

5.2 リアルタイム計測情報を活用した土砂災害危険度情報の作成技術の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 26

担当チーム：土砂管理研究グループ（火山・土石流チーム）

研究担当者：石塚忠範、清水孝一、木下篤彦、高原晃宙

【要旨】

現行の土砂災害警戒情報には、①実績の乏しい地域・現象に対して十分な精度が得られていない可能性が高い。②地形・地質等の違いによる影響が十分加味されていない。③降雨のみを指標としているため、切迫性が伝わりにくい。④市町村単位の情報であるため、避難の対象となる地域が絞り込めない等の課題が指摘されており、土砂災害の警戒避難に資する危険度情報作成技術の確立が急務となっている。

本研究はこうした状況の解決を目標として、次のような目的を設定した。目的 1：豪雨による土砂災害発生時刻予測モデルの構築、目的 2：斜面および溪流の監視情報を活用した警戒避難基準設定手法の構築、目的 3：豪雨による土砂災害に対するきめ細かな危険度情報の作成方法の提案を行う。

研究実施の結果、目的 1 に対し、山地の開析程度に着目しすることで、地形区分によって崩壊形態が異なることが明らかとなった。また、降雨の継続に伴う地下水位の上昇過程を取り入れた表層崩壊の発生危険度の評価手法（idH-SLIDER 法）を開発し、空振り率を抑えた危険度情報を作成できることを確認した。目的 2 に対しては、土砂移動と明瞭な関係をもつ水文情報（濁度・流量）を確認するとともに、溪流毎に土砂移動が発生した時刻を記録する安価な土砂移動時刻ロガーを開発した。また、広域に土砂災害の発生情報を検知するため、地震計データを用いた大規模土砂移動の検知手法を開発した。さらに、目的 3 に対しては、モデル地区を設定し、区域内の災害危険箇所や動線、避難所などの基盤情報を元にマルチエージェントシステムによる避難所要時間をシミュレーションし、避難開始時間や地区の土砂災害に対する避難に関する問題点を明確化できることを確認した。

キーワード：表層崩壊危険度評価、idH-SLIDER 法、山地の開析程度、マルチエージェントシステム、警戒避難

1. はじめに

平成 20 年 3 月より全国で都道府県の砂防部局と気象台が連携し、豪雨による土砂災害に対する警戒避難体制の構築支援のために、「土砂災害警戒情報」の発表が行われている。しかし、現行の土砂災害警戒情報は、①実績の乏しい地域・現象に対して精度が低い可能性が高い、②地形・地質等の違いによる影響が十分に加味されていない、③降雨のみを指標としているため、切迫性が伝わりにくい、④市町村単位の情報であるため、避難の対象地域が絞り込めない、などの課題が指摘されている。実際、土砂災害警戒情報の発表が進められてきているにも関わらず、土砂災害発生前に警戒情報が発表されていない事例も多く、土砂災害発生時に避難が完了していないことが多い。そのため、①～④の課題を解決する土砂災害に対する警戒避難に資するきめ細かい危険度情報作成技術の確立が急務である。

このうち①に関して、時系列で斜面の崩壊危険度評

価が可能な idH-SLIDER 法を開発し検証を実施した¹⁾。

②に関して、地形区分に着目し、開析状況に応じて崩壊の形態が異なることを明らかにした²⁾。また、それら開析状況に合わせて、斜面の自動分割手法について検討した³⁾。そして、①や③に関しては、斜面の危険度評価手法の精度向上や崩壊検知事例の蓄積を目的とした安価で簡易な機器（土砂移動時刻ロガー）を開発し現地検証を実施した⁴⁾。

③に関しては、高感度な振動センサのデータを用いて降雨以外の情報でも準リアルタイムで深層崩壊等の大規模な土砂移動現象の発生情報を把握することを目的とし、過去の深層崩壊や大規模な土石流等が発生したときの地盤振動の特徴を整理した^{5) 6)}。

また、④に関して、マルチエージェントモデルを用いて避難対象者となる住民の避難行動を把握した⁷⁾。

2. 簡易的な表層崩壊発生時刻予測手法の開発

2.1. 背景と目的

平成 21 年に当チームが公表した「表層崩壊に起因する土石流の発生危険度評価マニュアル (案)」⁸⁾ (以下、「表層崩壊発生マニュアル」と呼ぶ) では、事業優先度、監視箇所、対策工設置箇所の検討に活用できる表層崩壊に起因する土石流の発生危険度評価手法 (以下、「H-SLIDER 法」と呼ぶ) が示されている。この H-SLIDER 法は、入力条件を現地調査によって把握できるもののみに絞り、地下水位を定常と仮定した分布型力学モデルである。一方、既往研究⁹⁾では、定常降雨強度条件を仮定し、無限長斜面の安定解析と、簡易な水文モデルで、地形条件から場所ごとの崩壊発生降雨条件を降雨継続時間—平均降雨強度の関係、いわゆる id-threshold^{例えば 10), 11)}として算出する手法を提案している。そこで、土層厚に実際の空間分布を用いればある程度精度よく表層崩壊の相対的な危険度の評価が可能であるとの指摘¹²⁾に従い、H-SLIDER 法と既往検討⁹⁾の手法を組み合わせることにより、比較的簡易な調査のみで現行の土砂災害警戒情報に用いられている 1km メッシュごとの CL よりもきめ細かな単位で崩壊が発生する降雨条件の予測を行うことが期待できる。

そこで、「表層崩壊発生マニュアル」で用いられている H-SLIDER 法へ、既に定式化されている一定降雨強度条件下の地下水上昇過程の式⁹⁾を取り入れた方法¹³⁾を用いて、降雨強度と継続時間で求まる崩壊発生限界降雨強度を 5m メッシュで算出した。その上で、平成 21 年の災害時のハイエトグラフ及び崩壊箇所、時刻を用いて同手法による崩壊発生時刻算出の可能性を検討した。

2.2. モデル

H-SLIDER 法は、無限長斜面安定解析の地下水位について、上流の降雨強度と地下水の流速が平衡状態にあり、常に一定と仮定したモデル¹⁴⁾である。それに対して、本研究では、一定降雨強度条件下における降雨の継続に伴う地下水位の上昇⁹⁾を取り入れる。本稿では、従来の H-SLIDER 法が、地下水位が定常状態に至った場合を仮定しており、降雨時間との関係から崩壊発生時刻の予測ができなかった点について改良を検討したものである。すなわち水文過程を用いた崩壊発生の再現⁹⁾ではなく、そこから得られる地下水深の発生の有無による崩壊発生予測手法の提案を目的としている。

H-SLIDER 法における無限長斜面安定式は (2.1)

式のとおりであり、地下水深と間隙水圧の関係は (2.2) 式のとおりである (図-2.1)。

$$F_s(T) = \frac{c + (\gamma_d D \cos^2 I - u(T)) \tan \phi}{\gamma_d D \cos I \cdot \sin I} \quad (2.1)$$

$$u(T) = h(T) \gamma_w \cos^2 I \quad (2.2)$$

ここに、 $F_s(T)$ は時刻 T における安全率、 c は土の粘着力[kN/m²]、 γ_d は土層全体の単位体積重量[kN/m³]、 γ_w は水の単位体積重量[kN/m³]、 D は土層厚[m]、 I は斜面勾配、 $u(T)$ は時刻 T における間隙水圧[kN/m²]、 ϕ は土の内部摩擦角、 $h(T)$ は時刻 T における地下水深[m]を示す。

これに対して、不飽和領域を考慮した定常降雨に対する地下水深⁹⁾は、

$$h(T) = \frac{ar_s(T)}{K \sin I} \left[1 - \exp \left(-\frac{1+e}{e-eS_r} \frac{K \sin I}{a} t_s \right) \right] + h_0 \cdot \exp \left(-\frac{1+e}{e-eS_r} \frac{K \sin I}{a} t_s \right) \quad (2.3)$$

となる。ここに、 a は単位幅あたりの集水面積[m²/m]、 $r_s(T)$ は時刻 T における降雨強度[m/s]、 K は飽和透水係数[m/s]、 e は間隙比、 S_r は飽和度、 t_s は継続時間[s]、 h_0 は計算初期の地下水深[m]を示す。ここで、不飽和状態の土の単位体積重量 γ [kN/m³]、飽和状態の土の単位体積重量 γ_{sat} [kN/m³]、間隙比 e と飽和度 S_r の関係は次のように定義される。

$$\frac{\gamma}{\gamma_w} = \frac{G_s + eS_r}{1+e} \quad (2.4)$$

$$\frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w} = \frac{G_s + e}{1+e} \quad (2.5)$$

ここに、土粒子の比重 $G_s=2.6$ である。式 (2.1) における γ_d は、 γ 、 γ_{sat} によって次のように示される。

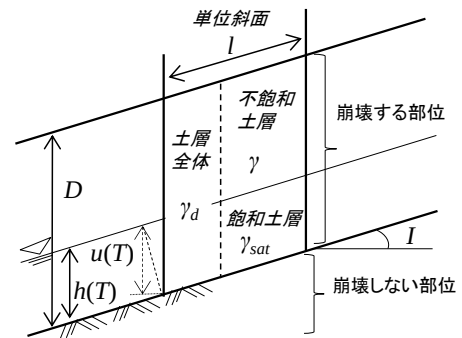


図-2.1 モデルの断面の模式図

$$\gamma_d = \frac{\gamma(D - h(T)) + \gamma_{sat}h(T)}{D} = \frac{\gamma D + (\gamma_{sat} - \gamma)h(T)}{D} \quad (2.6)$$

ここで、(2.2) 式の $u(T)$ と (2.6) 式の γ_d を (2.1) 式に代入すると、

$$F_s(T) = \frac{c + \{(\gamma D + (\gamma_{sat} - \gamma)h(T))\cos^2 I - h(T)\gamma_w \cos^2 I\} \tan \phi}{\{\gamma D + (\gamma_{sat} - \gamma)h(T)\} \cos I \cdot \sin I} \quad (2.7)$$

となる。さらに、(2.7) 式に (2.4)、(2.5) 式から得られる γ 、 γ_{sat} を代入すると、

$$F_s(T) = \frac{c + \left\{ \left(\frac{G_s + eS_r}{1+e} \gamma_w D - \frac{1+eS_r}{1+e} \gamma_w h(T) \right) \cos^2 I \tan \phi \right\}}{\left\{ \frac{G_s + eS_r}{1+e} \gamma_w D + \frac{e - eS_r}{1+e} \gamma_w h(T) \right\} \cos I \cdot \sin I} \quad (2.8)$$

となる。ここで、(2.8) 式において $F_s(T)=1.0$ となる場合の地下水深 $h(T)$ が崩壊発生条件となる地下水深である。(2.8) 式が $F_s(T)=1.0$ の場合の $h(T)$ に、(2.3) 式より $h_0=0$ と仮定した $h(T)$ を代入すると、継続時間 $t_s[s]$ に対する崩壊発生限界降雨強度 $R_c(t_s[m/s])$ (以下、「限界定常降雨強度」) は次のように得られる。

$$R_c(t_s) = M(t) \frac{c(1+e) + (G_s + eS_r)\gamma_w D \cos I (\cos I \tan \phi - \sin I)}{\gamma_w \cos I \{ (e - eS_r) \sin I + (1 + eS_r) \cos I \tan \phi \}} \quad (2.9)$$

ただし

$$M(t) = \frac{K \sin I}{a \left[1 - \exp \left(-\frac{1+e}{e - eS_r} \frac{K \sin I}{a} t_s \right) \right]} \quad (2.10)$$

この結果を、一般的な降雨強度の単位である $[mm/hr]$ に換算すると、崩壊発生条件は、継続時間 $t_h[hr]$ に対する限界降雨強度 $R_c(t_h[mm/hr])$ の関係で示すことができる。以上は、従来の CL の設定に相当するものであり、初期の地下水深 h_0 を含む各パラメータは、その前提条件である。

このようにして得られた限界降雨強度に対して、崩壊発生の評価は、 t_h を 0 から十分に長い時間 (本研究では最大 48 時間) まで、降雨データと同じ 10 分間隔で変化させ、崩壊を予測する時刻 T から t_h 時間前までの降雨強度 $r_h(T, t_h)$ と、限界降雨強度 $R_c(t_h)$ を順に比較し、一度でも降雨強度 $r_h(T, t_h)$ が発生限界降雨強度 $R_c(t_h)$ を上回る場合に、「崩壊発生」として判定した。降雨強度 $r_h(T, t_h)$ は次式で算出する。

$$r_h(T, t_h) = \frac{1}{t_h} \int_{T-t_h}^T r_T dt \quad (2.11)$$

ここに r_T は到達時間内降雨量を示す。このハイトグラフから崩壊発生を判定するプロセスは、従来のスネークラインによる CL の超過・非超過の判定に相当するものである。

このプロセスは、定常過程を想定⁹⁾して得た (2.3)

式に対して、非定常の降雨を想定する時間内の総雨量が保存された定常降雨として判定している。一方で、極端な短時間の集中豪雨や中断を含むような非定常のハイトグラフを対象とする際、定常状態と同様の水位上昇過程をたどるとは限らない。そのため、提案する手法の適用性の評価においては、この仮定の妥当性に対する評価が含まれている。

以下に、具体的な崩壊発生の予測手順を示す。例えば、ある時刻 T_1 において判定する場合、時刻 T_1 の 10 分前から T_1 までの 10 分間雨量 $\div (1/6 \text{ hr})$ を $r_h(T_1, 1/6)$ 、 T_1 の 20 分前から T_1 までの 20 分間雨量 $\div (2/6 \text{ hr})$ を $r_h(T_1, 2/6) \cdots T_1$ の 48 時間前から T_1 までの 48 時間雨量 $\div (48 \text{ hr})$ を $r_h(T_1, 48)$ として、 T_1 における過去 t_h 時間平均降雨強度 $r_h(T_1, t_h)$ を求める。 t_h を短い時間から 10 分、20 分 $\cdots$ と順に変化させて $r_h(T_1, t_h)$ と限界降雨強度 $R_c(t_h)$ を比較し、ひとつでも $r_h(T_1, t_h)$ が $R_c(t_h)$ を上回った場合に時刻 T_1 で崩壊が発生したと判定する。

図-2.2 に示すハイトグラフと限界降雨強度の例では、8:00、10:00 で求めた r_h はいずれも限界降雨強度を下回っているため、崩壊発生とは判定しないが、12:00 では $t_h=6.0 \sim 10 \text{ hr}$ で限界降雨強度を上回っているため、崩壊発生と判定する。

この手法は、その時刻における地下水位を特定しようとするものではなく、崩壊発生条件となる地下水深を上回る水深が発生する可能性の有無を確認するものである。ただし、飽和地表流の発生による降雨流出は考慮されていないため、限界降雨強度に相当する地下水深が土層厚を上回っている場合や、地下水深が土層厚を上回っている状態には適用できない。以下、

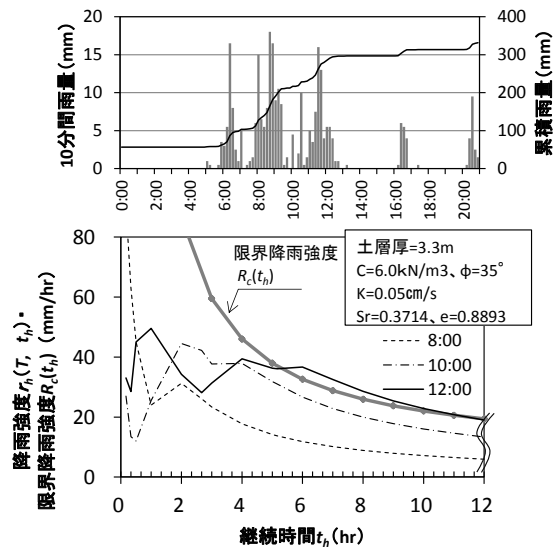


図-2.2 限界降雨強度と継続時間の関係の例

「idH-SLIDER 法」(H-SLIDER for assessing for critical condition rainfall Intensity-Duration threshold) と呼ぶ。

2.3. 検証方法

2.3.1. 検討対象地の概要

本研究では、平成 21 年 7 月 21 日に土石流が発生した山口県防府市剣川流域の右支溪（流域面積 0.064km^2 ）を対象とした（図-2.3）。剣川流域周辺の地質は大部分が深部までマサ化が進んだ防府花崗岩で、平成 21 年 7 月の豪雨時にも、流域で複数の表層崩壊が発生した。この時、崩壊土砂の一部は土石流化し、砂防堰堤が捕捉しきれなかった土砂は下流の国道 262 号へ流出した。この災害後、対象流域で、概ね 15m 間隔で SH 型簡易貫入試験機を用いた貫入試験（140 地点）及び 7 地点 16 試料の土質試料採取がなされている（図-2.4）⁶⁾。検証に用いる降雨データは、気象庁地上アメダス防府地点の 10 分間雨量を採用した（図-2.5）。崩壊発生時刻は、既存の聞き取り調査結果により概ね把握できている。剣川流域については、次のヒアリング結果が記録されている¹⁵⁾。

「8 時 10 分頃、国道 262 号きれいな水が流れていたが、流れが泥水になり小石大石になった。」

「11 時ごろ、剣川から土石流が流れ出し、国道の路面より 1.0m ぐらいの高さで流れていた。」

「国道に水が流れだし、一気に赤い色の水が流れ、その後土石流がごとに音を立てて流れた。」

この記述では、8 時過ぎにはすでに予兆的な水の濁り等が見られているため、このころから流域内のどこかで崩壊が発生しはじめていた可能性はあるが、11 時以降に土石流の発生が記録されている。近隣他流域等の記録においても、周辺一帯で 11:00～12:00 頃にかけて、斜面崩壊、土石流等に関する現象が確認されている。また、当時国道 262 号で巡回していた県土木職員らによって、12:00 頃に相次いで剣川中流域で土石流発生が目撃されたことが示されている¹⁶⁾。

2.3.2. 計算に用いる地形量およびパラメータ

計算に用いる斜面勾配と集水面積は、「表層崩壊マニュアル」に従って、平成 21 年に撮影された航空レーザ計測データから作成した数値標高モデルを用いて算出した。本検討では、計算はすべて 5m 格子点（以下、「斜面要素」と呼ぶ）の値を用いた。

最初に、現地調査及び既往事例等から再現計算に用いる計算条件を設定し、この条件を基本となる計算条件とした。それに対して、現地採取資料から得られた結果の標準偏差をもとに、感度分析に用いる計算条件

を設定した。感度分析は、基本となる計算条件に対して、土の粘着力、土の内部摩擦角、飽和透水係数、表層土層厚について標準偏差の範囲で上下位のケースを設定した。



図-2.3 研究対象地

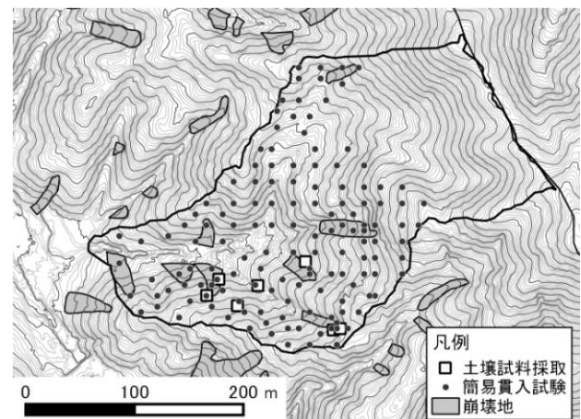


図-2.4 簡易貫入試験及び土質試験実施箇所

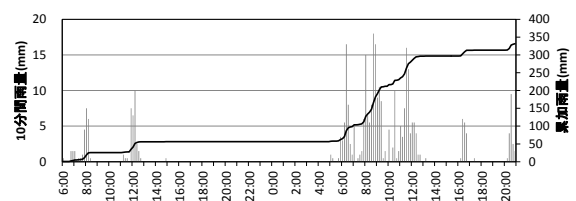


図-2.5 平成 21 年 7 月 21 日のハイエトグラフ

表-2.1 採用したパラメータ

	K	0.05	cm/s
土の粘着力	c	6.00	kN/m ²
土の内部摩擦角	ϕ	35.0	°
土層の単位体積重量			
飽和単位体積重量	γ_{sat}	18.1	kN/m ³
湿潤単位体積重量	γ	15.2	kN/m ³
飽和度	S_r	0.3714	
間隙比	e	0.8893	
水の単位体積重量	γ_w	9.80	kN/m ³

基本となる計算条件は、表-2.1のように設定した。表層土層厚は、簡易観入試験結果¹²⁾から N_d 値が 10 以下の層を土層とし、斜面要素毎の土層厚を Kriging 法により内挿補完して求めた (図-2.4)。なお、崩壊跡地については、溪床堆積物調査と災害前後の航空レーザ測量データ (以下、「LP」とする) の差分から推定した崩壊・洗掘深を考慮して崩壊前土層厚を推定した。計算上必要となる飽和度、間隙比は、湿潤状態、飽和状態の土の単位体積重量から間隙率を逆算して求めた。湿潤単位体積重量、飽和単位体積重量は土質試験結果の平均値を採用した。

飽和透水係数については、現地採取試料の透水試験結果と現地で計測される浸透能の値は 1~2 オーダ近く異なることがよく知られている^{17,18)}。そのため、広島西部山系で流量観測データから求めた等価飽和透水係数⁹⁾を採用した。

土の粘着力は、対象流域内の斜面要素が不飽和時 (地下水深=0) に安全率=1.0 以上となる最小の土質定数を逆推定したところ、 $6.5[\text{kN/m}^2]$ が得られた。ただし、この条件で再現計算を実施すると、崩壊判定要素は 4 要素と少なく、後述する的中率が 100% でカバー率は 40% 未満 (3/8) であった。このため、得られた値は、実際よりもやや大きい (強い) 値であると考え、この値を 0.1 刻みで下げていき、的中率・カバー率が最大となる値 $c=6.0[\text{kN/m}^2]$ を採用した。土の内部摩擦角は、土質試験結果を参考に一般値を採用した。

次に、感度分析に用いる計算条件は、現地調査結果 (表-2.2) の変動係数を基本となるケースの値に乘じ、感度分析に用いる標準偏差として設定した。

$$CV = \frac{SD_r}{E_r} \quad (2.12)$$

$$SD_e = E \cdot CV \quad (2.13)$$

ここに、 E_r 、 SD_r 、 CV はそれぞれ現地採取試料の平均値、標準偏差、変動係数を示し、 E は基本となるケースの値、 SD_e は感度分析に用いる標準偏差である。変化させるパラメータは、基本となる計算条件に対して土標準偏差のケースを上位ケース、下位ケースとし、 $\pm 0.5 \times$ 標準偏差のケースを上位中間ケース、下位中間ケースと呼ぶ。この時、変化させないパラメータは基本となるケースの値を採用した。これは、それぞれのパラメータの面的な分布が標準正規分布に従うとすると、母集団の約 68% の範囲を網羅したケース設定である。なお、下位ケースが 0 を下回った場合は 0 を最下位ケースとし、飽和透水係数については、常用対数値

に対して設定した。

また、土層厚については、全要素の平均値 (内挿値) で一律とした平均ケースと、上位ケース、上位中間ケースについて実施した。平均ケースにおいて、1 要素のみしか崩壊判定要素が発生しなかったことから、下位ケースについては計算を実施していない。設定した感度分析ケースを表-2.3 に示す。

2.3.3. 計算結果の評価方法

実際に平成 21 年 7 月 21 日の豪雨で発生した崩壊地の状況と、idH-SLIDER 法による崩壊発生予測箇所及び発生時刻の予測結果を比較した。対象範囲内には 8

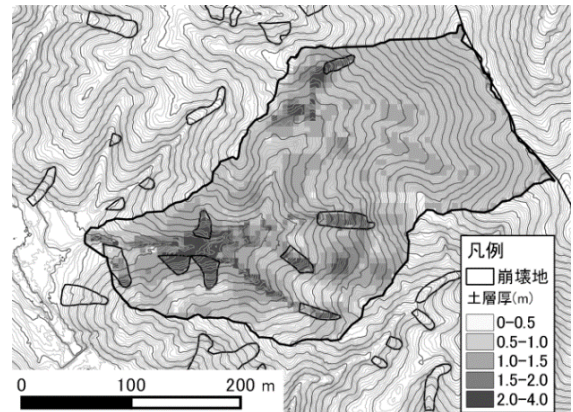


図-2.6 土層厚分布

表-2.2 土質試験結果

	試料数	平均値 E_r	標準偏差 SD_r	変動係数 CV
土の粘着力 $[\text{kN/m}^2]$	16	3.08	3.50	1.14
土の内部摩擦角 $[\text{°}]$	16	33.79	5.81	0.17
飽和透水係数 $[\text{cm/s}]$ (常用対数値: Log_{10})	14	-3.028	0.510	-0.168

表-2.3 感度分析ケース

	上位 $E+SD_e$	上位中間 $E+0.5 \cdot SD_e$	下位中間 $E-0.5 \cdot SD_e$	下位 $E-SD_e$
土の粘着力 $[\text{kN/m}^2]$	12.81	9.41	2.59	0.00
土の内部摩擦角 $[\text{°}]$	41.02	38.01	31.99	28.98
飽和透水係数 $[\text{cm/s}]$	0.0828	0.0644	0.0388	0.0302

表-2.4 斜面要素の分割表

斜面要素		現地の状況	
		崩壊地	非崩壊地
計算結果	崩壊発生と判定 【崩壊判定要素】	G_1	G_3
	崩壊発生と判定されない	G_2	G_4
崩壊箇所		現地の状況 崩壊地	
計算結果	崩壊発生と判定された要素を含む	PG_1	
	崩壊発生と判定された要素を含まない	PG_2	

箇所崩壊地があり、流域全体の斜面要素 2,565 要素に対し、崩壊地に含まれる崩壊要素は 118 要素である。再現性の検証に用いる指標は適中率、カバー率とした（式 (2.14)、(2.15)）。

$$Pv = \frac{G_1}{G_1 + G_3} \quad (2.14)$$

$$Cv = \frac{PG_1}{PG_1 + PG_2} \quad (2.15)$$

ここに、 Pv は適中率、 Cv はカバー率、 $G_1 \sim G_4$ は計算グリッドの数を示し、 PG_1 、 PG_2 は崩壊箇所（ポリゴン）を示す。また、それぞれの定義を表-2.4 の分割表に示す。適中率は、崩壊判定要素を母集団とし、カバー率については、崩壊箇所を母集団としている。本研究で対象とする斜面崩壊は 1 箇所あたり 240～650m²であり、崩壊地内部に複数の斜面要素を含んでいる。斜面崩壊は、崩壊地内部の全斜面要素が同時に不安定化して移動を始めるとは限らず、内部の一部分が不安定化して移動をはじめると、その周辺も引っ張られたり、押されたりして移動を開始し、最終的な崩壊形状に至る場合もある。この場合、モデル側から見ると、このモデルによって崩壊が予測できたのは最初の 1 要素のみで、それ以外はモデルによって予測できたとは言い難い。しかし、反対に実際の現象から見た場合、崩壊箇所内部の 1 要素でも崩壊が予測できれば、その崩壊は予測できたと考えることもできる。そのため、この両方の見方から予測精度を比較するため、適中率とカバー率の 2 つの母集団の異なる指標を用いて評価する。

提案する idH-SLIDER 法は、ハイトグラフと比較することで、崩壊が予測される要素が時々刻々と変化し、これらの比較指標も時間とともに変化していくのが特徴である。そのため、これらの指標の時間変化にも着目して比較する。なお、計算初期段階において地下水深が無い状態でも安全率が 1.0 以上得られない「常に不安定」な斜面と、降雨強度 $r_n(T, t_n)$ が限界降雨強度を $R(t_n)$ を上回った場合に、地下水深が土層厚を上回る斜面は、崩壊判定要素とはみなさない。

2.4. 結果

2.4.1. 位置の検証—実際の崩壊箇所との比較

計算結果を図-2.7～図-2.9 に示す。図-2.7 には、最も崩壊判定要素数が多く、適中率・カバー率の高い 12:10 の崩壊判定要素の分布を示す。対象流域内に存在する 8 箇所の崩壊箇所に対して、2 箇所はひとつも崩壊判定要素が含まれなかったが、6 箇所については、崩壊判定要素が存在し、崩壊箇所以外での崩壊判定要

素は 1 要素のみであった。

図-2.8 では、降雨開始直後から終了までの時系列に沿って、適中率、カバー率、崩壊判定要素数を比較する。崩壊判定要素は、降り始めから 21 日 12:10 までは増加傾向にあり、12:50 以降減少傾向に転じている。流域内で崩壊が多発した時間帯は、増加率の大き

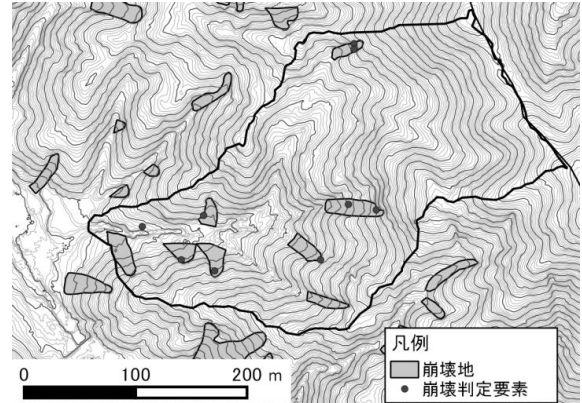


図-2.7 平成 21 年 7 月 21 日の再現計算 (idH-SLIDER 法)

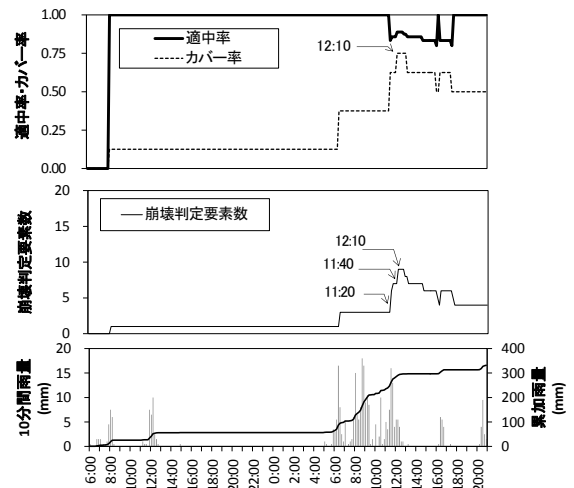


図-2.8 比較指標の時間変化 (idH-SLIDER)

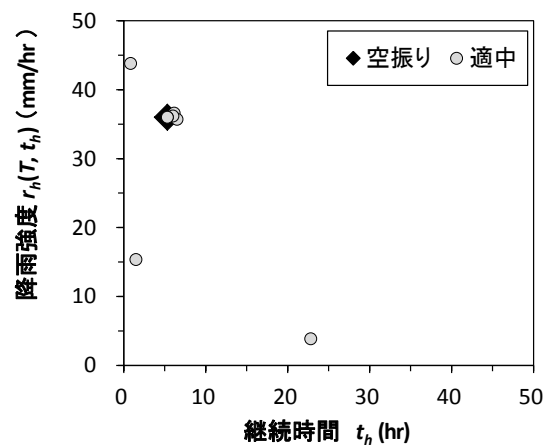


図-2.9 崩壊判定要素における降雨強度と継続時間

い 11:20~12:10 の時間帯と推定される。また、カバー率が降雨の時系列に沿って増加・減少するのに対して、適中率が最初は高く、降雨後半で減少し、再び上昇する。これは、崩壊判定要素が増加すると、適中する要素とともに空振りの要素が出現するため、適中率としては減少するからである。これらから、最も多くの斜面要素で崩壊発生が予測された時間帯であり、かつ適中率、カバー率ともに高い値を示した時刻は 12:10 である。この時、適中率 0.89、カバー率 0.75 を示し、良好な予測結果だといえる。

図-2.9 には、崩壊判定要素について、降雨強度 $r_h(T, t_h)$ が $R_c(t_h)$ を上回り、崩壊と判定された最初の時刻における最も短い t_h と $r_h(T, t_h)$ の関係を示している。最も短い t_h としたのは、評価する時刻 T からみて、直前に記録された雨量がトリガーとなったことを評価するためである。また、図中の「適中」とは時刻を問わず適中した要素である。空振り要素と適中要素の間に差は見られないものの、5~6 時間以内 35mm/h 以上の強雨の継続が条件となった要素が多いが、その他の決定条件による要素も 3 要素あった。同一流域内に同様のハイトグラフを与えても、各要素は地形条件、土質条件による異なる限界降雨強度によって評価された予測結果であり、本ケースでは、大部分が 5~6 時間雨量を条件として崩壊が発生すると予測されたことを示している。

2.4.2. 時刻の検証—聞き取り調査結果との比較

idH-SLIDER 法の特徴は、それぞれの斜面要素の崩壊判定時刻が明らかになることである。しかし、実際には山地で発生する斜面崩壊の発生時刻が正確に把握できる場合はほとんどない。それと同時に、本モデルを活用する場合においても、1 要素の変位が始まる時刻を把握する必要はなく、流域や斜面単位での土砂災害を引き起こすようなまとまった土砂の移動時刻を予測できることが望ましい。図-2.8 によると、11:20~12:10 の 1 時間の間に急激に崩壊判定要素が増加し、最も多くなることから、この時間帯が対象流域における崩壊予測時刻と考える。平成 21 年の災害時の、聞き取り調査^{8,9)}によると、剣川流域内では、午前 8:00 過ぎから何等かの予兆的な現象が確認され、11:00 ごろから 12:00 にかけて土石流の目撃証言が得られている。さらに、この時間帯については、適中率、カバー率の双方が最も高い値を示す時間帯とも一致している。

以上より、平成 21 年に実際に発生した斜面崩壊の位置及び時刻について、概ね実態に近い結果が得られ

たとえる。

2.5. 考察

2.5.1. H-SLIDER 法との比較

従来の H-SLIDER 法についても、「表層崩壊マニュアル」における表層崩壊発生危険定常降雨強度 r_c と比較する降雨の継続時間を仮定することで、崩壊発生時刻を予測することが可能である。しかし、H-SLIDER 法は本来斜面要素の相対比較を目的とし、地下水深が定常に至るまでの時間について十分評価できていないため、予測される結果には課題があると考ええる。ここでは idH-SLIDER 法による結果と、従来の H-SLIDER 法による結果を比較し、idH-SLIDER 法による精度向上について考察する。

H-SLIDER 法における r_c は、その定義から idH-SLIDER 法の限界降雨強度 $R_c(t_h)$ について t_h を無限大まで引き延ばした $R_c(\infty)$ と同義である。そのため、idH-SLIDER 法と同様に、 t_h を変化させた $r_h(T, t_h)$ を各要素の r_c と比較すると、大部分の要素で短い t_h の $r_h(T, t_h)$ が r_c を上回ることが明らかである。そこで、以下の手順で時刻ごとの崩壊発生を判定した。

定常状態が形成される時間は斜面要素の地形条件によって様々であるため、 t_h を 3, 6, 12, 18, 24, 30, 36 時間にそれぞれ固定したケースで、適中率、カバー率、崩壊判定要素数の時系列変化を求めた。次に、最も適中率、カバー率が優れていた $t_h=30$ 時間のケースを idH-SLIDER による結果と比較した。

この結果を図-2.10、図-2.11、表-2.5 に示す。

図-2.10 は idH-SLIDER と同様に 12:10 の崩壊分布を示す。また、図-2.12 には、適中率、カバー率の両者の相互の変化について示し、H-SLIDER 法の結果には、 $t_h=30$ 時間以外のいくつかの結果も示した。図-2.10 より、idH-SLIDER では予測できなかった崩壊地内の要素を適中させている一方で、1 要素も適中していない崩壊箇所があり、カバー率が 50%に留まる。また、図-2.11 の時系列変化を見ると、最も適中率・カバー率が高い時刻は 12:10 と idH-SLIDER の結果と同様であるが(表-2.5)、idH-SLIDER では崩壊判定要素数が降雨後半で減少するのに対して、H-SLIDER 法では時間とともに増加する。 $t_h=30$ 時間と長いことから、降雨後半ほど直近 30 時間の雨量が多く、 r_c を超過する崩壊判定要素が増えているためである。図-2.12 より、他の t_h を採用した場合も、短い t_h を採用したケースは空振りが多いために適中率が低く、反対に長い t_h では崩壊判定が少なくカバー率が低くなる傾向がみられる。

以上から、idH-SLIDER 法では、地形条件から限界降雨強度の継続時間が定義されているため、H-SLIDER 法と比較して崩壊実績から適当な t_h を選択するプロセスが不要であり、精度よく崩壊発生位置と時刻を予測することが期待できる。

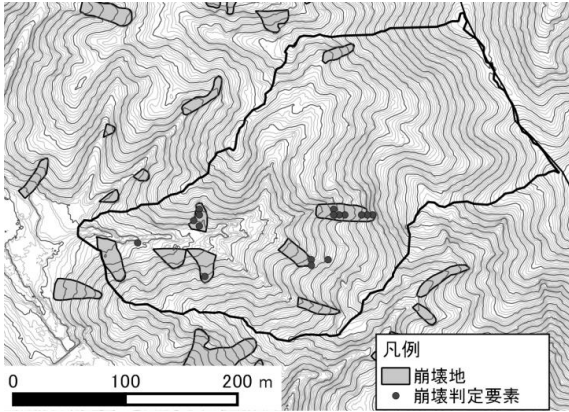


図-2.10 平成21年7月21日の再現計算(H-SLIDER 法)

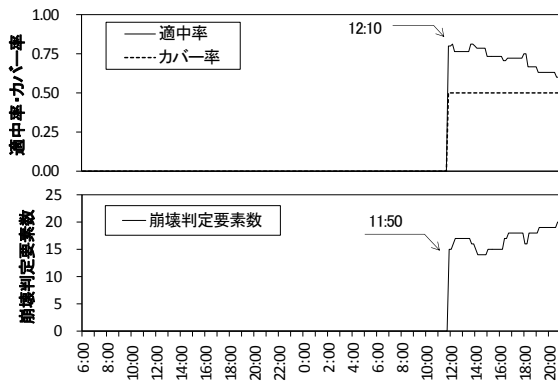


図-2.11 比較指標の変化 (H-SLIDER 法:30 時間雨量)

表-2.5 idH-SLIDER 法と H-SLIDER 法の比較

諸元	idH-SLIDER 法 (12 : 10)	H-SLIDER 法:30hr (12 : 10)
適中率	0.89 (8/9)	0.81 (13/16)
カバー率	0.75 (6/8)	0.50 (4/8)

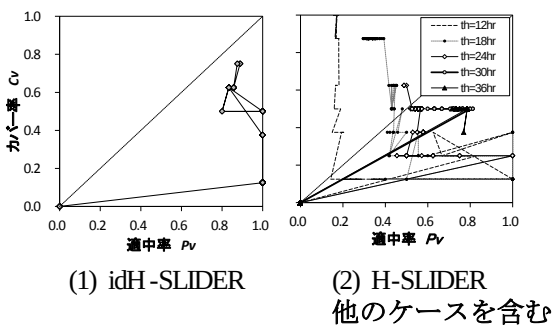


図-2.12 的中率・カバー率の関係

置と時刻を予測することが期待できる。

2.5.2. 土質定数、土層厚に対する不確実性分析

一方で、H-SLIDER 法と同様に、土層厚や土質定数の平面分布の設定方法によって予測精度が低下する問題は解決できていない。そこで、いくつかのパラメータについて、「2.3.2 計算に用いる地形量およびパラメータ」及び表-2.3 に示す条件で感度分析を実施し、パラメータの不確実性による予測精度への影響について比較した。

崩壊判定要素の時間変化を図-2.13 に、適中率、カバー率について図-2.14 に比較した。崩壊発生予測時刻は、「崩壊判定要素の絶対数が多い時刻」とすると、降雨中に崩壊発生の有無を予測しようとしても、一連の降雨終了後でないとわからない。そのため、降雨期

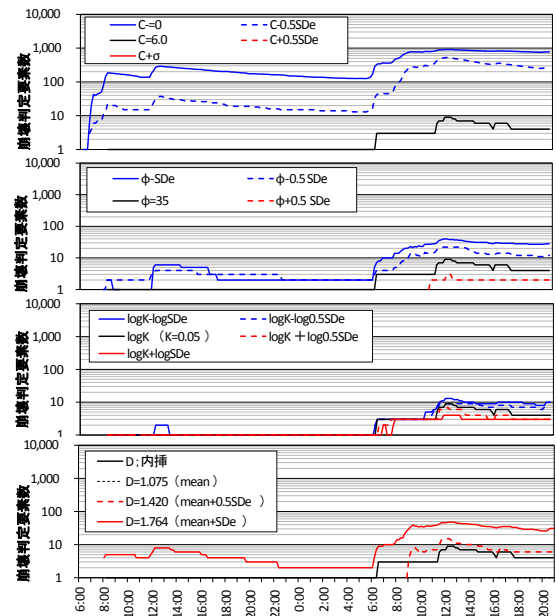


図-2.13 感度分析による崩壊判定要素の時間変化

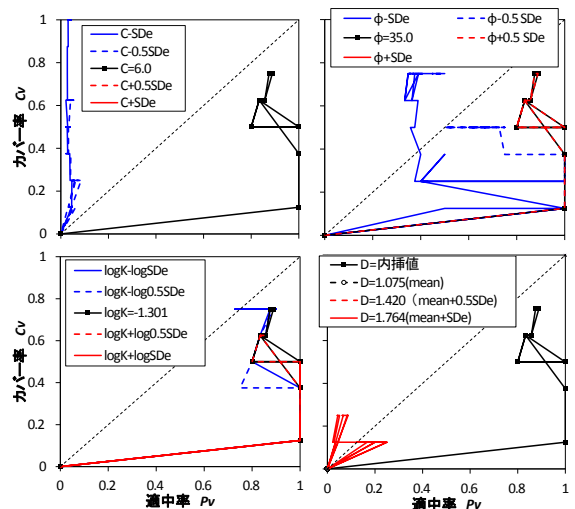


図-2.14 感度分析による比較指標の時間変化

間中の変化も指標とできるよう、「時刻ごとの崩壊判定要素数の増分が最も多く、同数が複数ある場合はより早い時刻」を「崩壊判定要素の増分が多い時刻」として図-2.15に比較した。しかしながらこの場合も、降雨期間中に評価する場合、最も多いかどうかは降雨終了までわからないため、実務利用上の予測時刻の推定方法は今後の課題である。

最初に崩壊判定要素数と適中率・カバー率について、上下位ケースでの結果の差は、土の粘着力、土層厚、内部摩擦角、飽和透水係数の順で差が大きかった。中でも土の粘着力は、上位ケースと下位ケースの差が大きく、上位ケース、上位中間ケースでは崩壊判定要素が発生せず、下位ケース、下位中間ケースでは、最終的には基本とするケースに対し、100倍近い崩壊判定要素が発生した。反対に、常用対数値でケースを設定した飽和透水係数は、上位ケースと下位ケースの間に得られる予測結果にほとんど差は生じなかった。土の内部摩擦角については、その中間程度で崩壊判定要素数が増加するも10倍未満に収まる結果であった。また、土層厚については、内挿値の平均値のケースでは1要素のみしか崩壊判定要素が発生せず、上位ケース、上位中間ケースでは崩壊判定要素が発生するも、適中率、カバー率ともに極めて低い結果しか得られなかった。

崩壊発生時刻について崩壊判定要素数の最大値で判断する場合、図-2.13よりいずれのケースにおいても11:40~12:20が崩壊発生予測時刻となり、パラメータによる差は見られない。また、図-2.15に示す崩壊判定要素数の増分で判断する時刻は、土層厚を変えたケース、土の粘着力を変えた下位ケース、飽和透水係数の上位ケースで変動幅が広い。土の粘着力の下位ケースは粘着力を0とみなした場合であり、土層厚の平均ケースでは崩壊判定要素が1要素のみしかない。

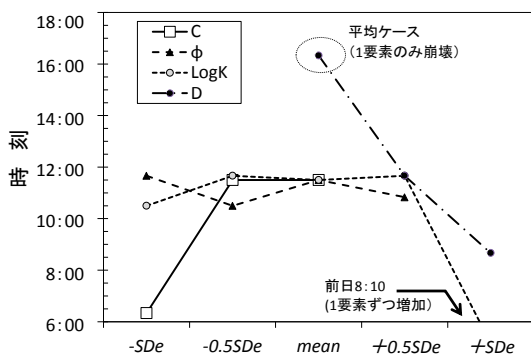


図-2.15 崩壊判定要素の増分から判断した崩壊発生予測時刻と感度分析におけるパラメータの関係

また、飽和透水係数の上位ケースは、崩壊判定要素が1要素ずつしか増加しなかったために、増加する時刻のうち最も早い時刻が抽出された。このような特異的なケースを除くと、最大でも約2時間早まる程度であった。前述のヒアリング結果において、午前8時ごろから水の濁りや土砂の流出など、前兆的な現象が確認されていることから、これらのパラメータの不確実性に伴う発生予測時刻の差は実際の現象の起きる時間帯から大きく外れるものではなく、警戒避難を考える実用上支障はない程度の差ではないかと考える。

これらを勘案すると、いずれも現地調査結果の標準偏差をもとに上下位のケースを設定しているが、最も予測精度へ影響が大きいのは土の粘着力と土層厚である。特に土層厚を一律に設定することは、簡易貫入試験から土層厚を推定した結果と比較すると、多少のカバー率が確保できたとしても、適中率がきわめて低く、空振りが多発することが確認できた。また、土の粘着力を実際よりも低く設定(ゼロに近い値)することで、空振りが急激に増加し、高く設定すると崩壊判定要素が発生せず、評価できない恐れがあることが確認できた。

従って、土の粘着力、土層厚は崩壊判定要素の増減に寄与が大きく、特に慎重な設定が必要といえる。一方で、飽和透水係数については、標準偏差内程度の変動幅であれば、一般値を採用したとしても、前述のような大幅な予測精度の低下にはつながらないことが確認できた。

2.6. まとめと今後の課題

本研究では、H-SLIDER法に対して地下水位の上昇過程をとりいれて、簡易な水文モデルによる崩壊発生時刻予測手法を提案し、平成21年7月に山口県防府市で発生した表層崩壊に適用した。その結果、以下のことが確認された。

- (1) H-SLIDER法と同じパラメータのみによって、観測される降雨データと比較可能な崩壊発生の降雨条件を降雨継続時間と平均降雨強度の関係で得ることができる。
- (2) 土の内部摩擦角と飽和透水係数については、現地採取試料から得られる結果程度の不確実性が伴ったとしても、比較的良い精度で予測できる。
- (3) 土の粘着力、土層厚については、予測結果へ与える影響が大きい。特に、土層厚について一律に設定することは、予測精度が著しく低下する恐れがある。
- (4) 本検討による予測精度は、分布型降雨流出モデ

ルをもつ精緻なモデルと比較しても、適中率、カバー率の両面で高い予測精度をもつことが期待できる。

以上から、本研究で提案する予測手法は、従来用いられてきた手法と比較して、簡便に比較的精度良く崩壊発生への恐れのある降雨条件が取得可能な手法であるといえる。

本研究の検証は、剣川流域のひとつの降雨イベントを対象に実施したのみである。特に、山間地における崩壊発生位置、発生時刻の両方が正確に把握された事例は極めて少なく、本研究の検証データについても、聞き取り調査結果によって推定している。今後、新たな監視手法の開発等により、土砂移動メカニズムの解明とともに正確な発生時刻が記録された事例を積み重ね、検証を進めることが必要である。

3. 花崗岩地域における土層構造と表層崩壊形状に与える山地の開析程度の影響

3.1. 背景と目的

花崗岩地域で表層崩壊が多発した山口県防府市の事例では、災害後に詳細な現地調査が行われており¹⁹⁾、表層崩壊は発生場所及び土層構造により崩壊形態が異なることが報告されているが、崩壊形態を規制する要因についての詳細は明らかになっていない。事前にどのような地区にどのような形態の崩壊が発生するかを明らかにしておくことは防災上重要である。

そこで、筆者らは、崩壊形態及び崩壊要因が規制される要因を明らかにするため、平成 21 年に土砂災害が発生した山口県防府市の災害箇所にて山地の開析状態及び土層構造に注目した調査を行った。

3.2. 対象地域の概要

山口県防府市では、平成 21 年 7 月 20～21 日の総雨量 331mm（アメダス観測地点「防府」）の豪雨により表層崩壊が多発し、それにより土石流被害が発生した。本研究では、この災害により土石流が発生した剣川および阿部谷川流域を対象として検討を行った（図－3.1）。

両溪流の地質は、中粒花崗岩を主体とする白亜系の防府花崗岩体を主体とし、一部に細粒花崗岩がレンズ状に貫入している²⁰⁾。両者の岩相は不均質かつ優白色と類似しており、粒度以外に明瞭な差は認められない。

3.3. 結果と考察

3.3.1. 山地の開析状態と崩壊形態との関係

山地の開析の進行状態に注目し調査地域の地形を区分すると、3 領域に区分出来る。また、図－3.1 の破

線の枠内において崩壊地の土層構造に注目した現地踏査を行った結果、山地の開析状態により多発する崩壊形態が異なっていることが明らかとなった。図－3.2 および以下に、各領域の地形および崩壊地の特徴を示す。

I. 山頂緩斜面領域

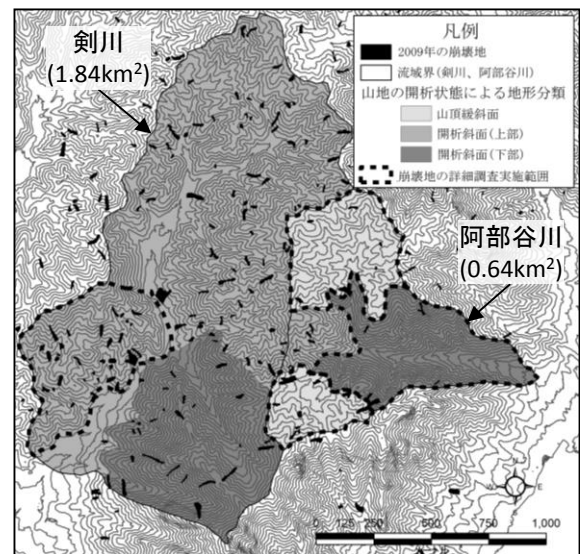
開析作用がまだ直接及んでいないため、形成時期の古い平坦面からなる山頂領域であり、阿部谷川の上流部に分布する。深層風化が進んでおり、風化層が厚く、土層も厚いことが特徴である。崩壊は、0 次谷などの凹地形で多く発生していた。

II. 開析斜面（上部）領域

現在、活発に開析作用が進行中の開析斜面領域であり、剣川の大部分及び阿部谷川の一部に分布する。崩壊が多発している領域であり、崩壊は、集水地形で多く発生していた。

III. 開析斜面（下部）領域

既に開析が進行した領域であり、やせ尾根や尖峰が分布し、斜面には露岩が点在する。阿部谷川の下流及



図－3.1 調査地域周辺の地形図（崩壊地の分布は山口豪雨災害土砂移動実績調査より、溪岸崩壊は除外。）

山地の開析状態		山頂緩斜面	開析斜面(上部)	開析斜面(下部)
斜面勾配のピーク		20～30°	30～40°	35～45°
崩壊地の 特徴	模式図			
	崩壊土層	風化残積土主体	崩壊土及び風化残積土	崩壊土主体
	土層厚	厚い	中間	薄い
	崩壊密度 (個/km²)	66.3	151.3	21.8
コメント		崩壊土砂の下に強風化した岩石がどこどこに露出し、土層下部の岩盤表面付近で崩壊が発生したと推定される。	崩壊面には、主に崩壊土が分布し、一部では風化残積土が認められた。崩壊は、土層内または土層と岩盤の境界で発生したと推定される。	崩壊面には、礫の含有率が多い崩壊土が分布する。土層が厚く堆積している箇所にて、土層と岩盤の境界に沿って崩壊が発生したと推定される。

図－3.2 調査地域で発生した崩壊タイプ(案)

び剣川の下流の一部に分布する。崩壊は、土層厚が薄く、急斜面で発生していた。

斜面傾斜の分布を調べた結果、山頂緩斜面、開析斜面（上部）、開析斜面（下部）の斜面傾斜のピークは、それぞれ、20～30、30～40、35～45°であった（図－3.3）。これは、斜面の開析により緩傾斜部が徐々に削剥されたことを意味しており、調査地の地形発達史を反映している。

以上のように、調査地域では、山地の開析状態により崩壊形態が異なることが分かった。また、崩壊密度にも明瞭な差が認められ、開析斜面（上部）が最も高く、山頂緩斜面が次に高いことが明らかとなった（図－3.2）。

3.3.2. 崩壊形態と斜面上の位置（尾根－河道）との関係

次に、崩壊発生位置の地形的特徴を明らかにするためにArcGISを用いて崩壊地の頭部から尾根までの距離および頭部から河道までの距離を測定した（図－3.4）。なお、ここでの河道は集水面積5000m²以上とした。

図－3.4より、開析斜面（下部）で発生した崩壊は、尾根からの距離が12m以下かつ河道からの距離が30m以上離れた箇所が発生していたことが分かった。次に開析斜面（上部）で発生した崩壊は、バラツキが大きいが、尾根からの距離が10m以上かつ河道からの距離が60m以下の河道に近い箇所に集中して発生していたことが分かった。山頂緩斜面で発生した崩壊は、バラツキが大きく、明瞭な多発地点が認められなかった。この傾向は、平均値にも現れており、開析斜面（下部）は尾根付近、開析斜面（上部）は河道付近、山頂緩斜面はその中間地点で崩壊が発生していることが分かる。河道からの距離が近ければ、当然、集水面積が大きくなることから、開析斜面（上部）は開析斜面（下部）に比較し、集水面積が大きい箇所では崩壊が発生したと言える。

3.3.3. 崩壊形態と斜面上の位置（尾根－河道）との関係

以上の結果から考察される山地の開析状態別の崩壊発生要因を以下に示す。

まず、開析斜面（上部）領域では、山地の大部分に崩積土及び風化残積土が比較的厚く堆積しており、特に集水地形である河道付近には土砂が供給され、厚く堆積している。そのため、土層が厚く、地下水が集中する河道付近で崩壊が多発したと考えられる。

開析斜面（下部）領域では、既に開析が進んだ急傾斜斜面のため土層は非常に薄く、河道付近への土砂の

供給を少ないと想定される。そのため、河道付近では、崩壊が発生するほどの土層が堆積しておらず、崩壊は発生しにくい。一方、尾根付近では、局所的な凹地に落ち残りの土砂が比較的厚く分布しており、その土砂が抜け落ちることにより崩落が発生したと推定される。

山頂緩斜面領域は、山頂付近に位置するため他領域に比較し集水面積は小さいが、深層風化により土層が厚く形成されているため、0次谷などの集水地形で崩壊が発生したと考えられる。花崗岩の風化残積土であるマサ土は脆弱な土層のため、開析斜面（上部）より小さい集水面積でも崩壊が多発したと推定される。

以上のように、開析斜面（上部）および山頂緩斜面では、地下水の影響により発生する「地下水集中型」の崩壊が発生していたと考えられる。一方、開析斜面（下部）領域では地下水の影響が少ない「土砂の抜け落ち型」の崩壊が発生したと想定される。この崩壊要因の違いが、豪雨時の崩壊密度の差に繋がったと推定される。

3.3.4. 崩壊形態により異なる崩壊発生評価手法の適用性

異なる崩壊形態をもつ調査地域の崩壊発生危険度を適切に評価できるか、簡易なパラメータにより広域の表層崩壊発生危険度を評価出来るC-SLIDER法⁸⁾により、検討を行った。

検討には、地形情報として崩壊発生前のLPデータを用い、雨量強度は災害時の最大時間雨量である72.5mm/hrを適用した。また、表－3.1に崩壊発生危険度評価に用いた物性値の一覧を示す。物性値は当該流域で採取した試料について土質試験を行って設定した。飽和透水計数については、同様な花崗岩地域での調査¹²⁾の数値に近似するように調整した数値を採用した。

土層厚は、開析斜面（上部）区域で実施した簡易貫入試験結果と勾配との関係を整理し、斜面勾配を関数とした土層厚モデルを作成し、設定した。今回適用した土層厚モデル式を下記の式（3.1）、（3.2）に示す。

$$h=1.5 \ (0<I\leq 30) \quad (3.1)$$

$$h=-0.044I+2.82 \ (30<I) \quad (3.2)$$

これらの物性値は対数正規分布で近似した確率分布として与えた。また、集水面積の算出には、D-Infinity Flow Direction法を用いた。

表層崩壊発生危険度は、安全率の算出にモンテカルロシミュレーションを適用し、崩壊確率として評価し

た。本検討における崩壊確率とは、計算式により算出される安全率が1.0以下となる場合をカウントし、シミュレーション回数（ここでは、10,000回）で除することにより算出した。

C-SLIDER 法による計算結果を図-3.6 に示す。図-3.6 を見てわかるように、開析斜面（下部）は全域において崩壊確率が高く、赤色を呈している。一方、山頂緩斜面は斜面部においても崩壊確率が低い箇所が多いため青～緑色を呈していることが特徴的である。

開析斜面ごとの定量的な崩壊危険度を明らかにするため、表層崩壊マニュアル⁸⁾にて提案されている崩壊発生面積率（3.4）を算出した（図-3.7）。

$$\alpha = \sum_{j=1}^n A_m p_i \quad (3.3)$$

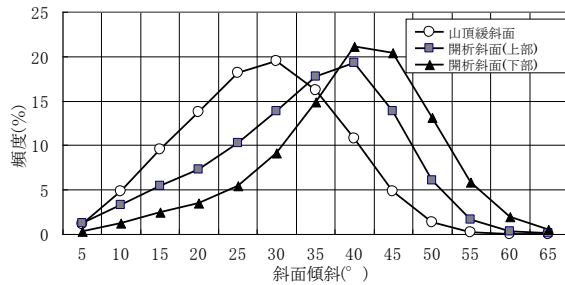


図-3.3 各地域の斜面勾配ヒストグラム

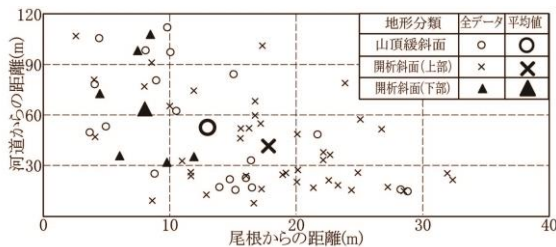


図-3.4 崩壊頭部と尾根・河道との位置関係

表-3.1 崩壊発生危険度評価に用いた物性値の一覧表

パラメータ	平均	標準偏差
内部摩擦角 (°) ϕ	35.56	3.64
粘着力 (kN/m ²) C	3.87	4.31
飽和透水係数 (m/s) K_s	0.000528	0.001053
土層厚 (m) h	1.14	0.81
土の湿潤単位体積重量 (kN/m ³) γ_t	15.44	
土の飽和単位体積重量 (kN/m ³) γ_s	18.37	
水の単位体積重量 (kN/m ³) γ_w	9.8	
降雨強度 (mm/hr) r	10	
モンテカルロシミュレーション回数	10,000	

$$\alpha/A = \sum_{j=1}^n A_m p_i / A \quad (3.4)$$

ここで、 α は崩壊危険面積、 α/A が崩壊危険面積率であり、 A_m はメッシュの面積、 p_i はメッシュ i の崩壊確率（計算実施回数のうち安全率が1.0以下になる確率）、 n は渓流内のメッシュ数、 A は対象斜面の面積である。

図-3.7 より、開析斜面（下部）が最も危険性が高く、続いて、開析斜面（上部）、山頂緩斜面と評価された。この結果は、崩壊実績とは一致しておらず、特に開析斜面（下部）が実績よりも危険度が高いと評価さ

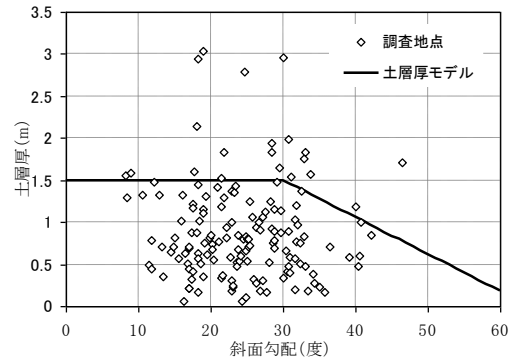


図-3.5 表層土層厚調査結果

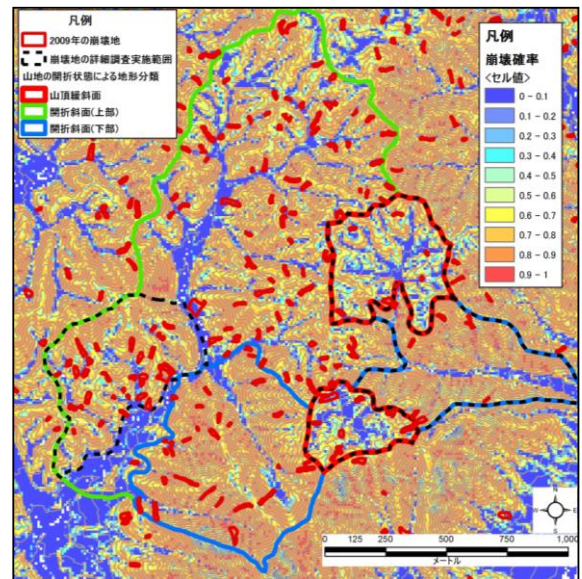


図-3.6 表層崩壊危険度評価の開析結果

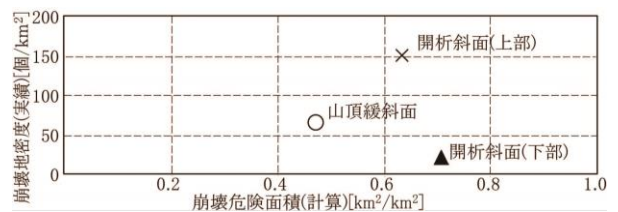


図-3.7 表層崩壊危険度評価手法の適用結果

れた。この理由は、前章で述べたように、崩壊要因が異なることが理由と考えられる。つまり、開析斜面（上部）、山頂緩斜面で発生した崩壊のような「地下水集中型」は危険度を評価できるが、開析斜面（下部）のような「土砂の抜け落ち型」は危険度を適切に評価出来なかったことが原因と考えられる。

3.4. まとめ

平成 21 年に土砂災害が発生した山口県防府市を対象として、崩壊形態と山地の開析状態との関係を明らかにした。崩壊形態は、斜面の開析状態に規制されており、山頂緩斜面及び開析斜面（上部）領域では集水地形において「地下水集中型」の崩壊が発生しており、開析斜面では尾根部付近において「土砂の抜け落ち型」の崩壊が発生していたことを明らかにした。また、この崩壊要因の違いが、崩壊密度に影響を与えていたことを示した。

さらに、表層崩壊危険度評価手法（C-SLIDER 法）を適用した結果、崩壊の危険度は、開析斜面（下部）、開析斜面（上部）、山頂緩斜面の順に高く評価され、開析斜面（下部）領域は実際より危険側に評価された。これは、土層構造及び崩壊メカニズムが異なる斜面では同一の危険度評価手法が適用できないことを示している。

今後、表層崩壊の危険度評価手法及び、その適用範囲条件について、さらに検討を行い、きめ細かい土砂災害危険度情報の開発に反映する予定である。

4. 土砂移動発生時の水文動態分析

4.1. 背景と目的

山地流域における斜面崩壊、堆積物の再移動等を、土砂災害につながる比較的大規模な土砂移動の前兆現象としてとらえると、その発生時における近傍あるいは下流域での流量・土壌水分量・濁度等水文動態の特徴を整理・分析することで、土砂移動発生への警戒に資する情報を得られることが期待できる。そのためには土砂移動が発生した正確な時刻および水文観測のデータセットを蓄積する必要があるが、土砂移動監視機器および水文観測設備の整備にはコスト面における経済的な課題や設置箇所選定等の技術的な課題²¹⁾があり、土砂移動発生時刻と水文観測データがそろった観測事例は数例が報告されている^{例えば 22)・23)・24)}のみであり、十分に蓄積されていない。

上述のような背景のもと、筆者らは安価かつ簡素な土砂移動発生時刻記録装置⁴⁾（呼称「土砂移動時刻ロガー」）を開発し、水文観測が実施されている溪流の溪

床堆積物に設置した。その結果、観測期間中に土砂移動が発生し土砂移動発生時刻と水文観測データを得た。

本研究では、当該土砂移動発生イベントと非発生イベント、既往観測結果²³⁾における水文動態の差異を整理し、濁度と流量の対応関係から土砂移動を覚知する方法について検討した。

4.2. 方法

本研究の対象流域（図-4.1）は、岐阜県高山市奥飛騨温泉郷中尾に位置する山地小溪流で、京都大学防災研究所附属穂高砂防観測所が水文観測を実施している。

流域源頭部の崩壊裸地斜面下部の溪床に崩壊土砂が堆積しており、その再移動を検知することを想定し、土砂移動時刻ロガーを設置した。土砂移動時刻ロガーは、磁石が土砂移動時刻ロガー本体から離れることによって小型 GPS 端末とタイマーを起動させ、衛星から時刻を取得し記録するものである。本研究では、再移動した溪床堆積物が土砂移動時刻ロガーの磁石に接続されたロープを巻きこみ、磁石が土砂移動時刻ロガー本体から離れることでその時刻を記録するような形式で平成 26 年 7 月 6 日に設置した（図-4.2）。

分析対象の水文観測データは、それぞれ 10 分間隔の瞬時値である。平成 26 年 7～8 月の土砂移動発生イベントと既往観測事例²³⁾、ならびに同規模程度以上の流量が観測されたイベントについて、特に明瞭な差異が認められた濁度変化と流量増減過程の対応に関して分析・考察した。

4.3. 結果と考察

4.3.1. 土砂移動の検知状況の整理

図-4.3 は、土砂移動時刻ロガー設置箇所の溪床堆積物が再移動した状況である。設置時よりも河床が低下していること、再移動した堆積物がロープと磁石を巻き込んでいることが確認された。土砂移動時刻ロガーの記録では 7 月 17 日 23 時 51 分に土砂移動を検知しており、同時間帯には降雨が観測されていた。検知後に再度、設置箇所の土砂が移動した可能性はあるが、他に斜面や溪岸の崩壊等の土砂移動はなく、河床に新たな土砂堆積が散見されるのみであったことから、当該降雨が検知した土砂移動の誘因であると考えられる。

4.3.2. 水文観測結果の分析

図-4.4 に 7～8 月の水文観測結果を時系列で示す。土砂移動を検知したイベント（イベント A、ピーク流量 0.41m³/s）と同程度以上の流量を記録したイベントとしては、7/18 の 7 時台（イベント B、同 0.40m³/s）、8/16 の 11 時台（イベント C、同 0.67m³/s）が挙げら

れる。この3イベントについて濁度と流量の応答をみると、流量が増加していく過程では、いずれも流量に

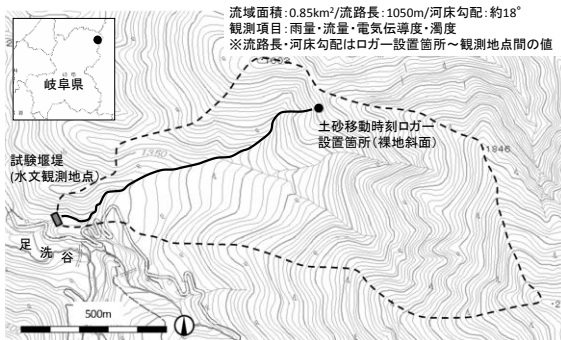


図-4.1 対象流域及び土砂移動時刻ロガー・観測機位置図

（土砂移動時刻ロガーから試験堰堤までの流路長は約1050m、比高差は約330mで、平均河床勾配は約18°）

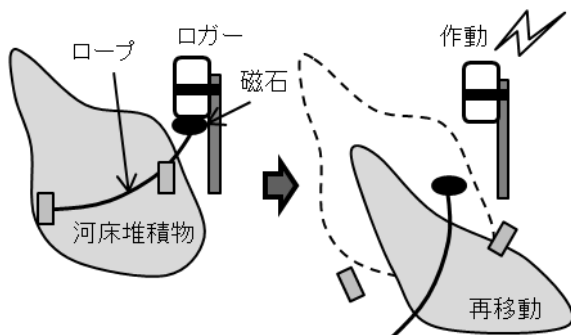


図-4.2 土砂移動時刻ロガーの構造（左）および検知原理の模式図（右）

（GPS 端末により起動時の時刻を記録する）



図-4.3 土砂移動時刻ロガー設置箇所の土砂移動状況

（設置時の想定どおり、溪床堆積物がロープを巻き込み土砂移動時刻ロガーが作動。設置時から数十 cm 程度河床が低下しており、100～200m 下流の流路には本堆積物起源と推察される土砂が河床に堆積していた）

対応して濁度も上昇している（図-4.5）。低減過程では、イベント A は流量ピーク（土砂移動検知）から約1時間後に濁度が急上昇している時間帯（1:30～4:20）が認められる一方で、イベント B・C ではピーク後1～2時間で濁度はほぼ消滅し、イベント A とは挙動が異なる。これは土砂移動発生の有無に起因する差異であると考えられ、過去に当該流域で実施された同地点での土砂移動のビデオ撮影および濁度観測においても、濁度上昇による土砂移動発生覚知の可能性が指摘されている³⁾。

既往事例での土砂移動発生は流量が $0.05\text{m}^3/\text{s}$ から $0.08\text{m}^3/\text{s}$ への増加過程であり、流量規模と土砂移動発生のタイミングが異なる。したがって、既往事例の10倍程度の流量規模でも濁度が指標となりうるものがわ

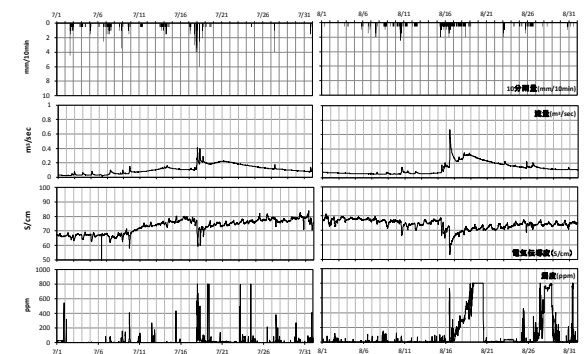


図-4.4 平成26年7～8月の水文観測結果の時系列グラフ

（上から10分雨量、流量、電気伝導度、濁度で、左列が7月、右列が8月のグラフ。当該期間の顕著な出水としてイベント A・B・C）が挙げられる。電気伝導度は流量の波形（増減）に対して逆の増減を示すが、濁度は流量に応じて増減している。8/16以降、濁度の計測値が上昇を続け計測上限値を維持したのちに急低下しており、濁度計が堰堤に堆積した土砂に埋没していた可能性が考えられるため、エラーとして分析対象から除外した）

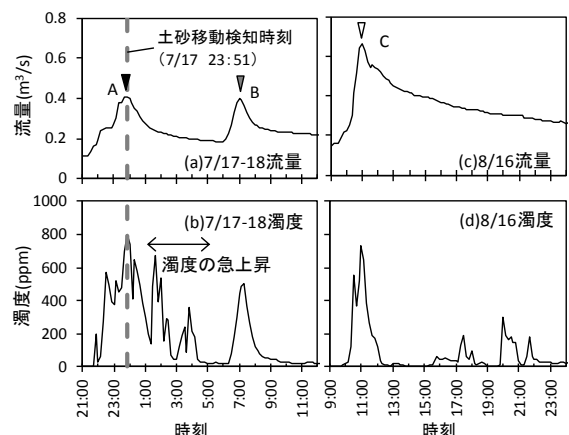


図-4.5 イベント A, B, C の流量・濁度の時系列変化（土砂移動発生イベント (A) と非発生イベント (B・C) で、流量低減過程での濁度波形が異なる）

かった。本事例での土砂移動発生に伴う濁度の急上昇と、イベント A～C の流量増加過程における濁度の立ち上がりの波形は類似しており、濁度観測の結果のみから土砂移動発生の有無を判別することは困難である。しかし、流量低減過程での濁度変化の差異は明瞭であることから、流量の増減過程と濁度変化の対応を組み合わせた分析によって、土砂移動発生の覚知が可能となることが示唆される。

4.4. 結論と課題

山地小溪流において、安価・簡素な方法で溪床堆積物再移動の発生時刻を記録した。土砂移動発生イベントと非発生イベントの水文観測データを比較した結果、流量と濁度の関係において明瞭な差異が認められた。既往観測事例とは異なる流量規模・タイミングで発生した事例であり、流量の増減過程と濁度の上昇とを組み合わせた分析が、土砂移動発生を覚知する指標となりうることが明らかとなった。今後は、さらに事例を蓄積し、濁度変化で検知可能な土砂移動と流量の規模、観測地点との距離、流量・濁度変化の定量化等について検討を進める予定である。

5. 崩壊発生時刻予測手法の開発

5.1. 背景と目的

土砂災害対策において、ハード対策の推進と同時に、ソフト対策を効果的に進めていくことの重要性が高まっている。また、平成 26 年 4 月には、内閣府より「避難勧告等の判断・伝達マニュアル作成ガイドライン（案）」²⁶⁾ が公表されており、避難を前提とした防災対策が認知されつつある。既往の研究^{例えは 27)}によると、降雨予測の情報のみでは、自治体による避難の呼びかけや、住民の避難行動の契機になりづらいことが明らかにされている。そのため、河川流量等の観測データのほか土砂災害の前兆的な現象の通報など、複数の情報を提供し、複数の段階に分けて発信し、「いつ」「どこ」が危険であるかがわかるきめ細かな情報となるよう、検討が重ねられている。

情報の多様化、多重化は、避難勧告等の発令の判断材料が増えることとなり歓迎すべきことである一方で、大量の情報の集約と判断には、伝達される情報の正確な理解と判断が必要であり、基礎的な知識や事前の訓練が不可欠だと考えられる。最近になって災害を経験している地域では、被災時の経験や、その後の訓練などにより、スムーズに対応が進む場合があるものの、多くの自治体住民は、豪雨災害による避難経験がない場合が多い。その場合、時々刻々と変化する状況と、

情報の集約・理解がうまく進まず、対応に結びつかない可能性があり、情報の内容や活用方法の理解の促進についても、並行して取り組む必要がある。とりわけ、いかにして経験したことのない避難時の状況変化や判断が困難な点の実感をもつかは非常に重要であり、最近では、自治体関係者のほか住民参加型の訓練の事例も増えてきている。訓練の中では、ハザードマップや、災害時のイメージ動画を見せることも多く、近年はマルチエージェントモデルによる避難シミュレーションを合わせて示す取り組みもある。

マルチエージェントモデルは、主に建築や都市計画分野を中心に平成 12 年前後から活用されることが増えている^{例えは 28)}。特に、地震・津波分野では平成 23 年 3 月に発生した東日本大震災の実態調査^{例えは 29)}が進められたことから、再現検証が実施される例もある³⁰⁾。マルチエージェントモデルは、エージェントひとつひとつに、自律性が与えられ、行動ルールに基づいて与えられた場面に対応する人間の行動をモデル化することができるが、これまで砂防分野での適用事例は限られている^{例えは 31)}。

砂防分野では、人口の少ない中山間地を対象とする場合が多く、結果を統計データとして扱うことが不向きであることが原因の一つと考える。しかし、土砂災害特有の、豪雨～土砂移動～河床上昇～土砂氾濫などの一連の現象の時間変化と、住民の移動、避難時の途絶経路の発生などの災害の状況を俯瞰するツールとして、マルチエージェントモデルに期待できることも多い。特に、再現される現象の不確実性が大きかったとしても、情報提供のタイミングや、避難の開始時刻、避難先等を自由に変えて比較できる点で、これまでイメージしにくかった災害時の状況を疑似的に経験できる可能性がある。

そこで本研究では、すでに土砂生産から土砂・洪水氾濫の一連の現象についてモデル化され計算可能な流域を対象に、マルチエージェントモデルを用いて住民の避難時間に関する検討を実施し、土砂災害に関連する現象の変化と住民の避難行動時間の関係について考察するとともに、砂防事業を対象としたマルチエージェントモデルの適用可能性について検討した。ここで、想定している現象は、豪雨による斜面崩壊と、それに起因した土石流が引き起こす河床上昇による土砂・洪水氾濫である。

5.2. 研究手法

5.2.1. 対象地の概要

本研究では六甲山系において構築されている「リア

ルタイムハザードマップシステム」³²⁾ (以下、「六甲システム」と呼ぶ)の対象範囲のうち、住吉川流域の上、中、下流の3区域とした(図-5.1)。各区域は1～1.5km²である。

住吉川流域は、砂防基準点を新落合橋(標高69m)とし、流域の広い範囲が市街地となっている。近年、土砂整備率は95%に及び、阪神・淡路大震災(平成07年)で斜面崩壊が複数発生したことを除くと、集中的に発生する斜面崩壊、土石流等の土砂災害はほとんど発生していない。しかし、昭和13年、昭和42年の二度の水害では土石流が発生し、市街地にも巨礫や流木が氾濫した。また、かつては日常的に土砂生産が盛んで、隣接する石屋川、芦屋川とも同様に天井川となっており、現在でも河床より周辺市街地の宅地の比高が低い範囲が広い。

5.2.2. 土砂災害現象の時系列の把握

六甲システムの採用する計算モジュールは、分布型流出解析モデル、無限長斜面モデル、住吉川本川における一次元土石流モデル、二次元土砂氾濫計算の4つで構成されている。降雨を入力条件として、崩壊発生時刻、河川流量のピーク時刻、氾濫開始時刻等を連続的に把握し、現象の発生時刻を追跡できる点で、災害シナリオの作成に適している。なお、このモデルの再現性については、河川流量は平成16年9月30日及び10月20日の出水時の実績流量、斜面崩壊は、昭和42年7月の崩壊事例に対して検証されている³²⁾。下記に示す以外の水理条件は、検証時と同様とした。

a) 対象ハイエトグラフ

災害実績のある昭和13年7月5日のハイエトグラフ(神戸海洋気象台)とした。ただし、この災害は日雨量規模では200年確率規模に相当するが、短時間雨量強度(最大10分間降雨強度)については7.9mmと過去に経験した上位の降雨と比較して少なく、山地流域では平地よりも強い降雨が生じる場合が多いことも考慮して、ピーク時の10分間雨量を既往最大値である36.5mmに置き換えて採用した。採用したハイエトグラフは図-5.2のとおりである。

b) 生産土砂量

本検討は、マルチエージェントモデルの利活用条件の検討を主眼としているため、堤内地側で土砂が堆積し、土砂移動による被害の発生が顕著に確認できる条件を採用した。現行の砂防基本計画では、崩壊面積率、崩壊深、土砂流出率から計画流出土砂量等が設定されているが、基本計画検討時の諸条件(崩壊深、土砂流

出率)の考え方において危険側を採用した場合の土砂量(133.5万m³)を、土石流として給砂させた。

c) 給砂タイミング

六甲システムでは、分布型流出解析モデルを採用しているため、発生する土砂移動現象を時系列的に把握できるが、斜面上で不安定に堆積した土砂が土石流化して河道まで輸送される過程については再現できていない。そこで、一次河床変動計算区間の上流端において生産土砂量に相当する土砂が侵食可能な区間を設定し、降雨ピーク時刻以降、土石流として流下するように設定した。

5.2.3. マルチエージェントモデルを用いた避難時間の算定

本研究は、対象地域における住民の避難行動の再現性や、望ましい避難のあり方に関する比較検討の前段階の基礎的な検討として実施した。そのため、避難の前提条件及びエージェントの行動モデルは最低限のシンプルな条件のみとし、避難タイミングの違いによる避難時間の変化を試算した。

a) 使用した基盤データ

道路データは、国土地理院で公開する基盤地図情報縮尺レベル2500の道路縁データから、リンク(経路)とノード(交差点及び道路端点)を作成して経路ネットワークを構築した(図-5.3)。エージェントの初期配置条件となる建物位置については、同様に基盤地図情報縮尺レベル2500の建物データを用いた。

b) 初期条件とエージェントの属性

各区域に配置するエージェント数は、住民基本台帳に記載された各町丁目に該当する人口に、土砂災害発生時の避難率(10%)を乗じて求めた。避難率は、孝研究³³⁾によると近年の土砂災害時の実績が整理されておりしているが、対象世帯数が50世帯以上になると避難率は数%まで減少することが示されている。本研究では、ある程度まとまったエージェントを設定することで不確実性の少ない結果が得られると考え、暫定的に10%と設定した(表-5.1)。

エージェントの初期配置は、基盤地図情報の建物データ(ポリゴン)の分布する範囲に対して、配置数が合うようにランダムに設定した。配置するエージェントの属性として、各区域の該当する町丁目の年齢構成比から、高齢者、乳幼児等の歩行困難者(6歳以下、65歳以上)と、それ以外の通常の避難が可能な者(7歳～64歳)をランダムに設定した。

c) 移動条件

移動条件として、移動開始時刻と、移動場所、移動速度、迂回条件等が必要である。これらのエージェントの移動ルールについては、アンケート結果に基づいたり、実験的に求めたり様々な事例があるが³⁴⁾、本研究では、簡素な条件として、主に移動速度と迂回条件のみの設定としている(表-5.2)。これらのより適切な値の設定方法については今後の重要な課題でもある。

移動開始時刻は、全エージェント同時とし、検討ケースを変えて複数比較し、移動場所は、各区域内の指定された避難所(学校等)とした。エージェントの移動

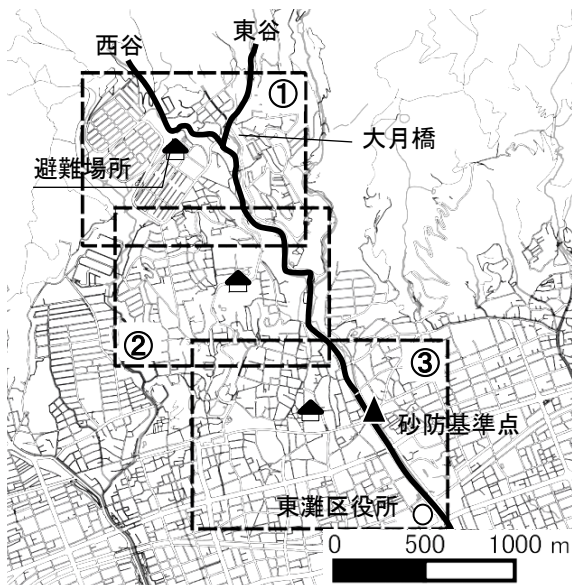


図-5.1 検討対象区域

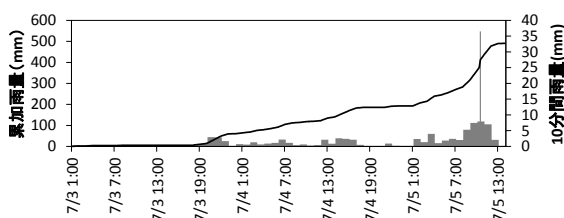


図-5.2 対象ハイトグラフ

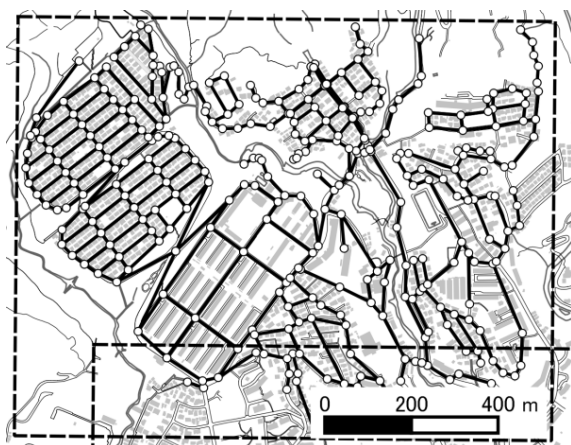


図-5.3 経路ネットワークの例(区域1)

速度は性別、年齢別で速度を変える事例も多いものの、ここでは、歩行困難者等は一律 0.5m/s、それ以外は一律 1.0m/s とした³⁵⁾。なお、混雑による速度低下はリンクの人口密度別に設定し³⁶⁾、坂道による速度変化については現地調査時の GPS データから、斜面勾配と速度の変化率の関係から求めた補正係数を乗じた。

最短経路探索にワーシャルフロイド法を採用し、各建物データから出発したエージェントは、移動中のリンクが①斜面崩壊による途絶、②元の地盤から土砂堆積深を含む水深と定義した流動深が 50cm 以上のいずれかの条件を満たした場合に、通行不可と判断し、別の経路を選択するとした。また、流動深が 50cm 未満の場合は、流動深がない場合から線形で変化させた³⁷⁾、³⁸⁾。ただし、計算結果より、斜面崩壊により経路が途絶する箇所は発生しなかった。

5.3. 結果

5.3.1. 土砂災害現象の時間変化

六甲システムで再現できる現象は、表層崩壊と、土石流による河川流量の増加、流量の増加または河床上昇による土砂・洪水氾濫である(図-5.4)。ここでは、住民が事前に避難する場合に重要となる条件としている。

a) 斜面崩壊

住吉川上流域で最初に崩壊が発生しはじめたのは、累加雨量 205mm、午前 1:50 時点であった。その後、微増傾向が続くが、8:00 以降、崩壊土量は急増を始める。また、避難経路に隣接する市街地では 10:30 に最初の崩壊が発生し、12:00 以降、新たな崩壊は発生しない。従って、警戒避難上の契機となる時刻は、1:50、8:00、10:30 であった。

b) 流量の推移及び土砂・洪水氾濫

本川流量がピーク流量を記録するのは、降雨ピークと同時期の 10:30~10:40 である。また、土砂・洪水氾濫を開始するのは、上流の西谷上流堰堤付近で 10:50、下流砂防基準点下流では 11:17 である。ここで、12:00 以降、新たな斜面崩壊が発生していないのに対し、下流氾濫開始点ではこの時刻から氾濫を開始する。本研究のシナリオでは、斜面崩壊が、かなり早い段階から累加雨量に比例するように増加し、一定量に達するとそれ以上増加しないのに対し、土砂・洪水氾濫は越流後に急速に状況が変化する。これらの時間的な関係は、ハイトグラフや流出特性、上流域の崩壊しやすさ、河道断面等の相互の関係から変化すると考えられる。

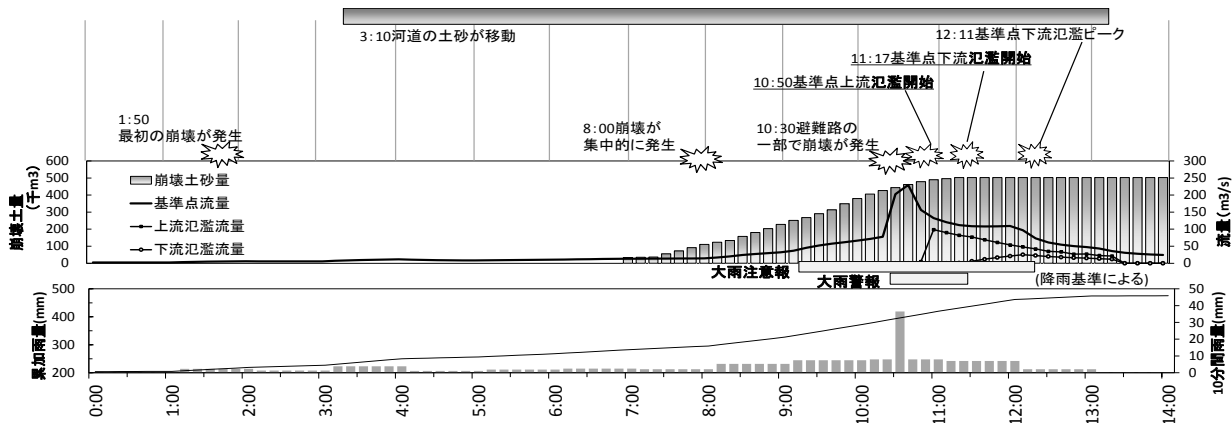


図-5.4 リアルタイムハザードマップシステムによる土砂災害関連事象の時系列

5.3.2. 避難時間

避難シミュレーションとして、表-5.3 に示す時刻に、避難を開始したとして、避難時間を算出した。その結果を表-5.4、図-5.5 に示す。土砂氾濫タイミングの差から、区域1・区域2では西谷・東谷流量ピーク直後の避難開始のケース（ケース1）から避難の遅延が始まるのに対して、区域3ではその1.5時間後の避難開始のケース（参考2）から避難時間の遅延が始まり、経路の途絶により避難所に到達できないエージェントが生じることが確認できる。

5.4. 考察

5.4.1. 土砂災害現象の時間変化

本検討で設定したシナリオでは、最初の崩壊から、集中的な崩壊発生、降雨ピークまでは8時間以上の時間差があり、急激に崩壊が発生し始める時刻（8:00）までについても6時間以上の時間差があった。また、崩壊土砂の流出時間なども考慮して、河川流量のピークに合わせて土石流の発生を想定したため、土砂・洪水氾濫は10:30以降に発生した。土砂・洪水氾濫は一度越流し始めると、住宅や避難経路に連続的に被害を及ぼすことから、本研究で想定したシナリオの斜面崩壊の初発や集中的な発生を事前に把握することが、避難時間の確保上重要であることがわかる。

5.4.2. 避難時間の変化

土砂・洪水氾濫が始まる以前と、氾濫の発生やピーク発生のタイミング前後に避難を開始した場合について、避難達成時間を比較する。各区域は長辺を約1.2kmとしており、単純に計算すると、避難時間は概ね15～20分と考えられる。しかし、ランダムで配置した歩行困難者や、ネットワークの影響により、避難経路上の障害が発生しない場合でも、20～30分を要することがわかる。そのため、最初の崩壊や崩壊の急増を契機にした避難開始では避難時の移動に土砂氾濫の影響は

受けないが、降雨ピーク・流量ピーク後の避難開始では、避難時間が遅延し、避難所に到達できない恐れがあることがわかる（図-5.6）。また、区域1と区域3では避難時間の遅延が生じる避難開始時刻の間に1時間半以上の差があり、下流の区域に対しては、上流の土砂・洪水氾濫を契機にしてもまだ避難時間が確保で

表-5.1 各区域に配置するエージェント数

	推定区域人口	配置エージェント数 (うち歩行困難者比[%])
区域1	11,102	1,100 (36.4%)
区域2	10,986	1,100 (33.0%)
区域3	20,930	2,100 (29.0%)

表-5.2 エージェントの行動ルール

項目	設定概要
初期条件	避難者の配置
	建築物の範囲にランダムに配置。配置数は住民基本台帳から設定した値
	属性の設定
移動開始条件	住民基本台帳に基づく年齢比
	10% (既往実績等より設定)
移動先	同時 (複数ケース検討)
移動経路	市の指定する避難所
最短経路探索	ワーシャルフロイド法
迂回時の条件	避難経路にかかる斜面要素が崩壊流動深50cm以上
移動速度	平常時
	7歳以上64歳以下: 1.0m/s 6歳以下・65歳以上: 0.5m/s *勾配補正係数: $\alpha=1-0.0177\theta$ *密度補正: 1.5~3.8人/m ² : 0.5m/s 3.8~6.5人/m ² : 0.2m/s 6.5人/m ² ~-
移動速度	浸水時
	水深50cmで移動速度0m/s 50cm以下は線形に低下

表-5.3 避難開始タイミング

	避難開始	契機になる現象
ケース0	8:00	斜面崩壊の急激な増加
ケース1	10:40	避難路の一部で崩壊発生・降雨・流量(東谷)ピーク
ケース2	11:00	西谷堰堤上流付近で氾濫開始
ケース3	11:30	新落合橋下流で氾濫開始
参考1	12:00	(下流氾濫開始から40分後)
参考2	13:00	(下流氾濫開始から100分後)

きることがわかる。

ここで、昭和13年4月1日以降の時間雨量データから、土壌雨量指数を試算したところ、兵庫県南部（神戸市）の大雨警報の土壌雨量指数の基準値123mmは、7月4日の午後14:00～16:00には超過していたことになる。対象地域において現在運用中の土砂災害警戒情報の発表基準は確認できていない。しかし、崩壊の急激な増加は、翌7月5日の未明以降であるため、現行の注意報・警報及び土砂災害警戒情報のほか、六甲システムのような土砂移動に関する予測結果を加えることで、土砂災害に関する状況変化を把握し、避難の契機とできる可能性があると考ええる。

以上から、本研究で検討対象として設定したハイトグラフに対しては、土砂災害が急増し始める時刻以前に避難を開始すれば、モデル上平常時と変わらないが、降雨ピーク・流量ピーク後の移動は、所要時間が長く、到達できないエージェントが生じることがわかった。このことから、土砂移動に関する予測情報、監視・観測情報を避難の契機としても、十分に避難時間を確保する場合があることが確認できる。

5.4.3. マルチエージェントモデルの活用可能性と今後の課題

本研究で、降雨～崩壊発生～土砂・洪水氾濫の一連の現象と、それを条件とした避難シミュレーションを実施した。その結果、それぞれの一連の現象のタイミングと、それによる避難時間の変化を確認することができた。その際、検討対象のハイトグラフに対しては、斜面崩壊の初発及び集中的な崩壊発生を契機に避難行動を開始すれば、土砂・洪水氾濫の発生より先に安全な避難所に移動することが可能であることを示すことができた。

再現性の高いマルチエージェントモデルの構築にあたっては、悪天候での経路選択など行動心理学的な知見が必要であるほか、検討結果に対する検証が困難であるなど、課題は多い。同様に、シナリオの設定においても、一定の仮定に基づくものであり、災害時にこの結果と同様の状況になるわけではないことなど説明上の課題は、これまでのハザードマップなどと同様である。しかしながら、地方自治体に対して、災害時の影響を説明する場合や、豪雨の継続が予想される場合に、実際の避難の時間感覚の目安として説明したり、クリティカルパスを把握したりするツールとして、有効であると考ええる。また、自治体の担当者や住民が、早期に避難すべきか、屋内で退避的な行動をとるべきか、判断が必要な場面において、被災時の具体的イメー

ジをもつことは、仮想のシナリオに対してであっても重要なことと考える。特に土砂災害の場合、住居は山腹斜面に接した危険な場所にあり、避難時に利用可能

表-5.4 80%避難達成時間

	開始時刻	区域1	区域2	区域3
ケース0	8:00	0:27:10	0:24:00	0:21:10
ケース1	10:40	0:31:40	0:24:00	0:21:10
ケース2	11:00	0:41:30	0:58:30	0:21:10
ケース3	11:30	0:51:20	(80%に満たない)	0:21:10
参考1	12:00	-	-	0:21:10
参考2	13:00	-	-	0:26:20

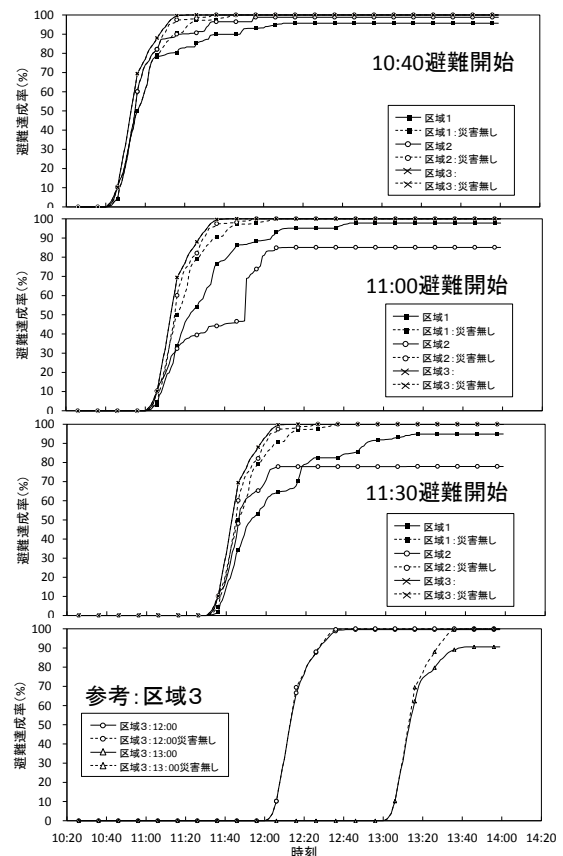


図-5.5 避難時間計算結果

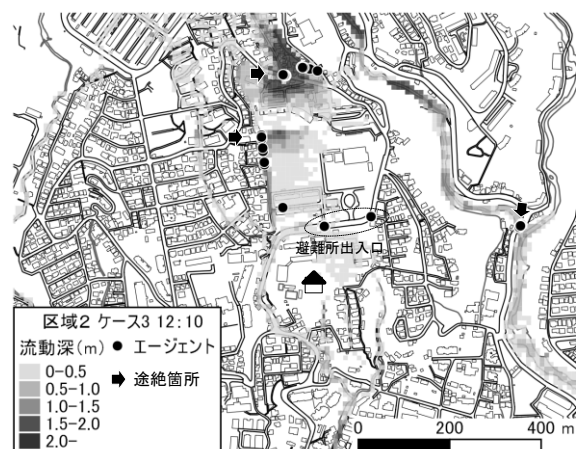


図-5.6 避難時間計算結果(区域2: ケース3: 12:10)

な路網が少なく、河川渡渉が必要などより厳しい条件である場合の方が多い。そのような場合、より危険が切迫した事態では屋内で移動するなどに留まるなどの善処策があったとしても、望ましいのは早期に安全な場所へ避難することである。早めの行動を喚起する資料として、また実際の山間地での現象に敏感になり、そのあとに発生する現象を想像する資料として、このようなシミュレーションツールを活用することは有用だと考える。

5.5. おわりに

現在、各関係機関による降雨、流量等の監視・観測データ、それらをもとに作成される危険度データ、さらに、SNS を用いた非公式情報など非常に多くの情報が配信されている。しかしながら、自治体担当者や住民が、実際にとるべき行動を判断するためには、避難行動そのものの時間や距離といった定量的情報が必要となる。その際、ある程度不確実性があったとしても、このような計算ツールを用いて、災害時に行動について事前に把握し、監視・観測によるデータと合わせて提供することが重要だと考える。

6. きめ細かな情報作成に向けたケーススタディ

6.1. 背景と目的

平成 19 年度より運用されている土砂災害警戒情報は、日本全国をカバーする唯一の土砂災害に関する危険度情報である。全国の市町村に対して、共通の指標と同様の手法で設定された閾値で評価された CL（土砂災害発生危険基準線）から作成されている。この情報は、降雨量と降雨量をもとにした土壌雨量指数を指標としているため、全国をカバーできる反面、降雨量以外の素因が考慮できず、より危険度の高い箇所の絞り込みや、素因による危険度の違いが評価できないなどの課題があった。特に、近年になって、空間的・時間的にもより精度よい予測情報や実際の土砂移動現象によって、避難勧告等の発令や避難行動の動機付けになることが指摘されている。この時、行政機関に対して、降雨が予想される場合など、タイムラインの作成が推奨され、災害発生の時間感覚の伴った体制づくりが求められている。しかしながら、河川水位などと異なり、土砂災害の場合、連続的な危険度の高まりが視覚的に判断できる観測データは得られている場合はほとんどなく、土砂災害に対する時間感覚のイメージは非常に難しい。

そこで、本研究課題のケーススタディとして、以下を実施した。(1)idH-SLIDER を用いて土砂災害監視

機器等の配置箇所を選定した。(2)idH-SLIDER 法を用いて作成した土砂災害シナリオに対して、避難開始時刻の異なる避難行動シミュレーションを実施し、避難に要する時間について検討した。

6.2. 実施方法

6.2.1. 対象地の概要

越美山系砂防事務所管内の揖斐川流域の広瀬浅又川、瀬戸谷、根尾川流域の栃尾谷を検討対象の流域とした(図-6.1)。ただし、避難行動シミュレーションについては、いずれの流域にも集落などが存在しないため最も近く、建物がある程度連串連担する集落を対象と

表-6.1 対象地の概要

	流域	面積 (ha)	地区	区域人口 (人)
揖斐川	広瀬浅又川	2.48	揖斐川町坂内	421
	瀬戸谷	0.97	揖斐川町日坂	101
根尾川	栃尾谷	4.45	本巣市奥谷・口谷	34

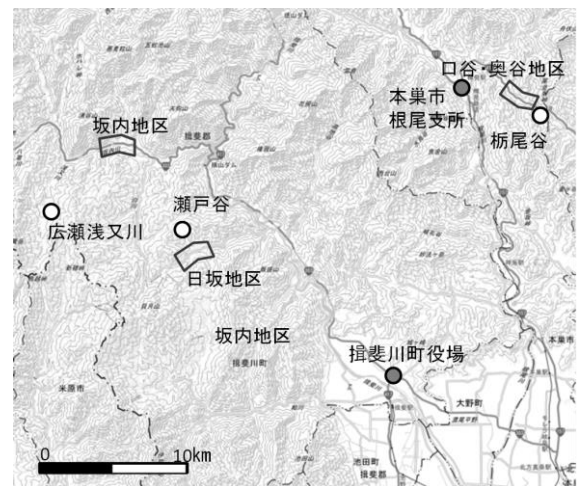


図-6.1 対象地の位置図

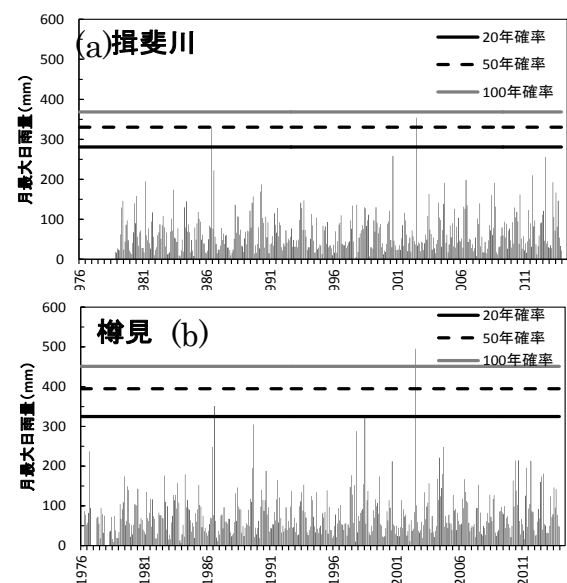


図-6.2 月最大日雨量と確率評価結果

した。対象流域の概要を表-6.1に示す。

流域の地質は、揖斐川の2流域は花崗岩類、根尾川の栃尾谷は内陸の付加帯、堆積岩類)となっている。近年崩壊発生日時の明らかな崩壊は発生していないが、揖斐川・根尾川流域全体では、近年でもしばしば土石流が発生している。図-6.2に気象庁樽見地点、根尾地点の年最大日雨量と、確率評価結果について示すが、昭和51年以降、特に規模の大きい降雨として、昭和61年、昭和64年、平成10年、平成14年の突出しており、土石流等の発生履歴(表-6.2)とも一致する。なお、確率評価については、「中小河川計画の手引き(案)～洪水防御計画を中心として～」³⁹⁾に従い、SLSC値より揖斐川はGEV、樽見はSQRT-ET法による結果を採用している。

表-6.2 過去の主な災害

年	期間	災害の要因、概要
1959	9月26日	伊勢湾台風
1965	9月14～5日	奥越豪雨(台風23・24号、前線) 白谷の大崩壊が発生
1986	8月21～22日	集中豪雨:根尾松田地区で土石流が発生
1989	9月2日～7日	秋雨前線:根尾板所地区他で土石流が発生
1998	7月27日～29日	根尾越波地区や根尾下大須地区等で土石災害が発生
2002	7月8日～11日	根尾東板屋地区、根尾水鳥地区などで浸水被害が発生
2011	8月27日	根尾越波地区で土石流が発生

表-6.3 パラメータの設定

		広瀬浅又川	瀬戸谷	栃尾谷
飽和透水係数 [cm/s]	K	000616	0.0763	0.0072
土の粘着力 [kN/m ²]	C	14.5	7.5	8.0
土の内部摩擦角 [°]	φ	25.52	27.64	33.43
飽和度 [-]	Sr			
間隙比 [-]	e			
土粒子の比重 [-]	Gs	2.6		
水の単位体積重量 [kN/m ³]	γ _w	9.8		

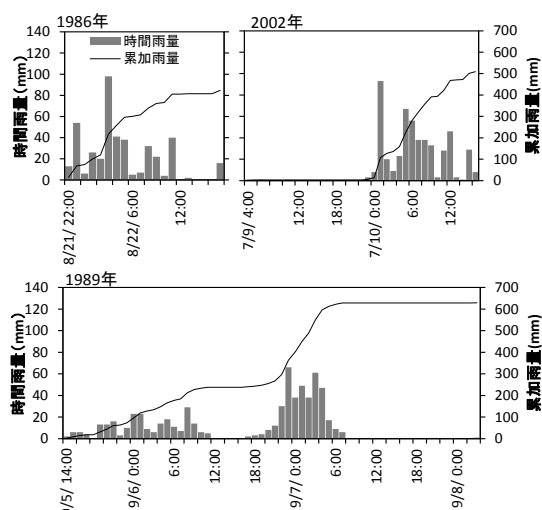


図-6.3 ハイエットグラフ(気象庁 樽見)

地形データは、平成20年撮影のレーザ計測データを用いた。土層厚分布は、簡易貫入試験結果からKriging法により内挿して得られた分布を用いた。計算に用いるパラメータは表-6.3のとおりとし、基本的には現地で採取した土質試験結果(3箇所)の平均値を採用した。ただし、現地調査から得た土の粘着力は、流域最少粘着力以下だったため、流域最少粘着力に置き換えた。

対象とした流域では、流量や地下水などの水文データの観測が実施されているほか、流域内でもより危険度の高い流域として、崩壊検知センサ等監視装置が試験的に設置され、観測が進められている。

また、現地調査等から設定したidH-SLIDER法に必要なパラメータは表-6.3のとおりとした。いずれも、現地で採取した複数の土質試料の平均値である。

6.2.2. 実施のながれ

a) 配置箇所選定手法

きめ細かな情報のひとつとして、崩壊検知センサ等の土砂災害監視機器による実際の土砂移動現象を把握し、配信することが必要である。その場合、どのようなハイエットグラフの場合にも、より早いタイミングで土砂移動が開始する斜面を選定する必要がある。現在はH-SLIDER法、C-SLIDER法などから相対的に危険度の高い箇所を選定し、現地調査などから設定しているが、これらの手法では、タイミングに関する比較が不足している。そこで、開発中のidH-SLIDER法に適用し、土砂災害監視機器の配置箇所選定に対するケーススタディを実施する。

最初に、10数年以上の長期間の1時間雨量データを用いて、流域ごとに崩壊要素数の多い降雨イベントを抽出する。抽出された降雨イベントに対しては、災害史や災害報告等から、idH-SLIDER法による崩壊危険度の高い降雨抽出結果の妥当性を確認した。

次に、それらに対して、各斜面要素の安全率が1.0を下回るタイミングを比較し、ハイエットグラフに関わらず、早いタイミングで危険度の高い箇所の抽出を試みた。

b) 避難時間の検討

次に、idH-SLIDER法から求めた土砂災害危険度の時系列変化を土砂災害シナリオとし、避難行動シミュレーションから避難時間を検討した。一般的なタイムラインでは、情報収集や職員の参集などを考慮して時系列で整理させている。しかし、実際の避難時間やタイミングの違いによるその時間の変化など把握できていないことが多い。そのため、対象流域下流の地域

に対して、3～5 ケースの避難行動シミュレーションを実施し、留意点を整理した。

6.3. idH-SLIDER 法による監視機器配置箇所の選定

6.3.1. 土砂移動タイミングの比較

過去の 1 時間雨量データ（ここでは過去 37 年間の地上アメダスの雨量でデータを採用）に対して、崩壊要素数を計算した。その結果を図-6.3 に示す。

その結果各流域の上位三降雨とし、広瀬浅又川は、昭和 61 年 6 月 17 日、昭和 64 年 9 月 7 日、平成 14 年 7 月 11 日、瀬戸谷は昭和 61 年 6 月 17 日、昭和 64 年 9 月 7 日、平成 14 年 7 月 10 日、栃尾谷は昭和 61 年 8 月 22 日、昭和 64 年 9 月 7 日、平成 14 年 7 月 10 日が抽出された。

栃尾谷を例に示すと、各降雨イベントのハイエトグラフは図-6.4 に示すとおりである。昭和 61 年は、24 時間以内に 424mm を記録し、最大 1 時間雨量は 98mm に及ぶ中央集中型降雨である。昭和 64 年は 2 日半にわたるまとまった降雨だが、ピーク時は 7 時間にわたり 30mm/h 以上が継続し、最大時間雨量は 66mm であった。平成 14 年も昭和 64 年とよく似ているが最初に 93mm の最大 1 時間雨量を記録したのち、その後数時間はまとまった降雨を継続している。このことから、idH-SLIDER 法によって計算される崩壊要素数は、特定の形状のハイエトグラフで多く計算されているわけではないことがわかる。

6.3.2. 土砂移動監視機器の配置箇所の抽出

それぞれの降雨期間中に、崩壊と判定された斜面要素について、崩壊発生順位を与え、2 降雨間で比較した（図-6.5）。この時、同じ時刻に崩壊と判定された要素には同じ順位を付与し、次の時刻の要素には同順位の要素数分を空けずに次の順位を付与している。この結果、異なるハイエトグラフ間の順位関係は右上がりの線形関係を示し、ハイエトグラフに関わらず、崩壊発生の危険性が高まる崩壊要素の順序は変わらないという結果が得られたと考える。

図-6.6 には、栃尾谷について、上記の 3 つの降雨イベントに対する計算結果から、いずれの降雨によっても高い順位で崩壊が発生するとされた斜面要素を示し、原位置状況を確認した。最も危険度が高い斜面については、斜面上の段差地形、湧水などが確認され、現地で確認した状況としても、比較的危険度の高い斜面であることが見て取れた（図-6.7）。この周辺は、越美山系砂防事務所が、平成 22 年以降、崩壊検知センサなどを設置して監視しているほか、継続して水文

水質調査を実施している箇所と一致している。

以上から、現地調査から得た値と、長期間の雨量データによる検証を行ったパラメータを用いて、監視対象として妥当な危険斜面が抽出されたと考える。

6.4. マルチエージェントモデルによる避難時間の検討

6.4.1. 対象としたハイエトグラフ

越美山系砂防事務所管内では、平成 26 年 8 月 10 日に、管内でも土砂流出や砂防堰堤への土砂堆積が確認される比較的規模の大きい出水が発生した。そこで、本節では、平成 26 年 8 月 10 日のハイエトグラフをもとに、避難行動シミュレーションを実施し、住民の避難時間に関する検討を実施した。

対象としたハイエトグラフは、気象庁アメダス樽見地点で観測された平成 26 年 8 月 10 日 0:00~18:00 の 10 分間雨量を、1.65 倍に引き延ばしたものとした。揖斐川流域に対しては、直線距離は樽見地点よりも揖斐川地点に近いものの、当時の雨量分布を考えると過小だと考えたためである（図-6.8）。また、この降雨時には、実際には斜面崩壊、土石流は発生していないため、日雨量の既往最大かつ土石流の発生した平成 14 年 7 月 10 日の日雨量に合わせて引き延ばすこととした。採用したハイエトグラフは図-6.9 のとおりである。

6.4.2. 土砂災害シナリオの作成

採用したハイエトグラフに対して、各流域の土砂災害シナリオを作成した。

土砂災害シナリオの作成条件を表-6.4 に示す。豪雨による土砂災害発生時の災害発生に係る時系列の変化に応じて、河川水位の上昇、土砂災害警戒情報の発令、山間部での土砂移動（崩壊）の発生、土石流の発生が考えられる。ここでは、実際のハイエトグラフを既往最大日雨量に合わせて引き延ばして採用しているため、以下のように時系列変化を求めた。

CL の超過時刻については、引き延ばしたハイエトグラフをもとに土壌雨量を計算し、「ぎふ土砂災害警戒情報ポータル」(<http://alert.sabo.pref.gifu.lg.jp/>) で確認した CL より超過時刻を求めた。河川流量については、中安の総合単位図法を用いて流出解析により求めた。崩壊発生については、idH-SLIDER 法により時系列の崩壊要素数を計算し、土砂災害進展の指標とした。土石流発生は、各土石流危険渓流の流量ピーク時から 10 分間を土砂濃度 30%として与えた。

土砂災害シナリオの作成例として、根尾地区の土砂災害シナリオを図-6.10 に示す。

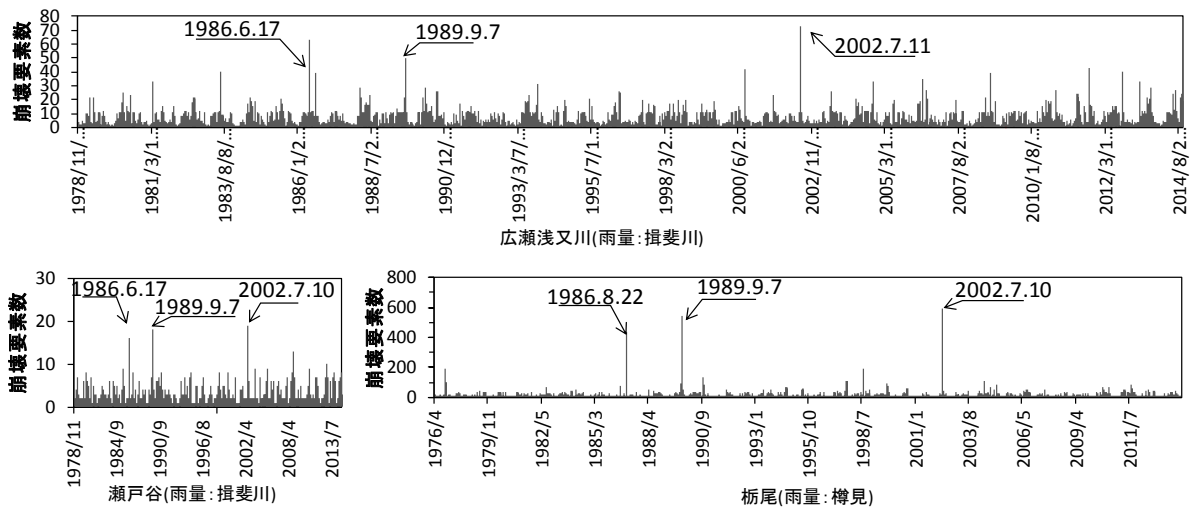


図-6.4 昭和51年以降の1時間雨量データ(気象庁アメダス 樽見地点)による崩壊発生要素数;崩壊要素数が1以上の時刻のみ連続して表示。

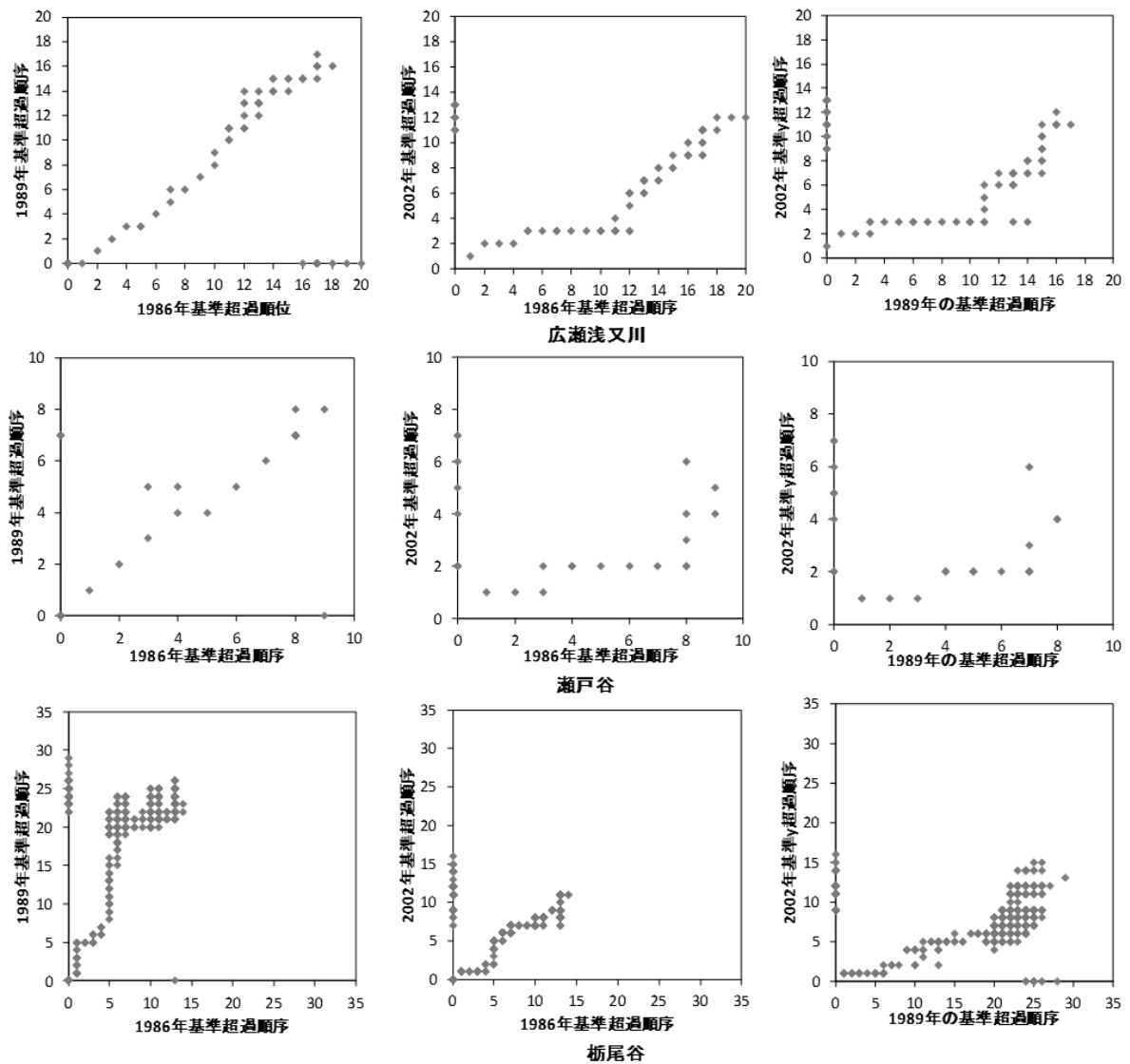


図-6.5 異なる降雨間の崩壊発生順序

6.4.3. 避難行動モデルの構築

避難行動モデルとして、エージェントの移動空間となる避難経路、エージェントの初期配置及びエージェントの行動ルールを設定した。

移動空間はそれぞれ、約 1km^2 程度の連担する集落とした。それぞれ、地区内に 1 箇所以上の自治体で発行するハザードマップに記載された避難所を含んでいる。

避難経路は、国土地理院で公開する基盤地図情報縮尺レベル 2500 及び 25,000 の道路縁データから、リンク（経路）とノード（交差点及び道路端点）を作成して経路ネットワークを構築した。エージェントの初期配置条件となる建物位置については、同様に基盤地図情報縮尺レベル 2500 の建物データを用い、現地状況から

必要に応じて修正した。根尾地区、日坂地区が河川沿いの国道・県道に隣接して建物が建ち、経路が 1 つしかないのに対して、坂内地区は河川合流点に立地しているため経路が複数あると同時に、避難所の数も多い。それぞれの地域の状況を図-6.11 に示す。

各区域に配置するエージェント数は、平成 22 年度

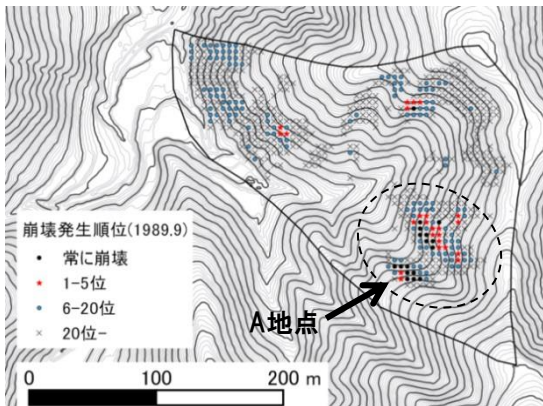


図-6.6 昭和 64 年 9 月 10 日降雨時の崩壊発生順位



図-6.7 A 地点の林内の状況;湧水やパイプが見られる。

実施の国勢調査の小地域集計結果より、各地区内に居住する人口の 100%とした。

エージェントの初期配置は、基盤地図情報の建物データ（ポリゴン）の分布する範囲に対して、配置数合うようにランダムに設定した。配置するエージェントの属性として、各区域の該当する町丁目の年齢構成比から、高齢者、乳幼児等の歩行困難者（6 歳以下、65 歳以上）と、それ以外の通常の避難が可能な者（7 歳～64 歳）をランダムに設定した。

次に、行動ルールとして、移動開始時刻と、移動場所、移動速度、迂回条件等が必要である。これらのエージェントの移動ルールについては、アンケート結果に基づいたり、実験的に求めたり様々な事例があるが³⁴⁾、本研究では、簡素な条件として、主に移動速度と迂回条件のみの設定としている（表-6.5）。これらのより適切な値の設定方法については今後の重要な課題でもある。

移動開始時刻は、全エージェント同時とし、災害無氏（平常時）と、土石流発生時（降雨ピーク時とも同じ）、CL 超過時について実施した（表-6.6）。ただし、日坂地区については、感度分析として、土石流発生の 10 分前と避難所を新たに 1 箇所追加したケースを実施した。この時の避難所は、対象地域内で、土砂災害警戒区域等にかかっていない建物とした。

移動場所は、各区域内の指定された避難所(学校等)

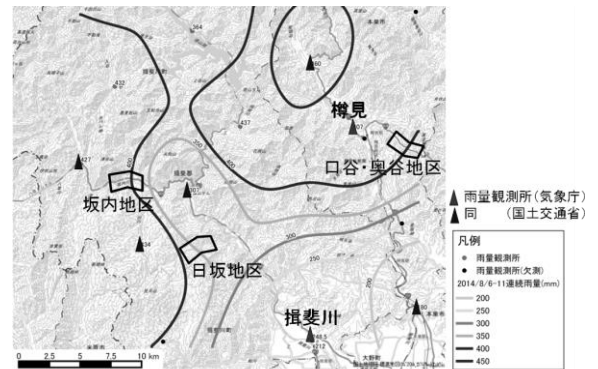


図-6.8 雨量分布

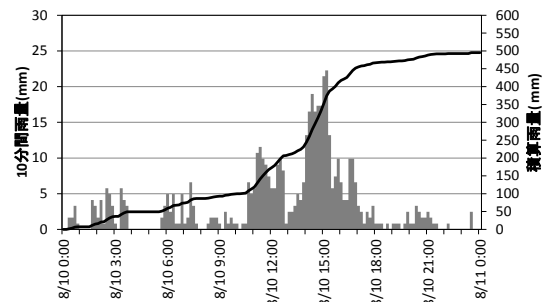
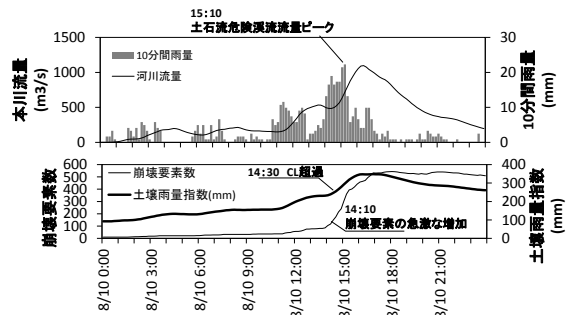


図-6.9 採用したハイエトグラフ (実績×1.65 倍)

とした。エージェントの移動速度は性別、年齢別で速度を変える事例も多いものの、ここでは、歩行困難者等は一律 0.5m/s、それ以外は一律 1.0m/s とした³⁵⁾。なお、混雑による速度低下はリンクの人口密度別に設

表－6.4 土砂災害シナリオの作成条件

CLの超過時刻		引き伸ばし降雨に対して算出した土壌雨量指数と60分積算雨量から、CL超過時刻を推定
河川流量・水位		中安の総合単位図法
崩壊発生		idH-SLIDER法を用いて斜面要素数を計算
土石流	発生地点	土石流危険渓流の谷出口
	流量	同上
	発生タイミング	流量ピーク時
	土砂ハイドロ	ピークから10分間と想定
	氾濫流量、流動深、堆積深	二次元氾濫シミュレーションにより計算



図－6.10 土砂災害シナリオの例(根尾地区)

表－6.5 エージェントの行動ルール

項目		設定概要
初期条件	避難者の配置	建築物の範囲にランダムに配置。配置数は住民基本台帳から設定した値。
	属性の設定	住民基本台帳に基づく年齢比
	避難率	100%
移動開始条件		同時（避難シミュレーション開始時刻一覧表参照）
移動先		初期の配置から最も近い市の指定する避難所
避難経路	最短経路探索	ワーシャルフロイド法
	迂回時の条件	流動深50cm以上
避難速度	平常時	健康者: 1.0m/s 7歳以下・65歳以上: 0.5m/s *勾配補正係数: $r = \exp(4.614 \cdot \theta)$ r: 変化率 *密度補正: 1.5～3.8人/m²: 0.5m/s 3.8～6.5人/m²: 0.2m/s 6.5人/m²以上: 0.1m/s
	浸水時	水深50cmで移動速度0m/s. 50cm以下は線形に低下。

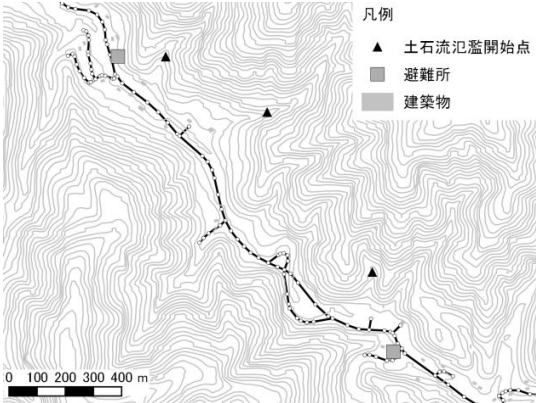
表－6.6 避難シミュレーション開始時刻

	避難開始時刻		
	坂内地区	日坂地区	根尾地区
災害なし	(13:00)	(13:00)	(13:00)
CL超過	14:20	14:20	14:30
土石流発生前	—	15:00	—
土石流ピーク	15:10	15:10	15:10
避難所の追加	—	15:10	—

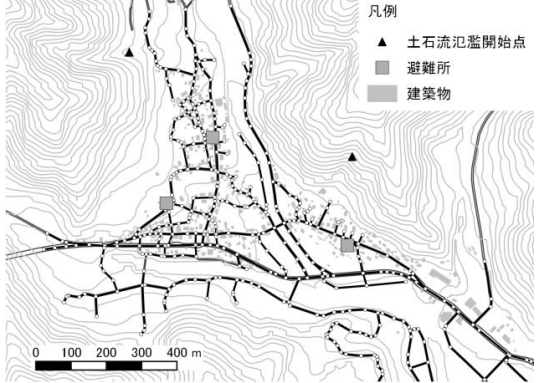
定し³⁶⁾、坂道による速度変化については疲労係数から得た速度低下の関係式を用いた。⁴⁰⁾

最短経路探索にワーシャルフロイド法を採用し、各建物データから出発したエージェントは、移動中のリンクが元の地盤から土砂堆積深を含む水深と定義した流動深が 50cm 以上の条件を満たした場合に、通行不可と判断し、別の経路を選択するとした。また、流動深が 50cm 未満の場合は、流動深がない場合から線形で変化させた^{37),38)}。

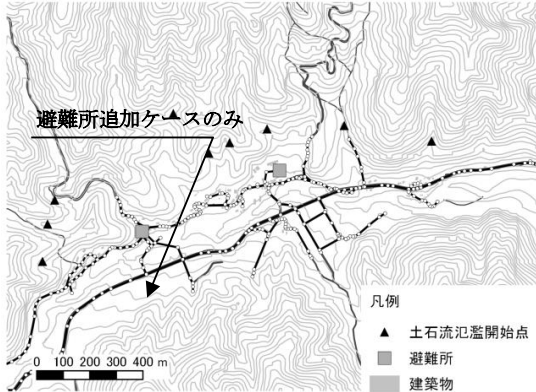
6.4.4. 避難シミュレーションの実施



(a)根尾(栃尾谷)地区(一部拡大)



(b)坂内(広瀬浅又川)地区(一部拡大)



(c)日坂(瀬戸谷)地区(一部拡大)

図－6.11 各地区の避難経路モデルと避難所の配置

避難シミュレーションの結果を図-6.12 及び表-6.7 に示す。

広瀬浅又川下流の坂内地区は、平常時では 80%避難

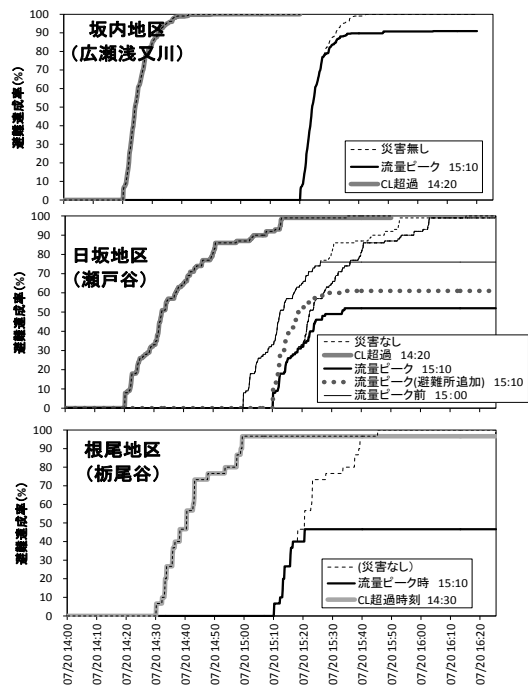


図-6.12 避難時間計算結果

表-6.7 80%避難達成時間

	坂内地区	日坂地区	根尾地区
災害なし	0:08:40	0:29:50	0:23:30
CL超過	0:08:40	0:29:50	0:23:30
土石流発生前	—	0:26:10* (71.0%)	—
土石流ピーク	0:09:50	0:24:20* (52.0%)	0:10:30* (46.7%)
避難所の追加	—	0:24:40* (61.0%)	—

*進展が無くなった場合の避難達成率。()は最終達成率を示す。

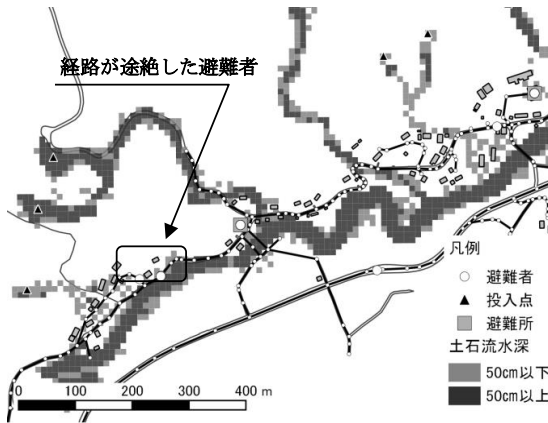


図-6.13 避難時間計算結果(日坂地区:避難所追加時:15:30)

完了まで 8 分 90 秒、降雨ピークより 50 分早い CL 超過時刻でも同様、土石流危険渓流の流量ピーク時とともに避難を開始しても 9 分 50 秒と 10 分以内に人口の 80%が避難完了する結果となった。この理由は、避難所が複数あるとともに、集落として発達しているため経路が複数あるためだといえる。

一方、瀬戸谷下流の日坂地区では、平常時でも人口の 80%が避難所に移動するまでには 29 分 50 秒(約 30 分)を要する。CL 超過時に避難を開始した場合もこの結果は変わらないが、土石流発生 10 分前では達成率 71%、土石流発生時刻では 52%と居住する人口に対して半数近くは避難所まで到達できない(図-6.13)。この傾向については、根尾地区でも同様であり、土石流発生時刻(降雨ピーク時)に避難を開始した場合の達成率は 50%未満である。日坂地区、根尾地区とも共通して、幹線道路に沿った集落であると同時に、民家は斜面と河川の間、河岸段丘上や支川出口付近に立地している。そのため、避難所までの移動距離が長く、支川で発生した土石流によって経路が途絶するためである。

そこで、感度分析として、日坂地区に対して避難所を追加したケースと、土石流発生 10 分前に避難を開始したケースを実施しているが、この問題を解消するほどの効果は見られなかった。

以上の結果から読み取れることは、避難の成否は対象とする地域の地形条件と避難所の配置によるところが大きく、避難所を追加したとしても、経路が河川沿いの道路に限られる場合は、避難に対して、非常に脆弱な地域だということがわかる。また、一方で、実際に土石流が発生する 30 分以上前に避難を開始した場合は、いずれの地区も土石流の影響を受けていないことから、あらかじめ避難に要する時間を把握し、災害発生が予測される数時間前に避難所に移動を完了するよう徹底する取り組み等は効果的だと考える。

6.4.5. 考察

これまで、砂防事業が主として対応としている中山間地域においてマルチエージェントシミュレーションを実施した例は極めて少なかった。人口が少なく、統計的なデータの取り扱いが不向きである点、対象現象の不確実性が大きく再現性に課題が残る点などがその理由であると考えられる。しかし、本研究において、いくつかの想定のもとでマルチエージェントシミュレーションを実施したところ以下の点が明らかとなった。

1 点目は、河川、土石流危険渓流の位置関係、避難所の位置、道路と河川の関係など地域の地形条件に

よって、災害時の避難の有効性が決まる点である。同じ中山間地域であっても、坂内地区のような条件の場合は、降雨ピークや土石流発生時など、現象が起き始めてから避難しても、避難所に到達できる可能性がある。避難所と比較して、自宅の場所が危険な場合、災害時の避難が有効な場合がある。しかし、日坂地区や根尾地区の場合、経路が河川沿いの道路に限られ、経路が途絶しがちであることに加え、避難所までの距離があることから、豪雨時に屋外へ移動することは非常に危険であることがわかる。ここでは、徒歩での移動を前提に検討しているものの、自動車を用いた場合であっても、経路の途絶や土石流に捕まる可能性は同様であると考ええる。

2 点目は、根尾地区や日坂地区のような条件にある地域の場合、避難所を増やすとしても、安全な場所自体が地区内には少なく、一時的な避難場所を決めたとしても、避難経路上の安全性が確保されるわけではなく、1 点目の問題を解消するのは難しいと考える。反対に、CL 超過時刻など、降雨ピークなどの 1 時間近く前に行動を開始すれば、安全に避難が完了する可能性は高いことが示された。従って、このような地域では、数時間前から豪雨が予測される場合の事前避難以外は、避難所への避難は好ましくないといえる。

以上のことから、定性的な比較ではあるものの、3 つの地区に対して災害の無い場合と、災害時の複数ケースで避難シミュレーションを実施比較したことで、各地区において効果的な避難行動が確認できたと考える。

7. 高感度地震観測網等で計測する土砂移動現象及び地震時の地盤振動の特徴

7.1. はじめに

高感度の振動センサは深層崩壊や大規模な土石流等が発生したときの地盤振動を数十 km 離れた位置でも検知できる⁴¹⁾。国土交通省では高感度の地震観測網を利用して、深層崩壊の位置を準リアルタイムで把握するシステムや観測局の整備が進められている。

高感度の振動センサは地震時にも地盤振動を検知するため、検知した地盤振動の原因が深層崩壊等の土砂移動か地震か判定することが検知情報の精度向上の重要なポイントとなる。そこで、過去の深層崩壊や地震時の地盤振動のデータを収集し、低周波の地盤振動にも着目して、それらの特徴を整理した。

7.2. 深層崩壊と地震による地盤振動の特徴

7.2.1. 使用したデータと地盤振動の解析方法

国立研究開発法人防災科学技術研究所の高感度地震観測網 Hi-net が整備された時期以降の全国の深層崩壊発生時の地盤振動データを収集するとともに規模の異なる地震時の振動データも収集した。

地盤振動の特徴を把握する上で、地盤振動波形の立ち上がりの形状や振動の継続時間、卓越周波数、平時の地盤振動と現象発生時の振幅の比率に着目して検討した。周波数特性については、深層崩壊等の波形立ち上がり箇所の波形データを抽出し、高速フーリエ変換 (FFT) で周波数スペクトルを求め、0.5~1Hz、1~2Hz、2~3Hz という具合に 1Hz 毎に 20Hz まで、シグナルとバックグラウンドノイズの平均値とそれらの比率を求め、最も比率の大きいところを卓越周波数とした。なお、検知した観測局間で卓越周波数の値に揺らぎがあるため、最頻値と最大と最低の卓越周波数の範囲を整理した。

平常時と現象発生時の地盤振動の振幅については、地盤振動データから式 (7.1) に示す RMS 値 (Root Mean Square) を求め、深層崩壊発生時の振幅を示す値として、2 秒間の RMS 値の平均値を STA (Short Term Average)、また、平常時の振幅を表す値として 60 秒間の RMS 値の平均値・LTA (Long Term Average) を定義し、各現象の値を比較した。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (y(n))^2} \quad (7.1)$$

$y(n)$: n サンプル目の波形データ N : データ個数

振動の継続時間については、STA/LTA が 1.75 を 4 秒超えた時刻から 1.2 倍を 3 秒下回った時刻までとした。波形の形状については、定性的であるが、図-7.1 に示すような大きな振幅となる前に先行した振動の有無と波形の立ち上がりの緩・急等を確認した。

地震については、深層崩壊時の地盤振動とよく似ているとされる海外を震源とするマグニチュード 5 以上、震央距離 $L=2,000\text{km}$ 以上の地震（ここでは「遠地地震」と呼ぶ）について解析を行った。

7.2.2. 深層崩壊と地震による地盤振動の特徴

深層崩壊発生事例のうち、Hi-net 等で地盤振動の波形の立ち上がりが確認できた 20 事例と遠地地震による地盤振動の特徴を整理した結果を表-7.1 に示す。深層崩壊と地震の卓越周波数は似ているものもあるなど、深層崩壊と地震を明確に区分できる単純な判別できる指標はないことがわかったが、いくつか注目すべ

き指標がある。

その1つは先行振動の有無であり、先行振動があれば深層崩壊と考えられる。図-7.2 に示すように遠地地震のほとんどは1~2Hzで、それ以外のものでも2~3Hzであり、4Hz以上のものはないのに対し、深層崩壊では1~2Hzのものが多いが、3~7Hzの事例もある。

振動継続時間についても、図-7.3 に示すように10~30秒程度のものが多いのに対し、遠地地震はもっと長いものが多く、深層崩壊には地震と異なり3分を超えるような事例はなかった。また、STA/LTA については図-7.4 に示すように深層崩壊には100を超えるようなものはない。また、振幅の大きくなっている範囲も着目すべきと考えられ、図-7.5 に示すように遠地地震の場合は、全国の観測局で振動を検知していることがわかる。

先行振動の有無、振動継続時間、STA/LTA、地震と深層崩壊を判別できるケースも多いと考えられる。ただし、平成26年度の南木曽災害のように観測局の直近で生じた土砂災害については、注意が必要と考えられる。

7.3. 深層崩壊と地盤振動の低周波振動の特徴

国土交通省の大規模土砂移動検知システムの観測所や防災科学技術研究所の広帯域地震観測網(F-net)の振動センサは0.01~0.1Hzといった低周波振動に対しても感度が高いものを用いている。平成23年台風12号赤谷地区の深層崩壊発生時に、全国のF-net観測網

振幅の大きな立ち上りに先行した小振幅の振動

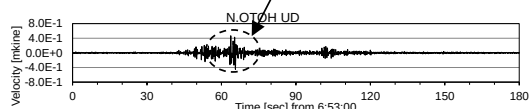


図-7.1 先行振動の例

表-7.1 深層崩壊と地震による地盤振動の特徴

項目	深層崩壊	遠地地震(海外)
振動波形の形状(先行振動)	・先行振動があるが、ない場合もある	・先行振動なし ^{※1}
振動波形の形状(立ち上がり形状)	・緩い場合と急な場合がある	・立ち上がりは急なものが多い
振動波形の形状(立ち上がりの数)	・立ち上がりの数は1~2つ	・立ち上がりの数は様々である
振動継続時間	・十数秒~3分	・十数秒~4分以上
卓越周波数(卓越)	・1~2Hzがほとんど ・4~5Hz、6~7Hzのケースもある。	・1~2Hzがほとんど ・4Hz以上のものはない
STA/LTA最大値 ^{※2}	・4~50程度	・4~200以上 ・100を超えるものもある

※1 フルレンジで波形をグラフ化すると、先行振動があるように見えるが、実際には先行部分の振幅が大きく、深層崩壊と同程度のレンジでプロットすると先行振動がなく、立ち上がりも急なものが多い

で深層崩壊に伴う低周波の地盤振動が確認されており、その震動特性を確認した。

7.3.1. 深層崩壊時の低周波地盤振動

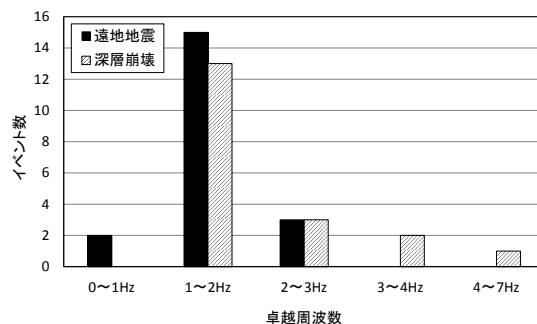


図-7.2 深層崩壊と遠地地震の地盤振動の卓越周波数

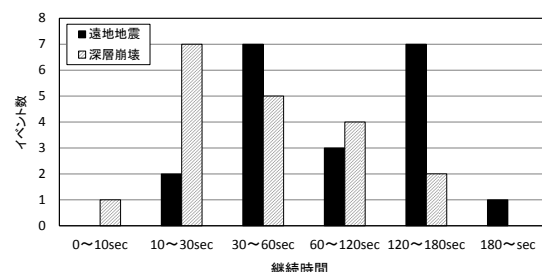


図-7.3 深層崩壊と地震による地盤振動の継続時間

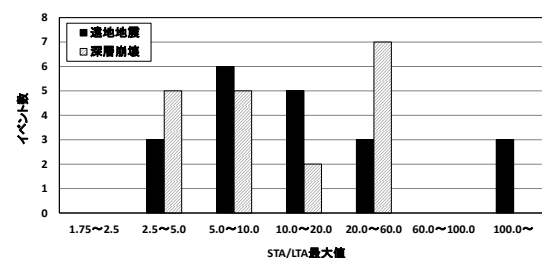


図-7.4 深層崩壊と地震による地盤振動のSTA/LTA比

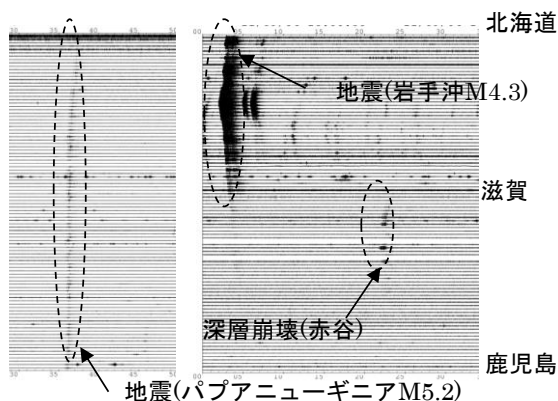


図-7.5 遠地地震と深層崩壊のHi-net100 トレース

深層崩壊時に広域で低周波振動が確認できた平成23年の台風12号による奈良県赤谷地区と静岡県水窪地区の深層崩壊事例について、X・Y・Zの3成分の振動データを機器特性補正、フィルタリング、積分演算を行うことにより0.01~0.1Hzの変位波形を求め、変位を2次元的にプロットしたパーティクルモーションを作成した(図-7.6)。赤谷地区、水窪地区の事例では地盤振動は深層崩壊の土砂の移動方向と同じ方向に変位していることがわかった。

7.3.2. 地震時の低周波振動の特徴

地震時の低周波振動の地盤変位は地表面を伝搬する表面波であるLove波やReyleigh波の特徴を示す波形が確認された(図-7.7)。

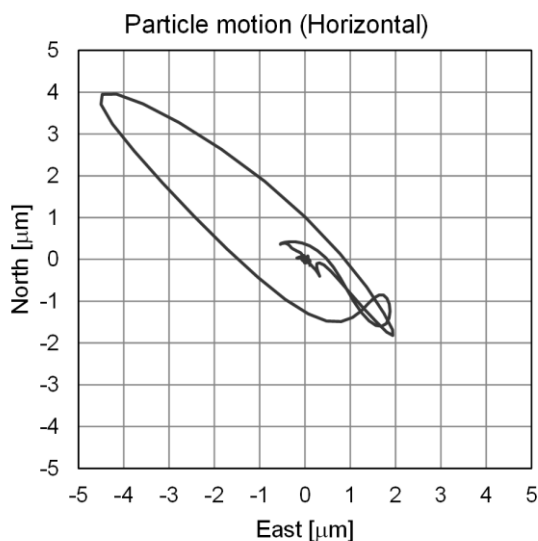


図-7.6 赤谷地区の深層崩壊時のパーティクルモーション(水平方向)

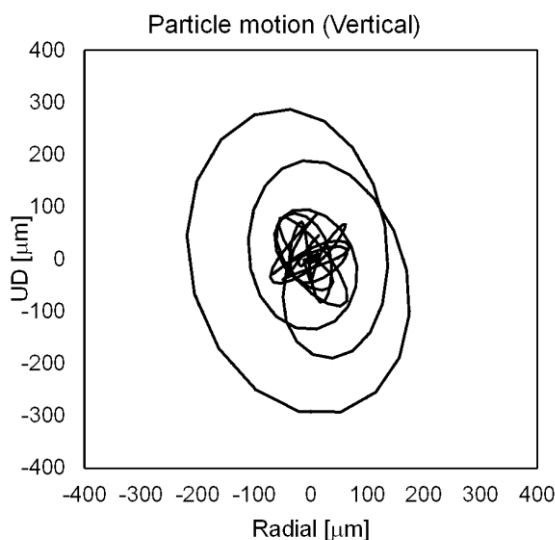


図-7.7 国内大規模地震のパーティクルモーション(鉛直方向)(平成26.11.22 長野県北部)

7.4. まとめ

本研究では、地盤振動波形の特徴や継続時間などの諸元、振動の広がり、低周波振動に着目することで、その震源は深層崩壊か地震なのかある程度は判別することができることがわかった。なお、様々な深層崩壊時の地盤振動を収集し、その特徴を把握したが、今後は、地震波形の伝搬のメカニズムの解明や震源種別の自動判定方法を研究していく必要がある。

8. おわりに

本研究は、現在運用されている土砂災害警戒情報の精度向上に繋がる技術開発と、実際に避難に関する勧告等を発令する市町村の意志決定を補助する情報作成手法の構築を目的として実施された。

前者について、まず、地形・土質条件を加味した降雨を指標とする斜面崩壊の発生危険度評価手法「idH-SLIDER法」を開発した。本手法は、降雨強度と降雨継続時間でもとめられる崩壊発生限界雨量とハイトグラフから崩壊発生時刻を予測する手法である。平成21年7月に山口県防府市で発生した斜面崩壊等を対象として検証し、的中率とカバー率ともに7~8割程度の高い結果を示すことがわかった。つぎに、現在報告されている発生時刻は、住宅や道路など周辺で発生した事象が覚知された時刻と降雨の状況を照らし合わせて推定されているほか、災害に繋がらない斜面崩壊等の事象が発生した時刻は全く分かっていないことから、正確な土砂移動現象発生時刻を記録するための安価かつ簡易な「土砂移動時刻ロガー」を開発し、現地における実証実験を行い機能と耐候性などの評価を実施し、実用に供しうるレベルであることが確認された。さらに、斜面単位の危険度の評価手法や機器の開発に加え、流域単位あるいは地域単位での大規模な土砂移動現象発生時の監視技術として、高感度な振動センサから得られたデータを解析し、大規模な土砂移動現象の発生位置を推定する手法を開発した。

後者について、マルチエージェントモデルを用いた避難時間の算定手法を提案し、ケーススタディを実施した。これによって、避難を開始のタイミングによる所定の避難所までの到達状況の違いや避難路・避難場所の障害を可視化することができた。近年防災対策において注目されている「タイムライン」に資するほか、避難場所や避難方法の点検および避難訓練への活用が期待される。

開発された技術の実用化、高度化に向けて以下のような課題がある。

- 1.idH-SLIDER 法の実施には、土質定数と土層厚のデータが不可欠である。本研究では、表層崩壊マニュアルに基づいていることから、対象となる斜面で密に簡易貫入試験を実施する必要がある時間と費用を要する。このため、手法の普及には、より簡易な土層厚の計測手法と標準的あるいは地域の代表的な計測範囲の設定手法を開発するなど、基礎データ取得方法の簡素化、効率化が不可欠である。
- 2.振動センサ等の観測データによる大規模土砂移動監視においては、検知アルゴリズムの精度向上に引き続き取り組んで行く必要がある。
- 3.きめ細かな情報作成手法に関しては、その中心技術であるマルチエージェントモデルに用いる斜面崩壊危険度評価手法における課題に加え、作成された情報の利用者に応じた提供方法、提供内容を実証実験を行うことにより深めていく必要がある。

謝辞

第2章の研究にあたり航空レーザ計測データをご提供いただいた国土交通省中国地方整備局山口河川事務所に厚くお礼申し上げます。

第4章の研究を実施するにあたり、京都大学防災研究所附属徳高砂防観測所には試験地および観測データをご提供頂いた。ここに記して謝意を表します。

第5章の研究で使用したデータの一部は、国土交通省近畿地方整備局六甲砂防事務所の所有するシステムを使用させていただきました。ここに厚く感謝の意を表します。

第7章の研究で使用したデータのうち、国立研究開発法人防災科学技術研究所の高感度地震観測網Hi-netのデータを使用した。ここに厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1)秋山怜子・木下篤彦・内田太郎・高原晃宙・石塚忠範：簡易な水文モデルを用いた崩壊発生時刻予測手法，砂防学会誌，No.2，Vol.68，2015
- 2)松澤真・木下篤彦・高原晃宙・石塚忠範：花崗岩地域における土層構造と表層崩壊形状に与える山地の開析程度の影響，地形，No.1，Vol.36，p.23-48，2015
- 3)高原晃宙・松澤真・木下篤彦・石塚忠範・龍見栄臣・大野亮一：地形の開析状況に着目した斜面の自動分割手法について，平成26年度砂防学会研究発表会概要集B，p.294-295，2014
- 4)水谷佑・能和幸範・吉永子規・高原晃宙・木下篤彦・石塚忠範：安価かつ簡素な土砂移動時刻記録装置の開発と土石流発生時刻の検知事例，砂防学会誌，No.5，Vol.67，p.49-54，2015
- 5)高原晃宙，木下篤彦，水谷佑，石塚忠範，石田哲也，海原莊一，浅原裕：平成25年伊豆大島豪雨災害時の表層崩壊・土石流の地盤振動及び発生位置推定手法，第7回土砂災害に関するシンポジウム，2014
- 6)木下篤彦・高原晃宙・林真一郎・船戸総久・海原莊一・浅原裕：高感度地震観測網等で計測する土砂移動現象及び地震時の地盤振動の特徴，平成27年度砂防学会研究発表会概要集B，p.138-139，2015
- 7)秋山怜子・木下篤彦・高原晃宙・石塚忠範・一言正之・杉山実：土砂災害の時間変化と避難時間に関する研究，第7回土砂災害に関するシンポジウム，2014
- 8)独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム：表層崩壊に起因する土石流の発生危険度評価マニュアル（案），土木研究所資料，No.4129，37pp.，2009
- 9)Rosso,R.， Rulli, M.C. and Vannucchi, G. : A physically based model for the hydrologic control on shallow landsliding , Water Resources Research, Issue 6, Volume 42, W06410, 2006
- 10)Caine, N. : The Rainfall Intensity: Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows, Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography, No. 1/2, Vol. 62, pp. 23-27, 1980
- 11)Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, and Stark CP : The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update, Landslides, Vol.5, p.3-17, 2008
- 12)内田太郎・盛伸行・田村圭司・寺田秀樹・瀧口茂隆・亀江幸二：場の条件の設定手法が表層崩壊発生箇所の予測に及ぼす影響，砂防学会誌，No.1，Vol.62，p.23-31，2009
- 13)内田太郎・秋山浩一・石塚忠範：表層崩壊発生場所と発生降雨量の関係の予測，平成23年度砂防学会研究発表会概要集，p.130-131，2011
- 14)Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E. : A physically based model for the topographic control on shallow landsliding , Water Resources Research, No.4, Vol.30, p.1153-1171, 1994
- 15)NPO 法人山口県防災・砂防ボランティア協会：平

- 成 21 年 7 月 21 日土石流災害に伴う「土石流前兆現象・避難状況実態調査」及び「被災体験証言」報告書, 56pp., 2011
- 16) 山越隆雄・中野陽子・田村圭司・長谷川祐治・正沢勝幸: 平成 21 年山口豪雨災害時に剣川で発生した土石流に関する一考察, 平成 22 年度砂防学会研究発表会概要集, p.267-268, 2010
- 17) 太田岳史・福寫義宏・鈴木雅一: 一次元鉛直不飽和浸透をもちいた雨水流出特性の検討, 日本林学会誌, No.4, Vol.65, p.125-134, 1983
- 18) Uchida, T., Asano, Y., Ohte, N. and Mizuyama, T.: Analysis of flowpaths dynamics in a steep unchannelled hollow in the Tanakami Mountains of Japan, Hydrological Processes, Vol.17, p.417-430, 2003
- 19) 若月 強・石澤岳昂・植竹政樹・川田真也: 2009 年 7 月防府市・山口市豪雨災害において花崗岩斜面に発生した土石流と斜面崩壊の特徴, 防災科学技術研究所 主要災害調査, Vol.44, p.39-51, 2010
- 20) 山本慎一・今岡照喜・金丸龍夫・田結庄良昭: 山口県中南部, 白亜紀防府花崗岩バソリスの岩石学的特徴と帯磁率異方性: 貫入・定置機構の解明に向けて, 地球科学, Vol.40, pp415~429, 2006
- 21) 山田孝・南哲行・水野秀明: 土石流災害防止のためのセンサー開発の現状と今後の課題, 砂防学会誌, No.5, Vol.50, p.60-64, 1998
- 22) 西村義・幸田学・山口昌志: 斜面崩壊検知センサーによる表層崩壊の検知について～石狩川上流における事例～, 第 61 回平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集, p.652-653, 2011
- 23) 藤田正治・澤田豊明・水山高久: 山地流域における土砂動態のモニタリング手法, 京都大学防災研究所年報, 第 46 号 B, 2003
- 24) 水谷佑・高原晃宙・木下篤彦・石塚忠範: 土砂移動発生時刻の記録を目的とした安価かつ簡素な機器の開発, 土木技術資料, 平成 26 年 8 月号, p44-45, 2014
- 25) 水谷佑・能和幸範・吉永子規・高原晃宙・木下篤彦・石塚忠範: 安価かつ簡素な土砂移動時刻記録装置の開発と土石流発生時刻の検知事例, 砂防学会誌, No.5, Vol.67, p.49-54, 2015
- 26) 内閣府(防災担当): 避難勧告等の判断・伝達マニュアル作成ガイドライン(案), p.99, 2014
- 27) 富田陽子・秋山怜子・岡本敦: 「土砂災害警戒情報」及び「土砂災害警戒情報を補足する情報」の運用実態, 砂防学会誌, No.1, Vol. 66, p.53-57, 2013
- 28) 堀宗朗・犬飼洋平・小口健二・市村強: 地震時の緊急避難行動を予測するシミュレーション手法の開発に関する基礎的研究, 社会技術研究論文集, Vol.3, p.138-145, 2005
- 29) 国土交通省都市局: 津波避難を想定した避難路、避難施設の配置及び避難誘導について(第 3 版), p.230, 2013
- 30) 熊谷兼太郎: 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動への津波避難シミュレーションの適用性, 国土技術政策総合研究所資料, No. 742, p.22, 2013
- 31) 水野秀明・鈴木拓郎・小山内信智・倉本和正・金本満: 土石流発生時の住民避難行動に関する考察, 平成 22 年度砂防学会研究発表会要旨集, p223, 2010
- 32) 木下篤彦・神野忠広・岡本敦・一言正之・小野寺勝・桜庭雅明・杉山実: 六甲山系におけるリアルタイムハザードマップシステムの構築, 砂防学会誌, No.1, Vol. 66, p.15-22, 2013
- 33) 水野正樹・富田陽子・桂真也・小山内信智・花田良太・安田武道: 災害情報を用いた土砂災害時の住民の避難率の分析, 砂防学会誌, No.3, Vol.65, p.29-34, 2012
- 34) 西畑剛・森屋陽一・田村保・瀧本浩一・三浦房紀: 津波浸水時の避難条件に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 52 巻, 1256-1260, 2005
- 35) 津波避難ビル等に係るガイドライン検討会・内閣府政策統括官(防災担当): 津波避難ビル等に係るガイドライン, p.73, 2005
- 36) 源貴志・成行義文・藤原康寛・三神厚: 津波避難シミュレーションシステムの開発と地区の避難安全性評価への適用, 第 30 回土木学会地震工学研究発表会論文集, 2009
- 37) 国土交通省水管理・国土保全局 河川環境課水防企画室: 洪水ハザードマップ作成の手引き(改訂版), 2013
- 38) 目黒公郎・織田浩平: 津波災害時の避難行動シミュレーションモデルの開発, 生産研究, No.4, Vol.57, p.155-159, 2009
- 39) 中小河川計画検討会: 中小河川計画の手引き(案)～洪水防御計画を中心として～, 1999
- 40) 佐藤栄治・吉川徹・山田あすか: 地形による負荷と年齢による身体能力の変化を勘案した歩行換算距離の検討: 地形条件と高齢化を勘案した地域施設配置モデル その 1, 日本建築学会計画系論文集,, p.133-139, 2006

- 41)大角恒雄・浅原裕・下川悦郎：2004 年8月10 日
奈良県大塔村斜面土砂移動時の Hi-net データ解析-
斜面土砂移動検知への応用-, 自然災害科学, No.3,
Vol.24, p.267-277, 2005

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR SEDIMENT-RELATED DISASTER WARNING USING REAL-TIME MONITORING DATA

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2014

Research Team : Volcano and Debris Flow Research Team

Author : ISHIZUKA Tadanori

SHIMIZU Yoshikazu

KINOSHITA Atshuhiko

TAKAHARA Teruyoshi

Abstract : The Sediment-related Disaster Warning Information is used to support early warning system (EWS) of local government. However, the issues that are weak arguments about difference of topography and geology have been pointed out, and it is required to establish technology to create dangerous information for warning and evacuation.

This study has mainly four purposes toward usable information for EWS of local government. First is accuracy improvement against region and event with a few disaster records. Second is accuracy improvement with taking into topographical and geological features. Third is development of more urgent information with other indices than only rainfall data. Last is development of detailed study of warning information in smaller administrative units, which based on research administrative areas of the Sediment-related Disaster Warning Information.

Key words : Shallow landslide susceptibility, idH-SLIDER method, degree of dissection, Multi-Agent System, Early Warning System (EWS)