

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 教授

²北海道大学大学院 農学研究院 特任教授

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、この地震で発生した154の斜面崩壊を対象に、地形、土壌、土地利用、地震に関する因子を考慮し、崩土の流下距離を応答因子とする回帰モデルを作成した。回帰モデルの単位として、崩壊域と集水域の2通りを採用した。崩壊域を対象とした回帰モデルでは、崩壊面積が最も重要な影響因子として特定された。崩壊面積が $3,510\text{m}^2$ 以上であれば、土砂災害警戒区域の上限である50mを超える確率が高く、特に震源断層から8.2km以内で集水面積が $13,500\text{m}^2$ 以上の場合、崩土は100m以上流下した。集水域を対象とした回帰モデルでは、集水面積が最も影響力の大きい因子であり、 $9,400\text{m}^2$ 以上であれば流下距離は50mを超え、 $14,800\text{m}^2$ 以上では110m以上となった。また平均勾配と土地利用が重要な修飾因子として特定された。この結果は、崩壊発生前においても、集水面積を用いることで崩土の流下距離が推定できる可能性を示唆している。なお等価摩擦係数が0.3以下の領域では、実際の流下距離が期待値を上回る事例が多く、推定精度向上には中・小地震動時の泥水膜流による動摩擦係数の考慮が必要と考えられる。

《キーワード：斜面崩壊；崩土；流下距離；回帰モデル；等価摩擦係数》

1. はじめに

斜面崩壊による被害は、崩土が流下する範囲で主に発生する。そのため、崩土の流下域を的確に推定できれば、被害の軽減や防止が可能となる。現在、わが国では、急傾斜地からの崩壊に対し、斜面高の2倍の距離もしくは50 m以内を土砂災害警戒区域として定めている。また、崩土の流下距離については、崩土の量と等価摩擦係数（崩壊高（ H , m）/崩壊頂部から崩土到達末端までの距離（ L , m））との間に明確な相関関係があることが分かっている¹⁾。

一方で、2018年北海道胆振東部地震では、斜面崩壊からの崩土が土砂災害警戒区域外まで長距離に渡り流動したケースが多発した。これらのケースでは、斜面高や崩壊高以外にも、水の流動に関連する因子が崩土の流下距離に大きく関与したことが示唆されている。例えば田近ら²⁾は、この地震で谷型斜面からの崩土が長距離流下することを示した。また、一帯では風化の進んだ保水性の高い火山灰層の滑落が多数報告されており³⁾、これは崩土の含水量が流下距離に大きな影響を及ぼすとしたLegros⁴⁾の知見と一致する。さらに、胆振東部地震では崩土が農地や居住域まで到達したことから、Giarola ら⁵⁾が示した流下域の土地利用による流下距離への影響も、同様に考慮すべき因子といえる。

以上から、特に保水性の高い土壌が分布する地域では、これらの諸条件を考慮した流下範囲の推定手法を採用することが望ましい。複数の条件を用いた推定手法としては、ロジスティック回帰や、近年では機械学習による統計学的モデルが用いられている。ここで機械学習は、重要な因子を自動的に抽出でき、ロジスティック回帰と異なり因子間の相互作用も考慮できる利点がある^{6,7)}。しかし、機械学習アルゴリズムの多くはブラックボックスモデルであり、各因子の条件やその相互作用のパターンを把握することができない。そのため、高精度なモデルが得られても、結果の解釈が困難で、各因子が流下距離に与える影響を具体的に理解することができない。ただし、機械学習モデルの中でも回帰木はホワイトボックスであり、各因子の条件と応答変数への影響度がツリー構造で視覚的に示されることから、因子間の相互作用や因果関係を解釈することができる。回帰木には過学習しやすいという課題があるものの、流下距離に対する各因子の条件と影響度を明らかにできることは、未解明な点の多い崩土の流下プロセスの解明に重要な情報を提供し、他地域における流下距離推定の参考にもなり得る。

本研究では、胆振東部地震で発生した斜面崩壊を対象に、地形、土壌、土地利用、地震に関する因子を考慮し、崩土の流下距離を応答因子とする回帰木を作成する。ここでは、対象とする斜面の範囲を、崩壊域と集水域の2通りとする。崩壊域を対象とした回帰木からは、崩壊斜面の特徴と流下距離の関係を直接明らかにすることができる。しかし、降雨や地震などの誘因が発生する前に、斜面崩壊の発生場所を特定することは困難である。そこで、集水面積と崩壊面積には、強い線形の関係があることを踏ま

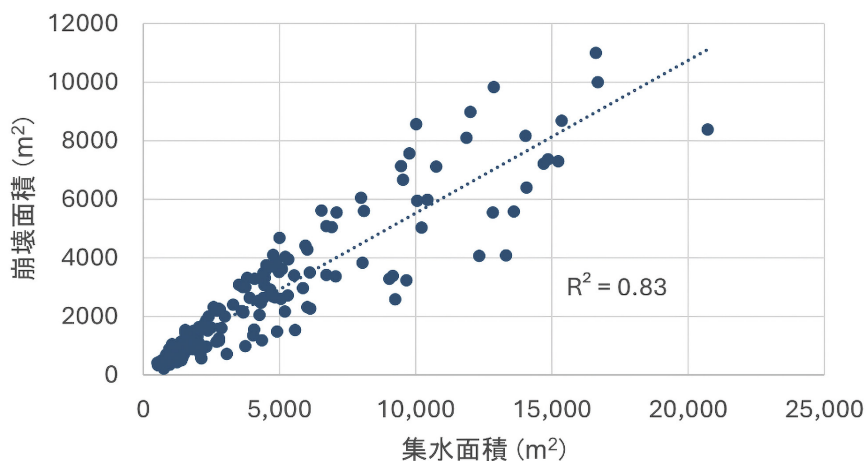


図1 対象斜面の集水面積と崩壊面積の関係

え（図1），集水域を対象とした回帰木を作成する．この回帰木からは，誘因発生前にも適用できる，流下距離推定に必要な因子とその条件を調べることができる．得られた結果は，等価摩擦係数と合わせて考察し，今後の崩土流下距離推定モデルの発展に活用する．

2. 研究対象地

対象地は2018年北海道胆振東部地震（Mw 6.6）により，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⁸⁾．地域では，支笏カルデラ，樽前火山，恵庭火山，クッタラ火山，羊蹄火山，有珠火山から，後期更新世から完新世にかけて降下した火砕堆積物（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が広く分布する⁹⁾．本研究では，以下の条件にもとづき，154の崩壊地の斜面を，地震直後の空中写真と航空レーザー測量データ（北海道開発局提供）から選定した（図2）．

- 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，解析対象に含めた．その内訳は，林地内を移動した例が20，建築物に衝突後も移動し続けた例が16，水路をまたいで流下した例が67である．
- ②隣接する崩壊地からの崩土が重ならない．
- ③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．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，解析対象外とした．

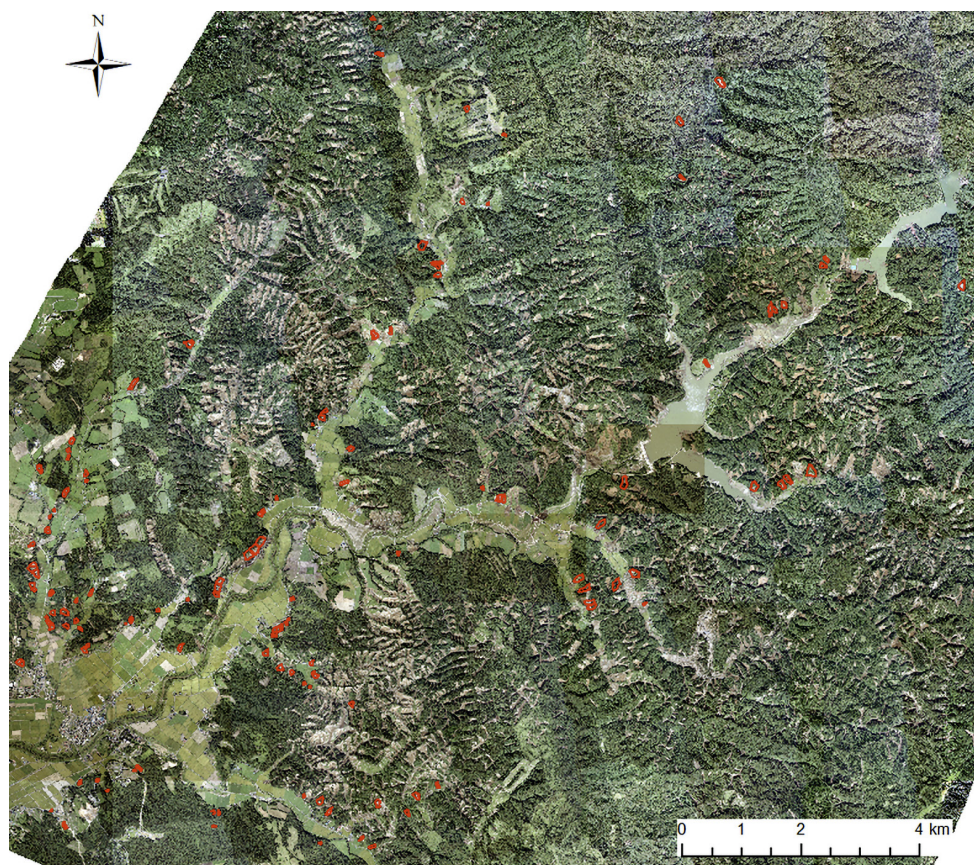


図2 厚真町管内における分析対象崩壊地の分布（赤）．背景は地震直後に取得されたオルソ写真（北海道開発局提供）

農業・食品産業技術総合研究機構の土壌図¹⁰⁾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3）。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4）。72%の崩壊地において、平均勾配は30度以下であった（図5）。

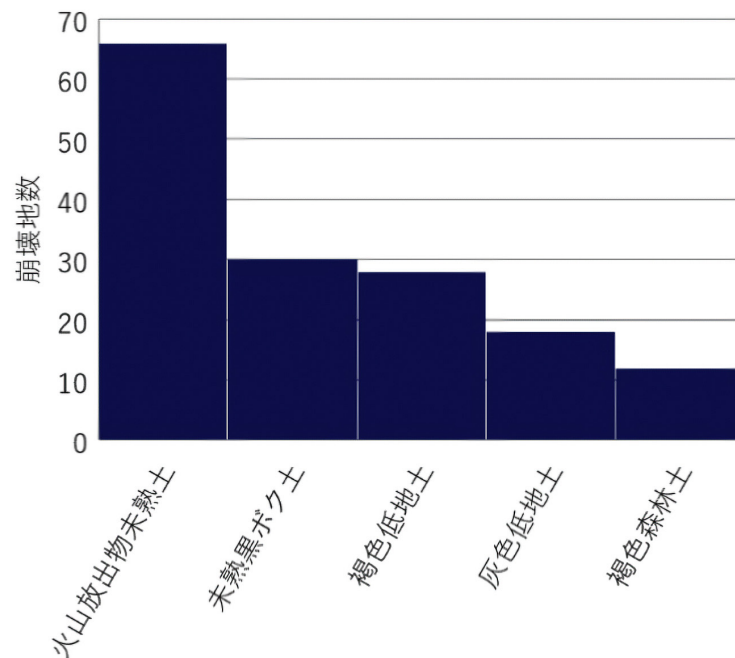


図3 土壌図（農業・食品産業技術総合研究機構）¹⁰⁾に基づく、対象崩壊地における土壌分類の頻度分布

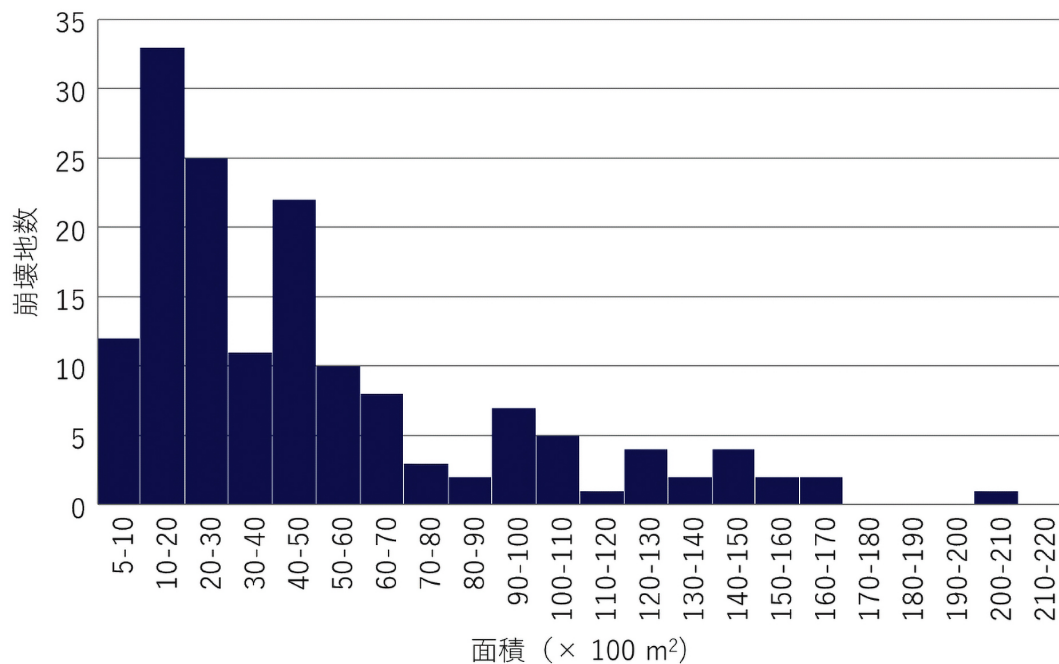


図4 対象崩壊面積の頻度分布

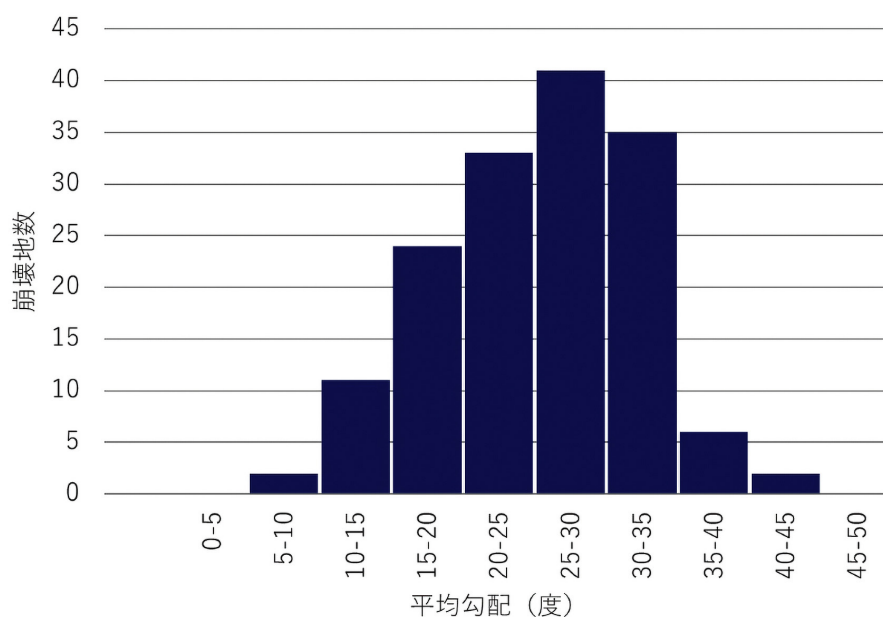


図5 対象崩壊地の平均勾配の頻度分布

3. 回帰木による崩土流下距離の推定手法

(1) 解析対象単位

解析対象とする単位として、崩壊域と集水域の2つの領域（図6）を採用する。

a) 崩壊域

地震直後に取得されたオルソ写真および航空レーザー測量データから作成した勾配図から、崩壊範囲を判読した。崩壊域の末端は、周囲の斜面および崩壊前の画像から推測された斜面の脚部までとした。

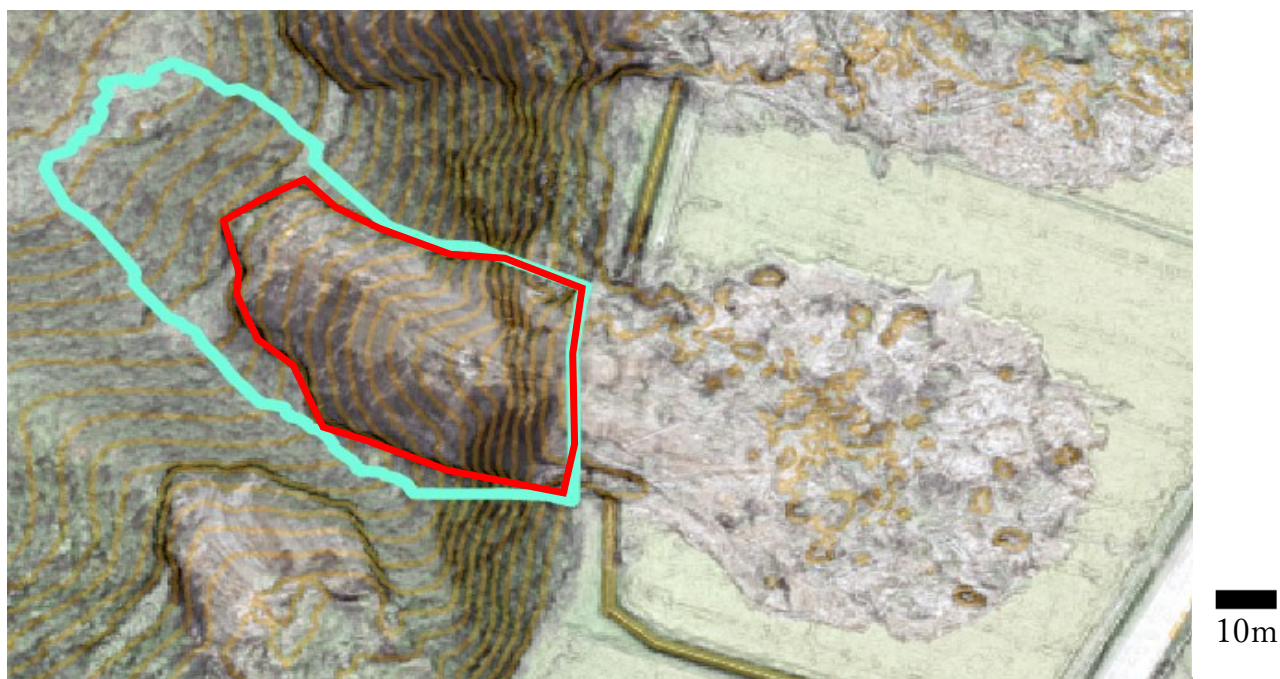


図6 崩壊域（赤）および集水域（水色）の例。背景は地震直後に取得されたオルソ写真（北海道開発局提供）。等高線（地震後の航空レーザー測量データより作成）は1m間隔。

b) 集水域

崩壊の面積や崩土の流下距離は、斜面が含む水量と関係すると想定されることから、崩壊地が発生した斜面の集水域を抽出し、解析の単位とした。ただし地震発生前については10 m間隔の等高線図や、それに基づいて作成された10 m-DEMしか存在せず、それらの解像度が粗い地形情報からは集水域を判読するのは困難であった。そこで、崩壊発生後も尾根の位置が大きく変わるケースは稀であったことを踏まえ、地震直後に取得された航空レーザー測量データから作成した詳細な勾配図および等高線図を用いて集水域を判読した。

(2) 説明因子

各因子は、ArcGIS Pro上で求めた。

a) 崩壊域を対象にした回帰木における説明因子

1) 崩壊面積

崩壊域のポリゴンを作成し、その面積をArcGIS上で計測した。崩壊面積が大きいほど崩土量は多くなる傾向があり¹⁾、崩土量が多いほどその流下距離が長いと報告されている⁴⁾。

2) 崩壊長 (m)

地震直後に取得された航空レーザー測量データから作成した0.5 m-DEMを用いて、崩壊域の最高標高地点から斜面傾斜方向に沿って斜面脚部に至るまでラインを引き（以下、崩壊長ライン）、その平面距離を、GIS画像上で測定した。

3) 崩壊高 (m)

地域を対象に国土地理院が公表している10m-DEMから、まず1m-DEMを作成した。そして崩壊長ラインにおける始点（最高標高地点）と終点（最低標高地点）の標高値をこの1m-DEMから求め、その差を崩壊高とした。

4) 勾配 (度)

崩壊高を崩壊長で割ることで、平均勾配を算出した。

5) 上側勾配 (度)

崩壊発生場付近の勾配の指標とみなす。崩壊長ラインにおける中点の標高値を、3)で用いた1m-DEMより読み取り、始点との標高差を崩壊長の半分で割ることにより求めた。

6) 下側勾配 (度)

斜面上における、崩土の滑動域の勾配の指標とみなす。崩壊長ラインにおける中点の標高値を、3)で用いた1m-DEMより読み取り、終点との標高差を崩壊長の半分で割ることにより求めた。

7) TWI

TWI (Topographic Wetness Index) は、斜面の各地点での水のたまりやすさを表す指標であり、以下の数式で求められる。

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

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。本研究では国土地理院による10 m-DEMを用い、10 mセルごとにTWIを計算した。そして、水分量の多さの違いを強調するため、各崩壊域において最大のTWIを代表値として採用した。

8) 平面曲率

国土地理院による10 m-DEMを用い、平面曲率を求めた。そして各崩壊域において、その平均値を代表値として採用した。

9) 断面曲率

国土地理院による10 m-DEMを用い、断面曲率を求めた。そして各崩壊域において、その平均値を代表値として採用した。

10) 土壌分類

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構による土壌図10)を用い、各崩壊域において、もっとも面積を占める土壌分類名を代表土壌とした。土壌分類名は、典型普通未熟黒ボク土、細粒質普通灰色低地土、中粒質普通灰色低地土、粗粒質普通灰色低地土、細粒質普通褐色低地土、粗粒質普通褐色低地土、礫質普通褐色森林土、典型湿性火山放出物未熟土、典型普通火山放出物未熟土であった。

11) 氾濫原における崩土流下域の土地利用

国土地理院により公開されている、地震発生前の航空画像と地震発生後のオルソ画像（北海道開発局提供）を用い、氾濫原における土地利用を、「田畑」、「森林」、「草地」、「造成地」の4種類に分類した。ここで田と畑については、航空写真からは識別が困難であった。また造成地には、庭や駐車場が含まれる。流下域において複数の土地利用が存在する場合は、最も支配的な用途を代表値として採用した。

12) 水路の有無

流下域における、用水路や小川の有無については、10)で用いた画像と電子国土基本図（国土地理院）より判読した。

13) 震源断層からの距離 (m)

国土地理院による震源断層モデルにおける、断層上端から各崩壊域までの最短水平距離を算出した。

14) 方位

国土地理院による10 m-DEMを用い、各崩壊域における平均方位を求めた。

15) 集水面積 (m²)

地震直後に取得された航空レーザー測量データから作成した0.5 m-DEMを用いて、崩壊が発生した斜面の集水域について、その面積を求めた。

b) 集水域を対象にした回帰木における説明因子

1) 集水面積 (m²)

a)の15)と同じ。

2) 集水域長 (m)

地震直後に取得された航空レーザー測量データから作成した0.5 m-DEMを用いて、集水域の最高標高地点から斜面傾斜方向に沿って斜面脚部に至るまでラインを引き（以下、集水域長ライン）、その平面距離を、GIS画像上で測定した。

3) 集水域高 (m)

地域を対象に国土地理院が公表している10m-DEMから、まず1m-DEMを作成した。そして集水域長ラインにおける始点（最高標高地点）と終点（最低標高地点）の標高値をこの1m-DEMから求め、その差を集水域高とした。

4) 平均勾配 (度)

集水域高を集水域長で割ることで、平均勾配を算出した。

5) 上側勾配 (度)

集水域長ラインにおける中点の標高値を、3)で用いた1m-DEMより読み取り、始点との標高差を集水域長の半分で割ることにより求めた。

6) 下側勾配（度）

集水域長ラインにおける中点の標高値を、3)で用いた1m-DEMより読み取り、終点との標高差を集水域長の半分で割ることにより求めた。

7) TWI

式（1）からTWIを算出し、各集水域において最大のTWIを代表値として採用した。

8) 平面曲率

国土地理院による10 m-DEMを用い、平面曲率を求めた。そして各集水域において、その平均値を代表値として採用した。

9) 断面曲率

国土地理院による10 m-DEMを用い、断面曲率を求めた。そして各集水域において、その平均値を代表値として採用した。

10) 土壌分類

a)の10)で記した分類を用い、各集水域において、もっとも面積を占める土壌分類名を代表土壌とした。

11) 氾濫原における崩土流下域の土地利用

a)の11)と同じ

12) 水路の有無

a)の12)と同じ

13) 震源断層からの距離

国土地理院による震源断層モデルにおける、断層上端から各集水域までの最短水平距離を算出した。

14) 方位

国土地理院による10 m-DEMを用い、集水域ごとに平均方位を求めた。

(3) 応答因子

集水域もしくは崩壊域ラインの終点から、崩土の流下域先端までの流下方向に沿った距離を、流下距離として応答因子に採用した。ここで回帰木の分類モデルに適用できるよう、距離は整数値で記録した。計測は、地震発生後のオルソ画像および航空レーザ測量（北海道開発局提供）から作成した勾配図を用い、GIS上で実施した。

(4) 回帰木の作成

崩壊地の流下距離推定に回帰木分析を適用した。回帰木は、条件分岐により対象斜面を段階的に2つのグループに分割し、データの非線形な関係性を考慮しながら、各グループの応答変数（流下距離）の平均値を期待値とする手法である。分析にはMATLABのfitrtree関数を用いて作成し、予測変数の選択方法としてinteraction-curvatureを設定することで、説明因子の単独効果だけでなく、2つの変数の交互作用や非線形な関係性も考慮した分割を可能とした。回帰木において、過度な条件分岐は解釈を困難にし、モデルの汎用性を低下させるため、以下の基準で剪定を実施した。

1. 原則として4階層以降の条件分岐を除去

2. グループの斜面数が39以上（全体の25%以上）の場合は、39未満になるまでの条件分岐を保持

剪定基準の妥当性を評価するため、設定した2つの条件（4階層以降の条件分岐の除去、および斜面数39以上のグループの分岐保持）について検証を実施した。回帰木モデルと単線形回帰式の予測精度を、期待値と実測値の差の平均値として比較したところ、単線形回帰式の予測精度が15.2 mであったのに対し、崩壊域を対象にした回帰木モデルは11.4 m、集水域を対象にした回帰木モデルは12.2 mと、いずれ

も優れた予測精度を示した。この結果により、本研究で採用した剪定基準の有効性が定量的に実証された。そして、これらの条件設定によって、モデルの過学習を抑制しつつ、十分な予測精度と解釈可能性を両立できることが確認された。

生成された回帰木からは、到達距離に対する支配的な説明因子を特定するとともに、現行の土砂災害警戒区域の上限である50 mを超える条件を示した。またその結果については、等価摩擦係数も含めた考察と検討がなされる。

4. 等価摩擦係数

等価摩擦係数は、崩壊高を崩壊頂部から崩土到達末端までの水平距離で除して求められる。崩壊高については3(2)のa)で示した方法で算出し、崩壊頂部から崩土到達末端までの水平距離は、3(2)のa)で示した崩壊長と3(3)で示した流下距離を合計して求めた。

5. 崩土流下距離の回帰木モデル

(1) 崩壊域を対象にした回帰木モデル

崩壊域を斜面単位とした回帰木分析の結果、154斜面が9グループに分類された(図7)。実測値と、各グループの期待値を示したグラフを図8に示す。この回帰木(図7)において、崩壊面積が最も影響力の大きい因子として特定され、第1階層から第3階層までに計3回の条件分岐に出現した。特に、崩壊面積が約3,510 m²を超えるグループでは、実測値が土砂災害警戒区域の上限である50 mを超える割合が67 %以上となった(図9, 表1 : F, G, H, I)。最長の流下距離を示したグループIは、崩壊面積が3,510 m²以上、震源断層から8.2 km未満、集水面積13,500 m²という条件を満たし、これは土砂生産量が多く、地震による揺れが強く、斜面に含まれる水の量が多いことが反映されていると解釈できる。なお震源から8.2 km以上離れた地点でも、崩壊高が約68 m以上の場合(G)には、実際の流下距離は100 mを超えた。一方で、崩壊高が68 mより低いグループ(F)においては、崩壊面積が1,930 から3,510 m²であり、崩壊高が17 mを超えるグループ(E)と流下距離に大きな差は見られなかった。また斜面の水分量を示す指標であるTWIは、崩壊面積が810 m²から1,930 m²の範囲において、下位階層で影響因子として出現し、8.4を超え

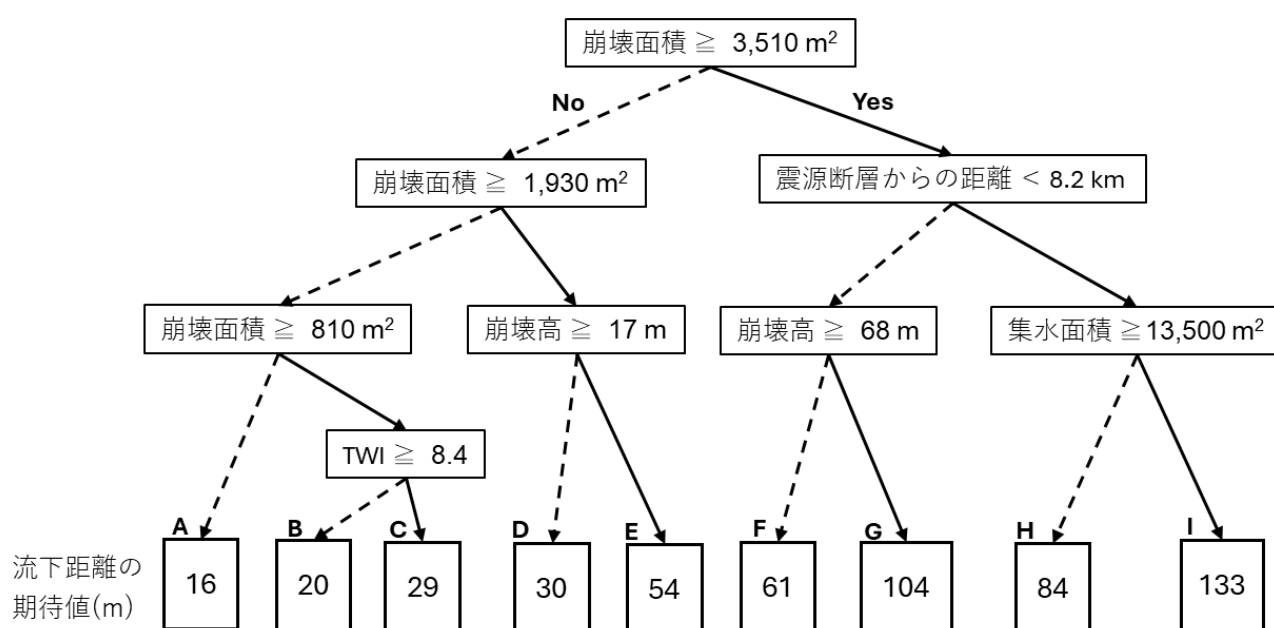


図7 崩壊域を対象にした回帰木

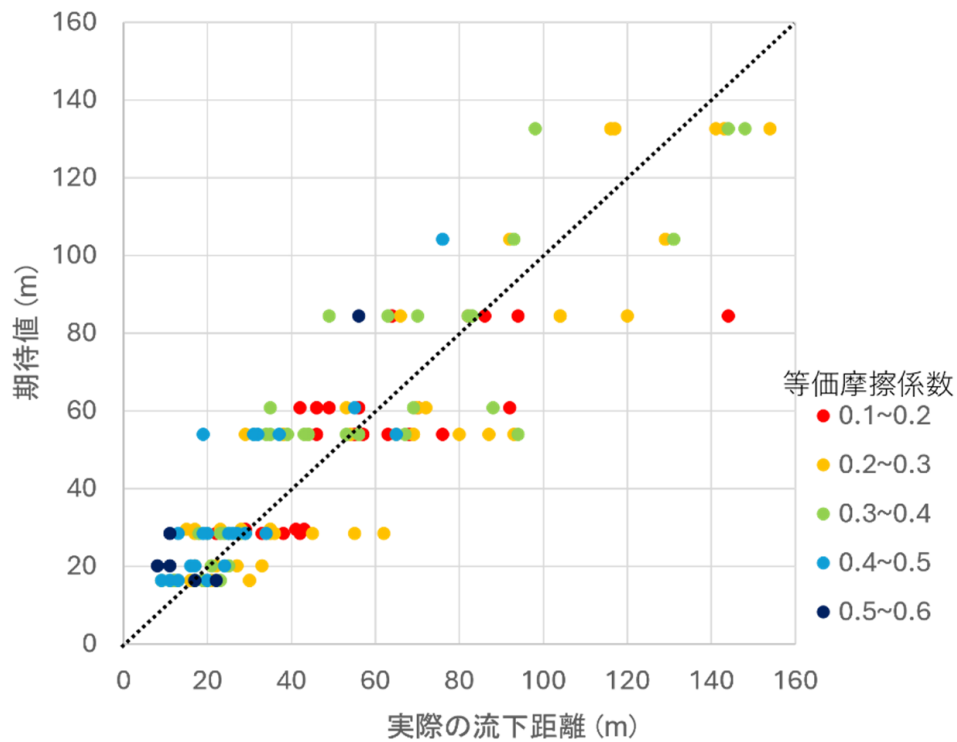


図8 実際の流下距離と、崩壊域を対象にした回帰木による期待値の関係

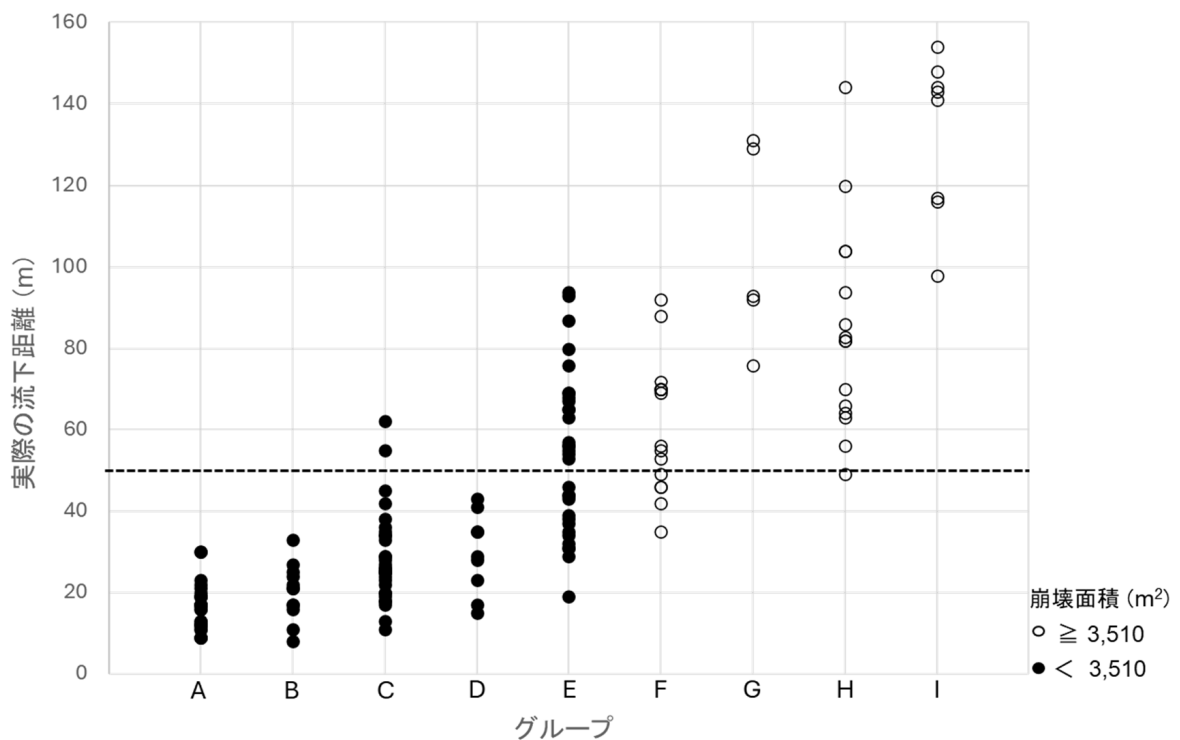


図9 崩壊域を対象にした回帰木における、各グループに属する斜面からの実際の流下距離

る場合 (C) に、崩土の流下距離を延ばす効果が確認された。しかし、回帰木の構造からは、水分量の指標としての影響力は集水面積と比較すると限定的であることが明らかとなった。

表1 崩壊域を対象にした回帰木で分類された各グループにおける崩土の流下距離

グループ	箇所数	流下距離 (m)			実際の流下距離 > 50 m の箇所の割合
		期待値	実測最大値	実測最小値	
A	27	16	30	9	0%
B	12	20	33	8	0%
C	31	29	62	11	6%
D	9	30	43	17	0%
E	32	54	94	19	56%
F	15	61	92	35	67%
G	5	104	131	76	100%
H	15	84	144	49	93%
I	8	133	154	98	100%

(2) 集水域を対象にした回帰木モデル

水域を対象とした分析では、10グループに分割された回帰木が生成された（図10）。実測値と、各グループの期待値を示したグラフを図11に示す。この回帰木構造からは、集水面積が流下距離に最も強い影響を与える因子として特定され、第1層から第3層にかけて計4回の条件分岐に関与していた（図10）。9,400 m²以上の集水面積を持つ斜面で構成されたグループQ, R, Sでは、すべての対象斜面において、実際の流下距離は土砂災害警戒区域の上限である50 m以上となった（図12, 表2）。特に集水面積が14,800 m²を超えるグループSに属する斜面では、崩土の流下は110 mを超えた。また、集水面積が14,800 m²未満でも、平均勾配が19度を超えるグループRに属する斜面では、より緩やかな斜面と比較すると、崩土が長距離を流下した。さらに、集水面積が9,400 m²より小さくとも、3,400 m²以上であるグ

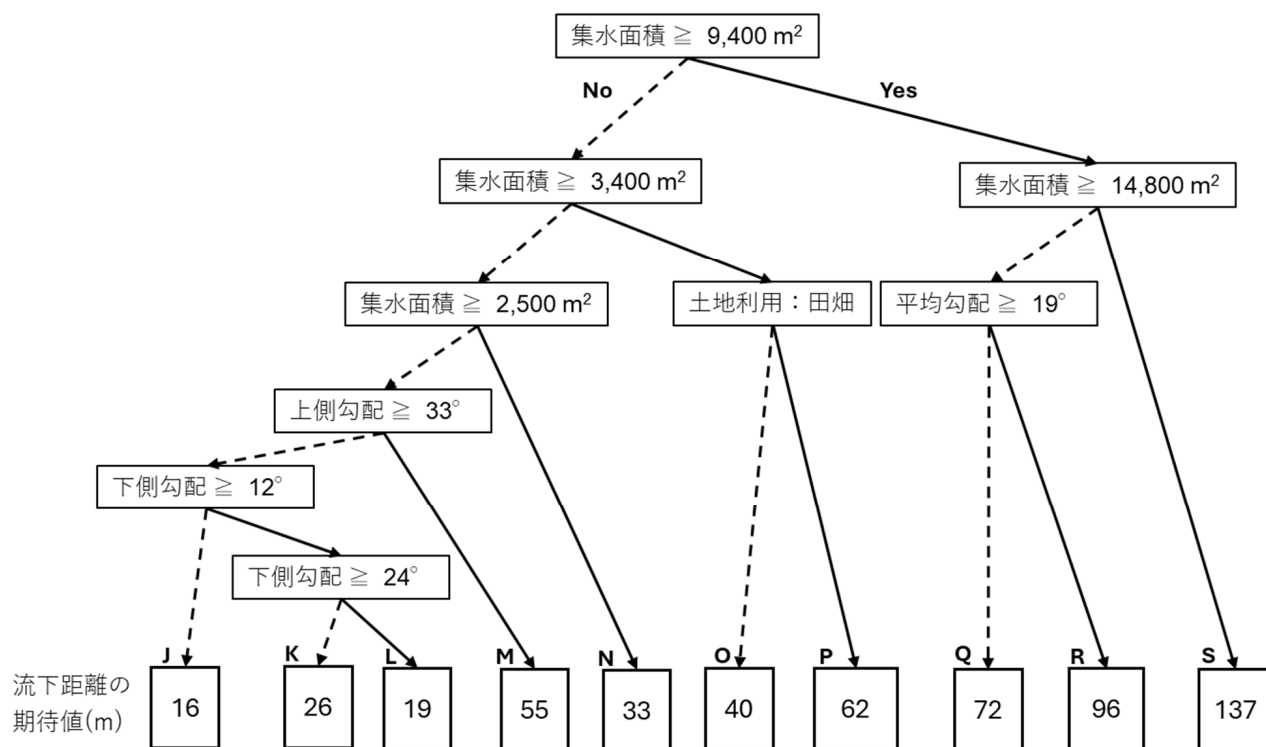


図10 集水域を対象にした回帰木

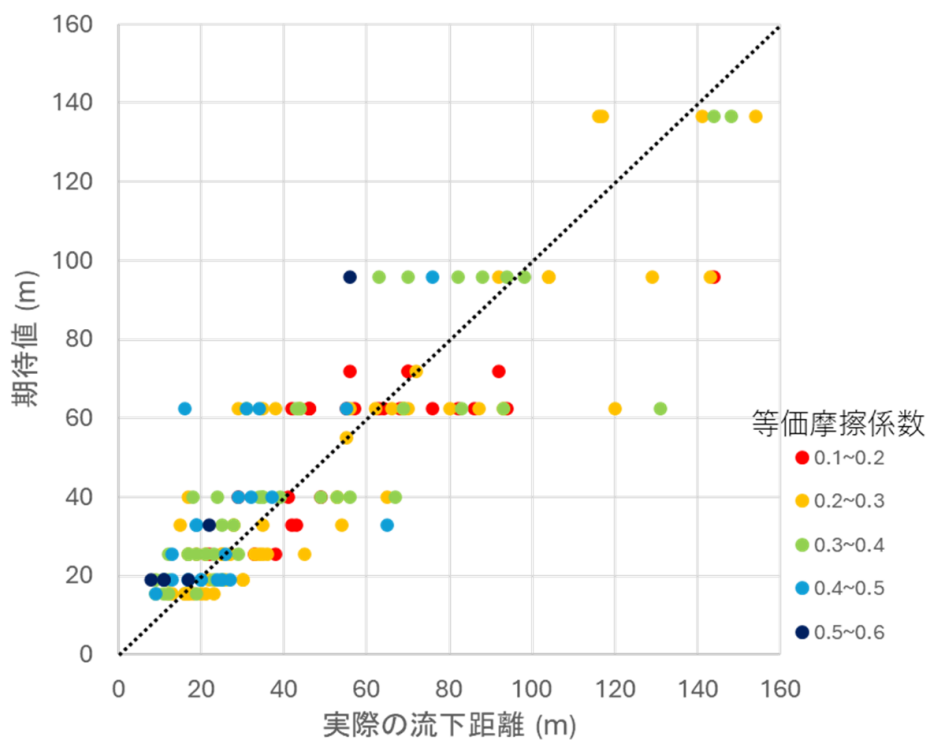


図11 実際の流下距離と、集水域を対象にした回帰木による期待値の関係

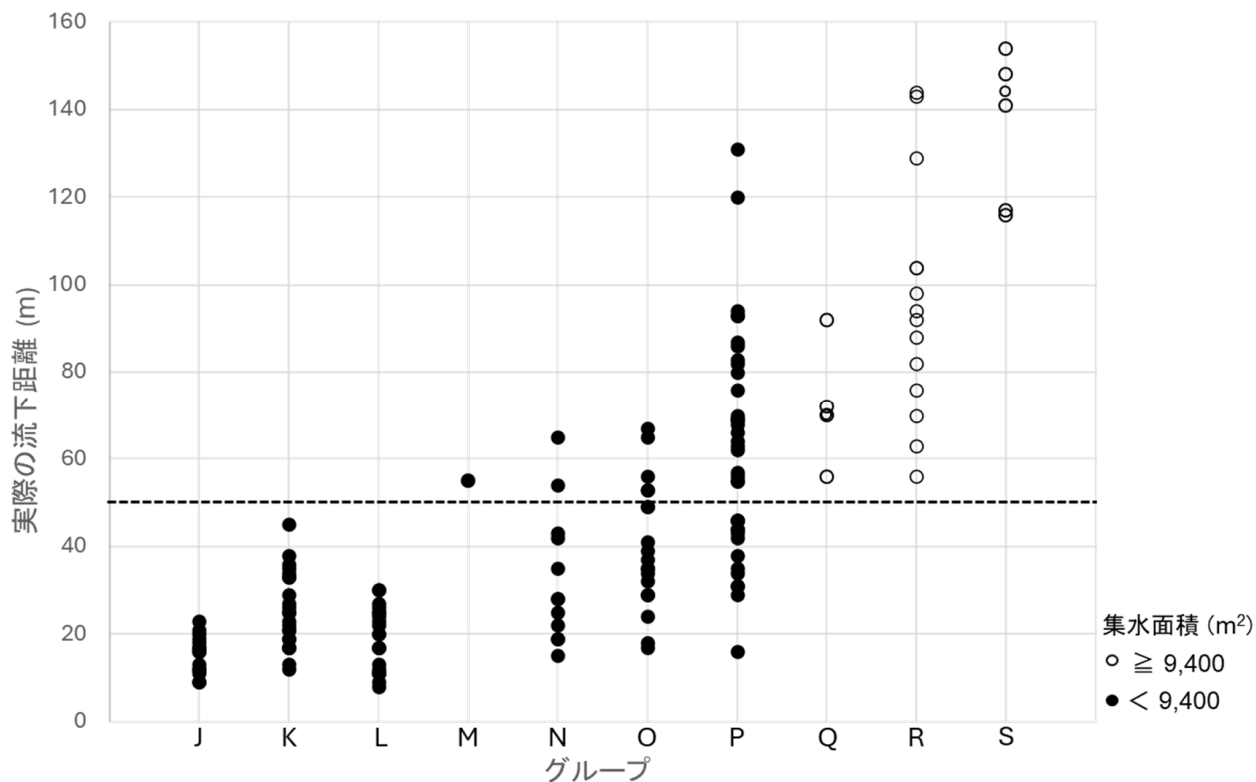


図12 集水域を対象にした回帰木における、各グループに属する斜面からの実際の流下距離

表2 集水域を対象にした回帰木で分類された各グループにおける崩土の流下距離

グループ	箇所数	流下距離 (m)			実際の流下距離 > 50 mの箇所の割合
		予測値	実測最大値	実測最小値	
J	15	16	23	9	0%
K	23	26	45	12	0%
L	21	19	30	8	0%
M	1	-	-	-	-
N	12	33	65	15	17%
O	19	40	67	17	26%
P	38	62	131	16	63%
Q	5	72	92	56	100%
R	14	96	144	56	100%
S	6	137	154	116	100%

グループPでは、崩土の流下域が田畑であれば、グループQ, R, Sと同程度まで崩土が長距離流下するケースもあったことが分かった。ただし、このグループの予測値は最小値から最大値まで幅が大きい。この値の分布は田畑における摩擦特性や土壌水分量の違いを反映している可能性があるが、それらの条件については現有の航空写真や地震当時の現地写真からは判断できない。また、土地利用が田畑以外であれば、集水面積が3,400 m²を超えても、2,500から3,400 m²のグループと崩土の流下距離に違いがなかったことも分かった (N, O)。

一方、集水面積が2,500 m²未満のグループ (J, K, L) では、予測される流下距離は50 mを超えることはなかった。最も短い流下距離が予測されたのは、上側および下側の両勾配が小さいグループJであった。なお、斜面高はこの回帰木には出現せず、指標が流下距離に与える影響は小さかったことが示唆された。

(3) 崩壊域と集水域を対象にした回帰木の検討

崩壊域および集水域を対象とした2つの回帰木分析 (図7, 10) では、流下距離に影響を与える因子の重要度が異なる結果となった。崩壊とその流下プロセスの観点から見ると、崩壊域を対象とした回帰木には、崩壊からの土砂生産量に関する因子 (崩壊面積)、斜面の位置エネルギー (崩壊高)、地震による因子 (震源断層からの距離)、斜面の水分含有量に関する因子 (集水面積, TWI) が含まれ、説明因子とその交互作用が流下距離に与える影響を適切に表現していたと言える。一方、集水域を対象とした回帰木では、崩壊域の直接的な情報は含まれていないものの、崩壊面積と線形関係にある集水面積が最も重要な因子として特定された。この回帰木において震源断層からの距離やTWIが影響因子として出現しなかったのは、集水面積が流下距離に対してかなり強い影響力を持っていたことを示唆している。

なお、斜面における水分量の指標として、どちらの回帰木においても流下距離への影響が低かったのは、曲率であった。田近ら²⁾は、胆振東部地震において、凹型斜面から斜面が長距離流下する傾向があったことを示しており、この回帰木の結果と反する。これは、本研究において曲率を求めるにあたって使用したデータの解像度が粗く、適切に斜面のくぼみが反映されていないことが理由として考えられる。また、一帯では風化の進んだ保水性の高い火山灰層の滑落が多数報告されているものの³⁾、本研究で用いた土壌分類区分では、各斜面における水分含有量の違いを十分に反映できなかったことも考えられる。どちらの因子においても現実をより反映したデータを用いることができれば、回帰木による分類の精度も向上する可能性がある。

6. 回帰木モデルによる期待値と等価摩擦係数

図8, 図11から, 概ね, 実際の崩土の流下距離を本研究の方法により推定することは可能と考えられる. より詳細にみると, これらの図の赤丸(等価摩擦係数が0.1~0.2), 黄色丸(等価摩擦係数が0.2~0.3))の領域については, 見かけの動摩擦係数である等価摩擦係数が実際の流下距離が期待値より大きくなる事例が多い(表3). ちなみに, これまでの滑動型表層崩壊による崩土の運動に関する研究結果³⁾から考察すると, そのメカニズムは下記のように要約される.

- ①地震動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.
- ②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.
- ③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.
- ④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.
- ⑤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常に分散したコロイド状態となり, 泥水膜流となる. ⇒泥水膜流のシアニング現象により, その粘性抵抗が減少し, 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.
- ⑥以上のプロセスを経て, 動摩擦係数のさらなる低下が促進され, 崩土は長距離, 滑動できると考えられる.

前述のとおり, 本研究では, 崩壊面積, 集水面積が重要な因子であり, 平均勾配と土地利用が重要な修飾因子であると判断されるが, 等価摩擦係数が0.3以下の事例については, 今後の推定精度の向上のためにも新たな因子として, 中・小地震動時のすべり面境界付近での泥水膜流による動摩擦係数の導入が必要と考えられる. 労力は相応にかかるが, 対象とする現地の類型化された山腹斜面のいくつかについて, すべり面近傍のテフラ層(En-a層以外にもTa-d層)から土砂ブロックを不攪乱で採取し, 加振時での引張試験によって動摩擦係数を求める必要がある.

表3 等価摩擦係数の範囲ごとの崩土の流下距離と回帰木モデルによる期待値の比較

等価摩擦係数	斜面数	崩壊域対象		集水域対象	
		流下距離≥期待値	流下距離<期待値	流下距離≥期待値	流下距離<期待値
0.1 - 0.2	26	16	10	15	11
0.2 - 0.3	57	33	24	38	19
0.3 - 0.4	42	16	26	15	27
0.4 - 0.5	23	6	17	7	16
0.5 - 0.6	6	2	4	0	6

7. まとめ

本研究では、胆振東部地震で発生した斜面崩壊について、崩壊域と集水域を対象に、崩土の流下距離を応答変数とする回帰木を2通り作成した。そして、流下距離推定に必要な因子とその条件を検討した。結果を下記にまとめる。

(1) 崩壊域を対象とした回帰木

- ・ 154斜面が9通りの期待値で表されるグループに分類された。推定精度は11.4 mであった。
- ・ 崩土の流下距離に対して崩壊面積が最も重要な影響因子として特定された。面積が3,510 m²以上であれば、土砂災害警戒区域の上限である50 m以上を超える確率は高かった。
- ・ さらに、震源断層からの距離（8.2 km以内）と集水面積（13,500 m²以上）が重要な二次的要因であり、この条件をみたす場合の崩土は100 m以上流下した。
- ・ 回帰木構造は、崩壊プロセスを妥当に表現していると考えられた。

(2) 集水域を対象とした回帰木

- ・ 154斜面が10通りの期待値で表されるグループに分類された。推定精度は12.2 mであり、崩壊域を対象とした回帰木と大きな差は見られなかった。
- ・ 集水面積が最も影響力の大きい因子であり、9,400 m²以上であれば、流下距離は土砂災害警戒区域の上限である50 m以上を超える。
- ・ 特に、集水面積が14,800 m²以上であれば、崩土は110 m以上流下する。
- ・ 平均勾配と土地利用は重要な修飾因子であった。
- ・ 以上から、崩壊が発生していない斜面においても、集水面積を用いることにより、崩土の流下距離が推定できる可能性が示唆された。

(3) 等価摩擦係数について

- ・ 等価摩擦係数が0.1～0.2、及び0.2～0.3の領域については、見かけの動摩擦係数である等価摩擦係数が実際の流下距離が期待値より大きくなる事例が多い。
- ・ 推定精度の向上のためには、新たな因子として、中・小地震動時のすべり面境界付近での泥水膜流による動摩擦係数の導入が必要と考えられる。

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。データの解析の実施にあたっては、北海道大学の富安蓮君の協力を得た。本研究は、令和6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) Corominas, J. : The angle of reach as a mobility index for small and large landslides, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, pp. 260-271, 1996.
- 2) 田近淳・千木良雅弘・小池明夫・金秀俊・石丸聡・雨宮和夫：2018年北海道胆振東部地震によるテフラ層すべりと人的被害，*日本地すべり学会誌*, Vol.57, No.6, pp.15-22, 2020.
- 3) 雨宮和夫：北海道胆振東部地震による土（岩屑）の高速地すべり機構と安定度，平成 31 年度日本地すべり学会北海道支部研究発表会予稿集, pp.39-42, 2019.
- 4) Legros, F.: The mobility of long-runout landslides. *Engineering Geology*, Vol.63 (3-4), pp.301-331, 2002.
- 5) Giarola, A., Meisina, C., Tarolli, P., Zucca, F., Galve, J.P. and Bordoni, M.: A data-driven method for the

estimation of shallow landslide runout, *Catena*, Vol. 234, 107573, 2023. Corominas, J. : The angle of reach as a mobility index for small and large landslides, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, pp. 260–271, 1996.

- 6) Ju, L.Y., Xia, T., He, J., Wang, H.J. and Zhang, L.M.: Predicting landslide runout paths using terrain matching-targeted machine learning, *Engineering Geology*, Vol.311, 106902, 2022.
- 7) Melo, R., Zêzere, J.L., Rocha, J. and Oliveira, S.C.: Combining data-driven models to assess susceptibility of shallow slides failure and run-out. *Landslides*, Vol.16, pp. 2259–2276, 2019.
- 8) 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/
- 9) 「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.
- 10) 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>
- 11) Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Rossi, M., and Valigi, D.: Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol.279 (3–4), pp. 222–229, 2009.