

研究概要・成果の要旨

研究テーマ：既往災害データならびに水文データの解析に基づく六甲山の土砂災害将来予測

研究代表者： 小杉賢一朗（京都大学）

【研究概要】

昭和 42 年 7 月豪雨により土砂災害が発生し甚大な被害をもたらした六甲山では、その後、これを超える規模の「豪雨による土砂災害」は発生していない。しかしながら、気候変動に伴う降雨特性の変化により、今後、土砂災害が頻発化・激甚化する可能性が考えられる。本研究では、六甲山における降雨パターンと土砂移動パターンの対応に関する解析、ならびに六甲山における近年および将来の降雨パターンの特徴の解析に基づき、今後の土砂動態・土砂災害の傾向を検討した。

【研究成果の要旨】

近年、六甲山において土砂災害を発生させた降雨イベントの降雨パターンと土砂移動特性を解析したところ、降雨強度が大きい降雨では、土層と風化基岩の境界部において発生した地下水の水位が上昇することによって、遷急線に沿った急勾配斜面が崩落する傾向が強いこと、積算雨量が多い降雨では、斜面の土層内ならびに風化基岩層内に浸透した水が斜面下部に集中し湧水量を増大させることによって、湧水点周辺の小規模な崩壊が多発する傾向が強いことが明らかとなった。このような傾向は、数値シミュレーションによっても再現された。

開発した数値シミュレーションによる計算結果と、六甲山における地下水位・土壌水分の観測結果を分析することによって、深層崩壊型、湧水誘因型、表層崩壊型の土砂移動の各々の危険性が特に高まる降雨パターンを推定した。さらに、創生・統合プログラム 5km 格子 NHRCM 日本域気候予測データセットの過去シナリオ、2℃上昇シナリオ、4℃上昇シナリオのそれぞれに基づく 20 年分の時間雨量データを使用して、六甲山における将来予測降雨の傾向を分析した上で、六甲山における土砂災害の将来予測を行った。その結果、次の成果が得られた。

- ◆ 温度上昇に伴う将来の気候変動によって、六甲山周辺のいずれの地域においても、過去の降雨規模を上回る降雨イベントが発生し、土砂災害の発生危険度が高まることが推定された。土砂移動形態に関しては、いずれの地域でも、将来的に表層崩壊型、湧水誘因型、深層崩壊型のいずれの型の土砂移動も発生し得ることが推定された。
- ◆ 将来的な土砂移動危険度の増加は六甲山西部と六甲山南部のメッシュで顕著に大きことが推定された。これらのメッシュでは深層崩壊型の土砂移動危険度の増加が最も顕著であり、湧水誘因型、表層崩壊型が続くという推定結果となった。
- ◆ 湧水誘因型の土砂移動の危険性を相対的に高める降雨イベントの数は、いずれのメッシュでも将来的に増加することが予測された。
- ◆ 表層崩壊型の土砂移動の危険性を相対的に高める降雨イベントの数は、気温 2℃上昇シナリオに比べ 4℃上昇シナリオで概して多くなる傾向が認められた。

最後に、今後の課題について検討した。本研究に関しては、解析において幾つかの仮定を設けていること、数量や精度が限られたデータに基づいていること、手法による実現象の再現が不十分である点が見られるなど、幾つかの改善の余地があり、成果の精度を高めるための研究を継続していく必要があることが考察された。

河川砂防技術研究開発 【成果概要】

氏 名（ふりがな）		所 属		役 職
①研究代表者		小杉賢一朗（こすぎけんいちろう）		京都大学農学研究科 教授
②研究テーマ	名称	一般型：既往災害データならびに水文データの解析に基づく六甲山の土砂災害将来予測		
③研究経費（単位：万円）		令和6年度	令和7年度	令和8年度
※端数切り捨て。		231万円	267万円	0万円
総 合 計 498万円				
④研究者氏名（研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）				
氏 名		所属機関・役職（※令和6年3月31日現在）		
宮田秀介		京都大学農学研究科・准教授		
正岡直也		京都大学農学研究科・助教		
⑤技術研究開発の目的・目標（様式地砂-1、地砂-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。）				
（背景・課題）六甲山では、昭和13年阪神大水害および昭和42年7月豪雨により土砂災害が発生し甚大な被害を引き起こしているが、その後は、豪雨による大規模な土砂災害の発生は見られずにいた。ところが近年、平成25、26、27、30年の豪雨によって立て続けに斜面崩壊・土石流の発生が報告され、近い将来、再び大規模な被害が引き起こされることが懸念される。平成25、26、27、30年の豪雨は、降雨強度が大きいものや累積雨量が大きいものなど互いに特徴が異なり、それぞれ異なる場所で土砂移動が発生している。また、これまでの六甲山における斜面地下水観測結果は、地下水位を大きく上昇させる降雨パターンが地点ごとに異なっていることを示唆している。これらのことから、「気候変動に伴う降雨の激甚化」により発生する六甲山の土砂災害を正確に予測するにあたり、降雨パターンと土砂移動との対応を明らかにすることが重要な課題になると考えられる。 （目的）六甲山における近年の豪雨の特徴とそれに対応した斜面崩壊・土石流発生傾向を、昭和42年災害との比較に基づき分析する。また、六甲山における斜面地下水位や土壌水分の変動と降雨パターンの対応関係を明らかにする。以上の結果に基づき、今後予想される「気候変動に伴う降雨の激甚化」によって、六甲山においてどのような土砂災害が起こり得るのかについて定量的な検討を加える。 （調査・研究内容及び成果）近年の豪雨の特徴（降雨パターン）と、それらによって引き起こされた斜面崩壊・土石流の特徴（地質、地形、土地利用、既往歴など）を詳細に調査する。また六甲山の各地点において観測された地下水位・土壌水分のピークを予測するのに最適な雨量指標を特定する。これらの結果を、六甲山における「気候変動を考慮した降雨パターンの将来予測」と組み合わせることによって、今後、六甲山において予測される土砂災害の特徴を明らかにする。				

⑥研究成果

1. 2014年災害と2018年災害の分析

1.1 西滝ヶ谷流域における降雨と崩壊地の特徴

六甲山においては、2014年8月5～10日の豪雨と2018年7月4～7日の豪雨によって多くの崩壊が発生している。

図-1には、六甲山住吉川水系の西滝ヶ谷流域内にある西おたふく山に設置された雨量計による、時間雨量と積算雨量を示した。2014年豪雨は降雨強度が強い降雨イベント、2018年豪雨は積算雨量が多い降雨イベントであることがわかる。

図-2a は、西滝ヶ谷流域において 2014、2018 年豪雨により新たに発生した崩壊地について、崩壊面積と集水面積（崩壊地より上流側の流域面積）の関係を示したものである。また図-2b は、これらの崩壊が密集して発生したエリアの地形と壊地の位置を示したものである。図-2a より、2014 年の崩壊地は概して集水面積が小さいことがわかる。この結果と図-2b の崩壊地の分布状況より、2014 年の崩壊の大半は遷急線上に位置し、遷急線の上流側への拡大現象に伴う土砂移動であったことが推察された（以下、遷急線拡大型と呼ぶ）。一方で 2018 年の崩壊については、集水面積が大きく崩壊面積が小さいものが多数存在していることがわかる。崩壊地分布からは、これらの崩壊地は斜面下部に位置しており、地下水の湧水点周辺において、湧水量の増加による土層内の地下水位上昇に起因して発生したものと推察された（以下、湧水誘因型と呼ぶ）。加えて 2018 年には、崩壊面積が大きいタイプが存在しているが、これらはさらに集水面積が大きいタイプ C と小さいタイプ D に分けられた。タイプ C の崩壊は、1 次谷源頭部に存在しており、地形の特性により谷に集中した雨水によって引き起こされた土石流に近い現象と考えられた（位置図は省略）。一方のタイプ D の崩壊は、六甲山の主稜線に沿った場所で起きていた（位置図は省略）。現地調査結果に基づくと、この崩壊は風化基岩層を巻き込んだ深層崩壊的な特徴を有していることが推察された。

1.2 降雨パターンと土砂移動の関連性

上記の結果に基づき、特に遷急線拡大型と湧水誘因型の崩壊に着目して、降雨パターンと土砂移動の関連性について図-3 に示すとおり推察した。

まず、2014 年災害を引き越した降雨は、降雨強度が強い特徴を有していた。このような降雨では、不飽和土層において急速な鉛直次元浸透が起きる。そして浸潤前線が土層と風化基岩の境界部に達すると、この境界部において地下水が発生する。この地下水発生はどの場所でも起こり得るが、特に遷急線の近くでは、過去の崩壊によって土層が薄くなっているためにより頻繁かつ急激な水位上昇が起きると考えられる。さらに、過去の崩壊によって地形が局所的に急勾配となっている。これらが誘因・素因となって、他の場所よりも崩壊に対する安全率がより大きく低下すると考えられる。この結果、2014 年豪雨時には、主として遷急線拡大型の崩壊が発生したと推察される。

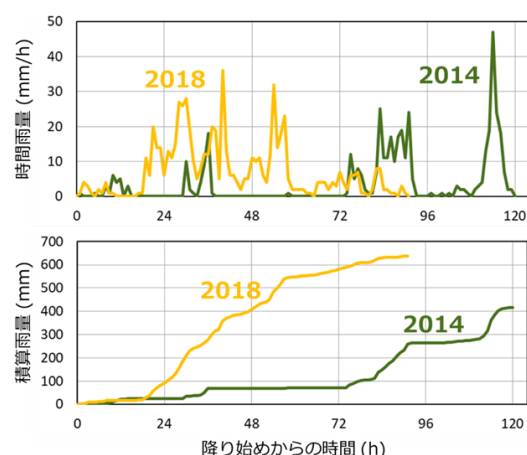


図-1 2014、2018 年豪雨の時間雨量と積算雨量
六甲砂防事務所西おたふく山観測所のデータを使用。

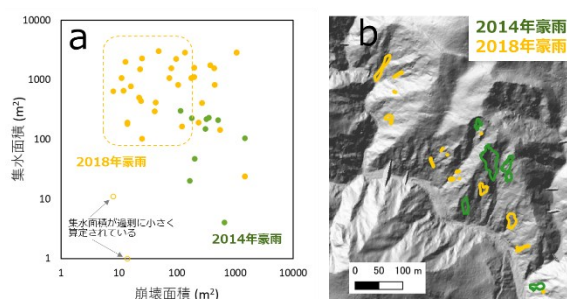


図-2 (a)西滝ヶ谷流域における 2014、2018 年豪雨による新規崩壊地の地形的特徴と(b)崩壊密集エリアの状況

パネル a の中抜き○は集水面積が過剰に小さく見積もられたデータであり、補正後の集水面積を使用したデータを追記している。

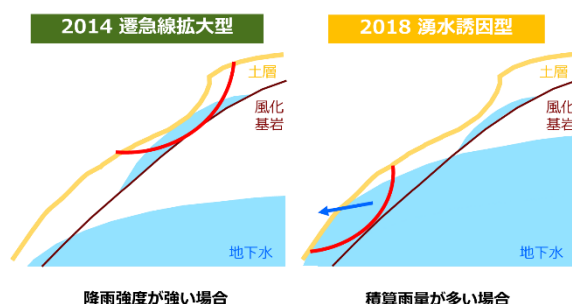


図-3 2014、2018 年豪雨による崩壊の発生メカニズム（推察）

一方、2018 年災害を引き起こした降雨は、積算雨量が多い特徴を有していた。このような降雨では、斜面の土層内もしくは風化基岩層内に浸透した雨水が側方流となって、斜面下部に集中する現象が顕著となる。側方流の集中は、土層内の水位を大きく上昇させることによって崩壊を引き起こすと考えられる。特に六甲山の場合、風化した花崗岩内に多くの雨水が浸透することが報告されており、長時間にわたる多量の雨水の供給によって風化基岩層内の地下水位が大きく上昇し、土層内への湧水量が劇的に増加したものと推察される。

1.3 数値シミュレーション

遷急線拡大型と湧水誘因型の崩壊に着目し、数値シミュレーションによる検討を加えた。

計算は図-4 に示す 2 次元斜面を仮定して行った。斜面の奥行きは約 30 m で、土層と基岩の境界は 40° に傾いている。斜面上端から水平距離 5 m の位置に遷急線を想定し、過去の斜面崩壊に伴う急崖を設定した。土層厚は斜面上部の 2.0 m に対し、遷急線直下では 0.4 m とした。遷急線から斜面下部に行くにつれて土層は次第に厚くなるが、斜面中央より下部では一律に 1.6 m とした。基岩の風化層の厚さは約 11 m で、斜面下部では次第に薄くなるように設定して、基岩全体が台形領域となるようにした。

土壌と基岩の保水性と透水性は、Kosugi (1999) による式を用い、パラメータは Kosugi (1997a, b) と Katsura et al. (2009) に基づき表-1 の様に設定した。地表面については、雨量を与えて計算を進め、土層内の飽和帯が地表面に達した部分では浸潤面境界に切り替え、流出フラックスを算定した。他の境界線では水の出入りが無いものとした。計算の初期条件は、一定強度 (0.115 mm/h) の雨を与え続けることによる定常状態とした。

各節点の圧力水頭値を 1 時間毎に出力し、この値を用いて、円弧滑りを仮定したフェレニウス法に基づく斜面安定解析を実施した。ここで、斜面崩壊は土層と基岩の境界面に接する円弧で切り取られる土層領域で発生するものとし、斜面末端から 0.2 m の範囲は固定され崩壊しないものと仮定した。これは、計算ドメインの形状に起因して斜面末端部の安全率が下がり過ぎてしまうことを回避するための便宜的な措置であるが、実現象としては、河道に堆積した巨礫等により斜面末端部が固定されていることに対応する。土粒子の密度は 2.65 g/cm^3 とし、土壌の粘着力と内部摩擦角は標準的な値 (それぞれ 10 gf/cm^2 , 44°) に設定した。

結果を図-5 に示す。図-1 の 2014 年豪雨の降雨波形を与え、時間雨量がピーク (47 mm/h) に達した時の、斜面内部の圧力水頭分布と安全率が最小となった円弧が図-5a である。遷急線付近では土層と基岩の境界面に沿って地下水帯が形成されているが、これは、土層が薄いため降雨が境界面まで素早く到達したことが原因となっている。基岩内部については、下流側で地下水位が上昇し斜面末端部で土層内に湧出しているが、土層内の地下水帯はそれほど大きくはなっていない。安全率が最小となる円弧は斜面上部の遷急線付近に存在しているが、これは、土層と基岩の境界面に沿った地下水帯の形成と過去の崩壊に伴う急勾配地形が、それぞれ誘因と素因になっているものと考えられる。

次に、2018 年豪雨のシミュレーション結果に関して、安全率が最小となった時刻における圧力水頭分布と安全率最小円弧を図-5b に示した。図-5a と比べ、基岩内部の地下水帯が大きく拡大し、基岩からの湧水量が増えることによって土層内の地下水位が大きく上昇していることがわかる。この地下水上昇が誘因となり、安全率が最小となる円弧は斜面の下部に位置していた。

表-1 計算に用いた土壌と基岩のパラメータ

種類	θ_s	θ_r	$\psi_m \text{ (cm)}$	σ	$K_s \text{ (cm/s)}$
土層	0.621	0.399	-33.4	1.42	0.01691
基岩	0.291	0.244	-29.4	0.74	0.00034

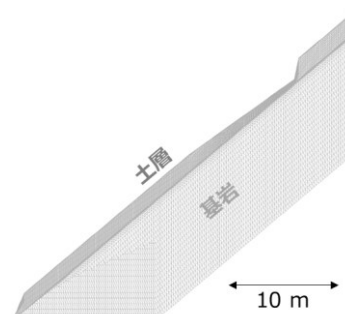


図-4 三角形要素に分割した計算領域

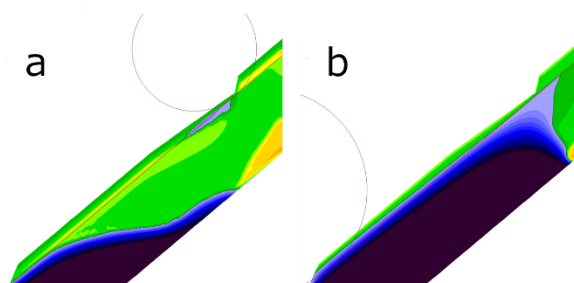


図-5 (a)2014, (b)2018 年豪雨に関するシミュレーションによる圧力水頭分布と安全率最小円弧
圧力水頭の塗り分けの区画は 10cm。黒線が圧力水頭ゼロ cm に対応し、青色は地下水帯を表す。赤線は土層と基岩の境界を表す。

以上のシミュレーション結果は、2014 年豪雨と 2018 年豪雨における降雨パターンと崩壊パターンの対応関係 (図-3) と定性的に符合するものであったが、計算された安全率の絶対値には矛盾も認められた。具体的には、2018 年豪雨では「斜面上部の遷急線付近の円弧の安全率」も 1 を下回っており (むしろ 2014 年豪雨よりも低下量は大きい)、この豪雨の際にも遷急線拡大の崩壊が発生する計算結果となっていることは、実際の崩壊実態と矛盾している。実際の斜面では、土層や基岩の透水性、保水性、強度の空間的な不均質性や、崩壊が繰り返ることによる斜面形状の変化が崩壊発生に影響することが考えられ、本研究のモデルではこの点が考慮されていないことが原因となっている可能性が考えられる。

2. 六甲山における降雨パターンと土砂移動パターンの対応

ここでは、六甲山における各種の土砂移動を引き起こす可能性の高い降雨パターンについて、実効雨量を用いた解析により推察した。

まず湧水誘因型の崩壊については、1.3 節のシミュレーション手法を活用して検討を加えた。具体的には、計 70 回の仮想豪雨イベントに関して計算を行い、それぞれのイベントにおいて、図-5 に示した斜面上部円弧と斜面下部円弧の「イベント中の最小安全率」を比較した。斜面下部円弧の最小安全率がより小さくなるイベントは「湧水誘因型の崩壊が多発する危険性が相対的に高くなる降雨イベント」と見なすことができると考え、その様なイベント (B タイプとする) をカウントしたところ、70 回中の 4 回が該当することが判明した。その 4 回の降雨イベント (B タイプ_1~4) について、降雨開始から安全率が最小となる時間までのスネーク曲線を図-6 に示した。ここでは、横軸実効雨量の半減期を 73 h、縦軸実効雨量の半減期を 1.5 h に設定している。図中には、B タイプ以外の降雨イベント (A タイプ: 斜面上部円弧の最小安全率がより小さくなるイベント) のスネーク曲線を灰色○で示しているが、B タイプ降雨イベントのスネーク曲線のいずれもが、A タイプ降雨イベントのスネーク曲線の最大値 (図中の灰色線) を超過していることがわかる。このことから、降雨パターンの分析において、このスネーク曲線の増大に着目することにより、斜面下部の円弧の安全率が大きく低下し、湧水誘因型の崩壊の発生危険度が特に高くなる状況を推察できる可能性が考えられる。横軸実効雨量の半減期と縦軸実効雨量の半減期を様々に変化させて図-6 と同様の検討を行った結果、図-7 に水色○で示した半減期の組合せによるスネーク曲線が、このようなスネーク曲線に該当することが判明した。

次に、深層崩壊型の土砂移動については、六甲山住吉川水系内の 2 流域における地下水位観測結果に基づきスネーク曲線の半減期の推定を行った。具体的には、斜面上部もしくは稜線上の厚い風化基岩層を有する地点における基岩地下水位の観測結果に基づき、豪雨時の地下水位上昇との整合性が高くなる実効雨量半減期の組合せを特定した。その結果、図-7 に橙色○で示した半減期の組合せによるスネーク曲線が、深層崩壊型の土砂移動の危険性を特に高める降雨を特徴づけるものとして推定された。

最後に、浸透雨水が土層と基岩の境界面付近に飽和帯を形成することによって引き起こされる表層崩壊型の土砂移動については、六甲山住吉川水系内の西おたふく山における土壌水分測定結果に

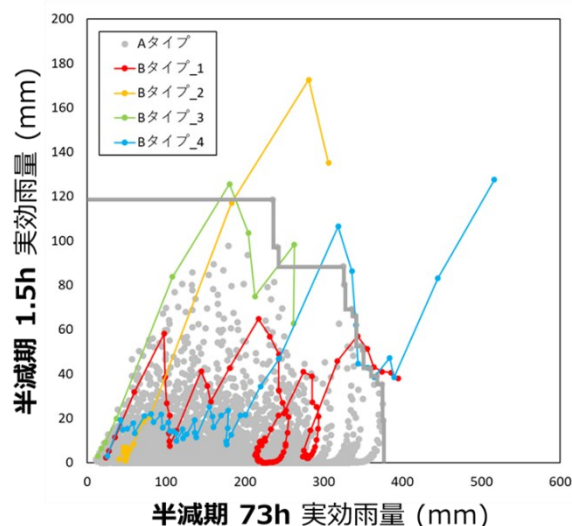


図-6 B タイプの降雨イベントの全てを特徴づけるスネーク曲線の事例

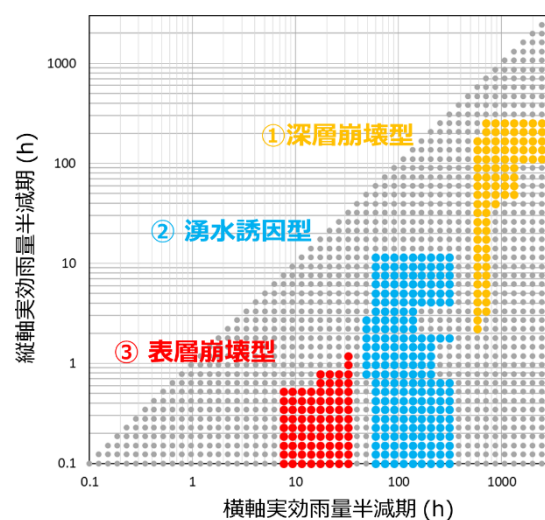


図-7 各型の土砂移動の危険性が特に高まる降雨を特徴づけるスネーク曲線群の推定結果

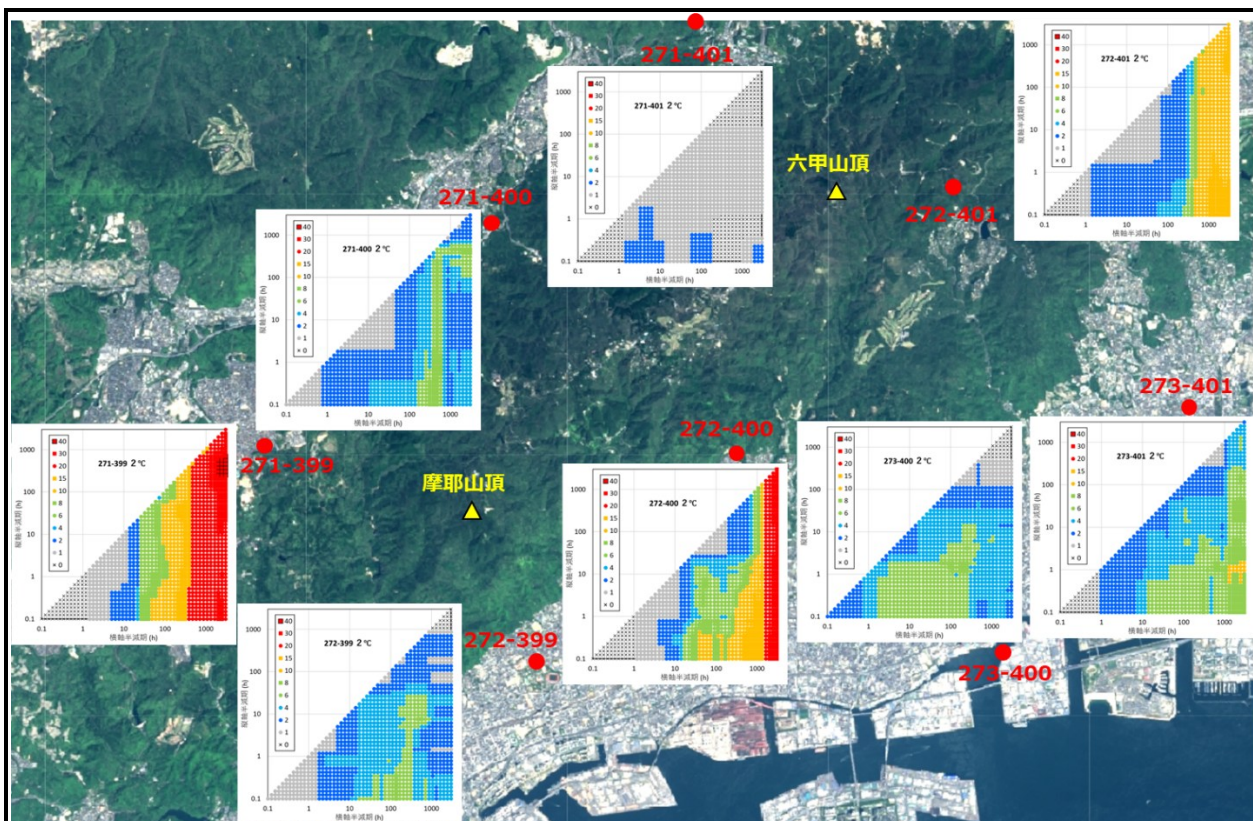


図-8 各種スネーク曲線における将来降雨による過去降雨最大値の超過回数（2℃上昇シナリオ）
凡例の数値は階級の最小値を表しており、例えば「30」は「30 回以上 40 回未満」に対応。背景には地理院地図の空中写真を使用。

に基づき、スネーク曲線の半減期の推定を行った。具体的には、基岩湧水の影響をほとんど受けないと考えられる地点における土壌水分の測定結果に基づき、豪雨時の水分上昇との整合性が高くなる実効雨量半減期の組合せを特定した。その結果、図-7 に赤色○で示した半減期の組合せによるスネーク曲線が、表層崩壊型の土砂移動の危険性を特に高める降雨を特徴づけるものとして推定された。

3. 六甲山における土砂災害の将来予測

3.1 将来予測降雨の傾向

ここでは、気候シミュレーションによって得られた将来予測降雨の六甲山周辺における傾向を分析したうえで、2 章の結果を用いて六甲山による土砂災害の将来予測を行った。

温暖化を反映した気候シミュレーションが多数実施されているが、本研究では、取り扱いが比較的容易であり、適度な空間および時間解像度を有する創生・統合プログラム 5km 格子 NHRCM 日本域気候予測データセット（Murata ら、2015）を用いることとした。具体的には、過去シナリオに基づく 20 年分、RCP2.6（2℃上昇シナリオ）に基づく 20 年分、RCP8.5（4℃上昇シナリオ）に基づく 20 年分の時間雨量データを使用した。

降雨の傾向分析では、まず、過去シナリオに基づく 20 年分の雨量を用いてスネーク曲線を描き、その最大値を特定した。次に、2℃上昇シナリオもしくは 4℃上昇シナリオに基づく 20 年分の雨量によるスネーク曲線が、過去シナリオによる最大値を超過する回数（超過イベント数）をカウントした。この解析を半減期の異なる実効雨量の組合せによる種々のスネーク曲線で実施して、各スネーク曲線における超過回数を算定した。

2℃上昇シナリオに関する結果を図-8 に示した。六甲山西部（271-399 メッシュ）と六甲山南部（272-400 メッシュ）は概して超過回数が多く、特に横軸半減期が長いスネーク曲線で超過回数が顕著に大きくなった。一方、横軸半減期がおよそ 1h 以下のスネーク曲線では、超過回数がゼロとなった。六甲山東部（272-401 メッシュ）でも、横軸半減期が長いスネーク曲線での超過回数の増加傾向がみられた。北部の有馬温泉周辺（271-401 メッシュ）では、概して超過回数が少なく、特に縦軸半減期が長いスネーク曲線では超過回数がゼロもしくは 1 回に留まっていた。

3.2 土砂災害の将来予測

3.1 節の結果を図-7 に示した結果と結合し、六甲山において将来発生し得る土砂災害について、土砂移動の形態の違いを考慮しつつ推察した。解析では、将来の温度上昇シナリオ（4℃上昇シナリオもしくは 2℃上昇シナリオ）の下で発生する降雨イベントの各々について、過去最大値を超過するか否かを判定したうえで、超過が起きていれば土砂災害が特に顕著に発生するものと考えた。さらに超過が起きたスネーク曲線が、図-7 における赤色○で示されるスネーク曲線群に属していれば「表層崩壊型」、水色○で示されるスネーク曲線群に属していれば「湧水誘因型」、橙色○で示されるスネーク曲線群に属していれば「深層崩壊型」の土砂移動が特に顕著に発生する降雨イベントであると判定した。

結果を図-9 にまとめた。いずれの温度上昇シナリオでも、全てのメッシュにおいて全ての型の土砂移動に係る超過イベントの発生が確認された。型別にみると、深層崩壊型の土砂移動に係る超過降雨イベント数は概して多いが、メッシュによる違いが大きい。一方、湧水誘因型の土砂移動に係る超過降雨イベント数は、基本的にいずれのメッシュでも多くなっていた。表層崩壊型の土砂移動に係る超過降雨イベント数は、平均的に少なくなっていた。

超過イベント数は六甲山西部（271-399 メッシュ）と六甲山南部（272-400 メッシュ）で顕著に大きくなった。これらのメッシュでは深層崩壊型の土砂移動に係る超過降雨イベント数が顕著に多く、続いて湧水誘因型、表層崩壊型となっている。他のメッシュで超過イベント数が多いのは、2℃上昇シナリオの下での六甲山東部（272-401 メッシュ）であり、ここでも深層崩壊型の土砂移動に係る超過イベント数が顕著に多い。逆に超過イベント数が少ないのは北部有馬温泉周辺（271-401 メッシュ）であった。

4℃上昇シナリオと2℃上昇シナリオの比較では、超過イベント数が4℃上昇シナリオで大きくなるメッシュも小さくなるメッシュも存在しており、全メッシュに共通した傾向はみられなかった。表層崩壊型の土砂移動に係る超過降雨イベント数は、神戸市街地（272-399 メッシュ）を除き、全てのメッシュで4℃上昇シナリオの方が多くなった。

4. ハード対策・ソフト対策に関する考察（行政への反映）

以上の結果に基づき、六甲山におけるハード対策・ソフト対策について以下の考察を行った。

- 六甲山全体で将来的にいずれのタイプの土砂移動も増加する可能性が考えられ、ハード対策・ソフト対策をさらに充実させていく必要性がある。
- 深層崩壊型の土砂移動の危険性を特に高めるパターンの降雨が増加することが懸念される。影響の大きい箇所については水抜きボーリングなどの対策を検討する必要性が考えられる。
- 湧水誘因型の土砂移動は、基岩地下水が豊富な六甲山において特徴的である。六甲山全体でこの形態の土砂移動が増加する可能性が考えられることから、湧水地点の位置と湧水量を把握し、豪雨時に増加した湧水を安全かつ迅速に排水できる施設を整備しておく必要性が考えられる。
- 将来的な表層崩壊の増加が予測されたが、その増加量は気温の上昇幅に依存することが推察された。本研究で得られた知見を生産土砂量の推定に直結することは難しいものの、今後の気温の上昇幅とそれに伴う降雨規模の拡大、表層崩壊の増加を注視し、ハード対策施設の数

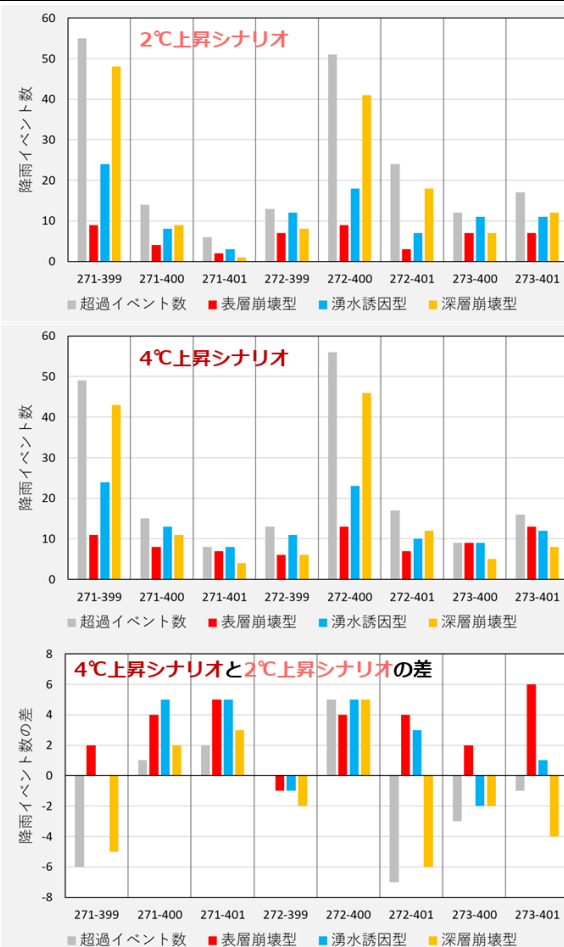


図-9 将来の温度上昇シナリオ（2℃上昇シナリオおよび4℃上昇シナリオ）の下で発生する降雨イベントの過去最大値超過回数ならびに4℃上昇シナリオと2℃上昇シナリオの超過回数の差

や規模の検討に反映させる必要性が考えられる。

- 本研究の手法は、多種類のスネーク曲線を用いて判定することによって既往最大値超過の発生を極力漏れが無いように探索すると同時に、どの種類のスネーク曲線において超過が発生するかによって、危険性が特に高まる土砂移動のタイプについても予測を行うものとなっている。この手法によって、避難のタイミングに加え、避難経路の選択や避難時の留意事項についても有益な情報を提供できる可能性が考えられる。

5. 留意点と今後の課題

土砂移動形態を深層崩壊型、湧水誘因型、表層崩壊型に分けて、それぞれの形態の土砂移動の発生を引き起こす可能性の高い降雨イベントを特徴づけるスネーク曲線の分類を行ったが、この分類は相対的な危険度の違いを推定するものであって絶対的な危険度を推定するものではない。よって、いずれのスネーク曲線についても、それが大きく上昇する降雨が降った場合、いずれの形態の土砂移動も生ずる可能性があることに注意が必要である。加えて、本研究においてスネーク曲線の分類の根拠とした数値シミュレーションでは、報告書中に記載したように、計算上の仮定・想定を設けている上、実現象と矛盾する結果も生じている。また、スネーク曲線の分類に用いた水文データは、限られた地点における観測結果であるとともに、実際の崩壊発生時のデータとはなっていない。これらのことから、本研究で提示した分類の有効性・普遍性については、今後、より多くの設定条件下での数値シミュレーションや、より多地点・長期間の水文データを用いた解析により、検証ならびに高精度化を図っていく必要がある。

最適雨量指標（最適スネーク曲線）として選定したものの中には、適切な判定が行える降雨イベント数が少ないものや、ピーク1位の降雨イベントを適切に判定できないものも存在していた。選定手法の改善を図り高精度の予測に繋げていくことが今後の重要な課題である。

本研究では、過去の降雨による最大値を上回る規模の豪雨が降る場合に、土砂災害の危険性が大きくなるとの考えに基づいて土砂災害の危険度評価を行った。土砂災害の形態や規模の予測には、「過去の降雨による最大値をどれだけ上回るか」に関する定量的評価も重要であり、今後研究を進めていく必要がある。また、斜面の強度が低下する何らかの事象が生じた場合などには、過去の降雨による最大値を上回らない状況でも土砂移動が起きる場合が存在する。このような土砂移動の評価も今後の重要な課題である。

本研究において将来予測に用いた創生 5km データでは、1 年ごとに区切って計算が行われており毎年 8 月 31 日と 9 月 1 日の間には不連続になっているが、本研究ではこの区切りを無視して実効雨量の計算を行っている。このことにより生ずる推定誤差の評価が課題となる。より根本的には、より高精度の最新のデータセットを用いて、土砂災害の将来予測をアップデートしていく必要がある。

引用文献

- Katsura, S., K. Kosugi, T. Mizutani, and T. Mizuyama, Hydraulic properties of variously weathered granitic bedrock in headwater catchments, *Vadose Zone J.*, 8, 557-573, doi:10.2136/vzj2008.0142, 2009.
- Kosugi, K., A new model to analyze water retention characteristics of forest soils based on soil pore radius distribution, *J. For. Res.*, 2, 1-8, 1997a.
- Kosugi, K., New diagrams to evaluate soil pore radius distribution and saturated hydraulic conductivity of forest soil, *J. For. Res.*, 2, 95-101, 1997b.
- Kosugi, K., General model for unsaturated hydraulic conductivity for soils with lognormal pore-size distribution, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 270-277, 1999.
- Murata, A.; Sasaki, H.; Kawase, H.; Nosaka, M.; Oh' izumi, M.; Kato, T.; Aoyagi, T.; Shido, F.; Hibino, K.; Kanada, S.; Suzuki-Parker, A.; Nagatomo, T. Projection of Future Climate Change over Japan in Ensemble Simulations with a High-Resolution Regional Climate Model. *SOLA 2015*, 11 (0), 90-94. <https://doi.org/10.2151/sola.2015-022>.

⑦研究成果の発表状況・予定

【学会・研究集会での発表】

防災研究所一般研究集会（2024WS-04）「気候変動により激化する土砂災害の対応策確立に向けた知
と課題の共有」2024年12月18～19日

発表者：吉田淳樹

発表タイトル：六甲山における近年の降雨と土砂移動の特徴

R7年度砂防学会研究発表会

発表者：吉田淳樹・小杉賢一朗

発表タイトル：六甲山西滝ヶ谷流域における降雨パターンと土砂移動パターンの対応

水文・水資源学会2025年度秋田大会

六甲山における降雨パターンと土砂移動パターンの対応関係

発表者：小杉賢一朗・吉田淳樹

第137回日本森林学会大会

発表者：小杉賢一朗

斜面形状が降雨流出ピークに及ぼす影響に関する数値シミュレーション

⑧研究成果の社会への情報発信

朝日新聞，2024年12月21日，ののちゃんのDO科学，「降った雨は山でどう流れるの？」

⑨表彰、受賞歴

なし

⑩技術研究開発の今後の課題・展望等

土砂移動形態を深層崩壊型、湧水誘因型、表層崩壊型に分けて、それぞれの形態の土砂移動の発生を引き起こす可能性の高い降雨イベントを特徴づけるスネーク曲線の分類を行ったが、この分類は相対的な危険度の違いを推定するものであって絶対的な危険度を推定するものではない。よって、いずれのスネーク曲線についても、それが大きく上昇する降雨が降った場合、いずれの形態の土砂移動も生ずる可能性があることに注意が必要である。加えて、本研究においてスネーク曲線の分類の根拠とした数値シミュレーションでは、報告書中に記載したように、計算上の仮定・想定を設けている上、実現象と矛盾する結果も生じている。また、スネーク曲線の分類に用いた水文データは、限られた地点における観測結果であるとともに、実際の崩壊発生時のデータとはなっていない。これらのことから、本研究で提示した分類の有効性・普遍性については、今後、より多くの設定条件下での数値シミュレーションや、より多地点・長期間の水文データを用いた解析により、検証ならびに高精度化を図っていく必要がある。

最適雨量指標（最適スネーク曲線）として選定したものの中には、適切な判定が行える降雨イベント数が少ないものや、ピーク1位の降雨イベントを適切に判定できないものも存在していた。選定手法の改善を図り高精度の予測に繋げていくことが今後の重要な課題である。

本研究では、過去の降雨による最大値を上回る規模の豪雨が降る場合に、土砂災害の危険性が大きくなるとの考えに基づいて土砂災害の危険度評価を行った。土砂災害の形態や規模の予測には、「過去の降雨による最大値をどれだけ上回るか」に関する定量的評価も重要であり、今後研究を進めていく必要がある。また、斜面の強度が低下する何らかの事象が生じた場合などには、過去の降雨による最大値を上回らない状況でも土砂移動が起きる場合が存在する。このような土砂移動の評価も今後の重要な課題である。

本研究において将来予測に用いた創生5kmデータでは、1年ごとに区切って計算が行われており毎年8月31日と9月1日の間には不連続になっているが、本研究ではこの区切りを無視して実効雨量の計算を行っている。このことにより生ずる推定誤差の評価が課題となる。より根本的には、より高精度の最新のデータセットを用いて、土砂災害の将来予測をアップデートしていく必要がある。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

六甲山全体で将来的にいずれのタイプの土砂移動も増加する可能性が考えられ、ハード対策・ソフト対策をさらに充実させていく必要性がある。

深層崩壊型の土砂移動の危険性を特に高めるパターンの降雨が増加することが懸念される。影響の大きい箇所については水抜きボーリングなどの対策を検討する必要性が考えられる。

湧水誘因型の土砂移動は、基岩地下水が豊富な六甲山において特徴的である。六甲山全体でこの形態の土砂移動が増加する可能性が考えられることから、湧水地点の位置と湧水量を把握し、豪雨時に増加した湧水を安全かつ迅速に排水できる施設を整備しておく必要性が考えられる。

将来的な表層崩壊の増加が予測されたが、その増加量は気温の上昇幅に依存することが推察された。本研究で得られた知見を生産土砂量の推定に直結することは難しいものの、今後の気温の上昇幅とそれに伴う降雨規模の拡大、表層崩壊の増加を注視し、ハード対策施設の数や規模の検討に反映させる必要性が考えられる。

本研究の手法は、多種類のスネーク曲線を用いて判定することによって既往最大値超過の発生を極力漏れが無いように探索すると同時に、どの種類のスネーク曲線において超過が発生するかによって、危険性が特に高まる土砂移動のタイプについても予測を行うものとなっている。この手法によって、避難のタイミングに加え、避難経路の選択や避難時の留意事項についても有益な情報を提供できる可能性が考えられる。