *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 618-626, 2017.
- 13) 大久保駿・吉松弘行・綱木亮介：資料解析によるがけ崩れの崩土の到達距離の予測，地すべり，第32巻第2号，pp.26-31，1995.
- 14) 寺田秀樹：可能性線形回帰分析による崩土の到達範囲の検討，砂防学会誌，47巻1号，pp.37-42，1994.