

# 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<br>(こすぎけんいちろう)                                | 京都大学大学院<br>農学研究科 |                               | 教授     |
| ②研究<br>テーマ   | 名称       | 深層崩壊に対する警戒避難の発表ならびに解除に資する雨量データ解析手法の構築               |                  |                               |        |
|  | 政策<br>領域 | [分野] 地域課題分野 (砂防)<br>[公募課題]                          | 融合<br>技術         | (リモートセンシング、非破壊<br>検査、認知行動学 等) |        |
| ③研究経費 (単位: 万円)   |          | 平成28年度  | 平成29年度           | 平成30年度                        | 総 合 計  |
| ※端数切り捨て。   |          | 178 万円  | 154 万円           | 166 万円                        | 499 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・役職 (※平成 年3月31日現在)                                |                  |                               |        |
| 中谷加奈   |          | 京都大学農学研究科・助教  |                  |                               |        |
| 正岡直也   |          | 京都大学農学研究科・特定助教                                      |                  |                               |        |
| ⑤研究の目的・目標  |          | (申請書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)                        |                  |                               |        |
| <p>紀伊山地では、H23年台風12号の豪雨で深層崩壊が多発し、甚大な被害をもたらした。深層崩壊は頻度が少なく規模が大きいため、効率的・効果的なハード対策が難しく、ソフト対策が重要となる。既往の土砂災害警戒情報の発表には、実効雨量や土壌雨量指数が用いられ、あたかも実際の雨水貯留量を表しているかのような扱いがされるが、これらの雨量指標と崩壊の誘因となる地下水位との対応は解明されていない。特に深層崩壊と密接に関わる基岩内の地下水位変動は、主として表層崩壊・土石流を対象として開発された実効雨量 (半減期1.5, 72時間) や土壌雨量指数との対応が必ずしも良くないことが、これまでの研究で指摘されている。このような雨量指標を用いている限り、警戒避難における見逃し・空振りを軽減することが難しいばかりでなく、警戒避難を解除するタイミングを合理的に判断することは困難だと予想される。</p> <p>このようなことから本研究では、紀伊山地付加体特有の基岩内地下水位の変動と雨量との対応関係を明らかにし、紀伊山地の深層崩壊をターゲットとした、精度の高い警戒避難の発表ならびに解除に資する、雨量データの解析・活用手法を検討することを目的とした。そのために、崩壊跡地やその周辺の非崩壊斜面ならびに潜在的な危険斜面で観測されている雨量・基岩内地下水位データを収集・解析し、紀伊山地付加体に特有な地下水位変動を予測できる新たな手法の提示を目指した。ここで得られる成果を応用することによって、避難勧告・指示を発表ならびに解除するタイミングを、従来よりも合理的に判断できるようになると期待される。</p> |          |   |                  |                               |        |

## ⑥研究成果

(様式 F-10と同じ内容について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

### 1. はじめに

紀伊山系では、平成 23 年台風 12 号の豪雨で深層崩壊が多発し、甚大な被害をもたらした。深層崩壊は頻度が少なく規模が大きいため、効率的・効果的なハード対策が難しく、ソフト対策が重要となる。本研究は、紀伊山系付加体特有の基岩内地下水位の変動と雨量との対応関係を明らかにし、紀伊山系の深層崩壊をターゲットとした、精度の高い警戒避難の発表ならびに解除に資する雨量データの解析・活用手法を検討することを目的として実施した。以下では、主として警戒避難の解除のタイミングに関して得られた知見を報告する。

### 2. 解析に用いたデータ

平成 23 年に発生した深層崩壊跡地やそれらの周辺の非崩壊斜面ならびに潜在的な危険斜面で集中的な調査が行われている 9 地区 (赤谷, 長殿, 清水 (宇井), 北股, 那智, 坪内 (冷水), 栗平, 熊野, 三越) を対象として、降雨と地下水位のデータを解析した。地下水位観測地点の総数は 140 である。データは全て 1 時間インターバルのものを使用した。観測の開始・終了時期は地点によって異なっており、解析期間の統一はしていない。

### 3. 解析方法

48 時間の無降雨期間を降雨イベントの区切りとし、「総雨量 10 mm 以上かつ地下水位上昇量 0.5 m 以上」の条件により解析降雨イベントを抽出した。時間雨量の時系列を用いて実効雨量を計算した上で、各降雨イベントにおける実効雨量のピーク値ならびにピーク発生時刻を特定し、地下水位のピーク値ならびにピーク発生時刻と比較した。

### 4. 結果と考察

#### 4.1 実効雨量ピークと地下水位ピークの対応

図-1 には、栗平地区の W2 地点で観測された地下水位と半減期 120h 実効雨量を示した。実効雨量は地下水位と類似した波形を示しており、両者のピーク値の間には高い順位相関が認められた (NSEF 値=0.803)。ただし、両者のピークは必ずしも同時刻に発生しているわけではない。一般に深い深度に存在する基岩地下水では降雨に遅れて水位上昇を示す傾向があり、このことが降雨ピークに遅れて深層崩壊が発生する一因だと考えられる。

そこで、地下水位ピークと実効雨量ピークのタイムラグ (地下水位ピークが実効雨量ピークからどのくらい遅れて出現するかを意味し、以下ではピークラグと呼ぶ) を計算し、実効雨量ピークとの相関をとったものが図-2 の左パネル、地下水位ピークとの相関をとったものが図-2 の右パネルである。実効雨量ピークや地下水位ピークが大きくなるにつれてピークラグが小さくなる傾向が認められる。

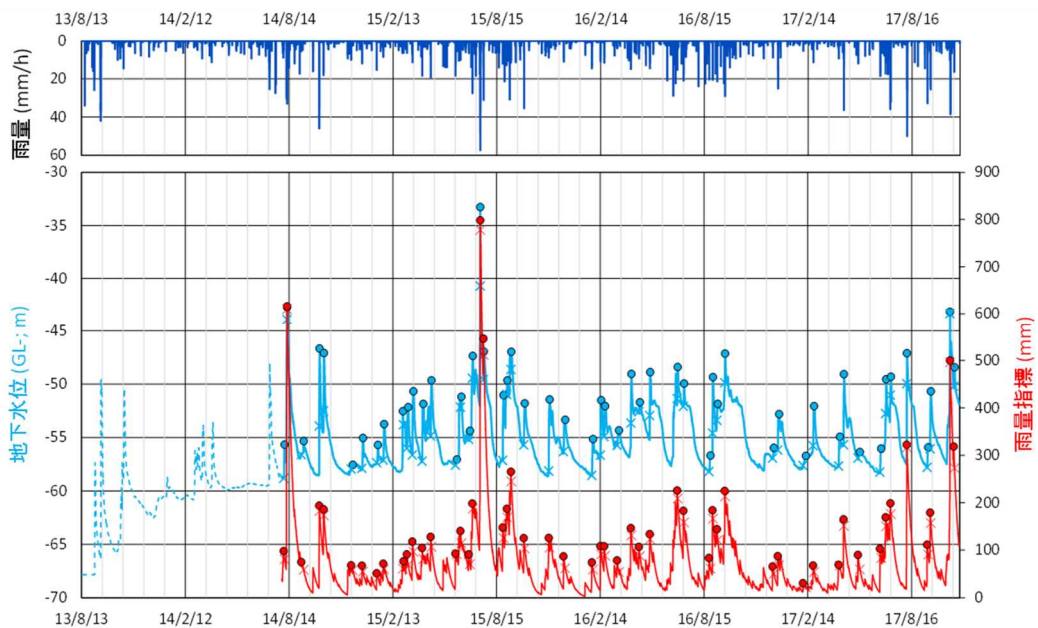


図-1 雨量, 雨量指標 (半減期 120h 実効雨量), 地下水位の時系列 (栗平地区 W2 地点)

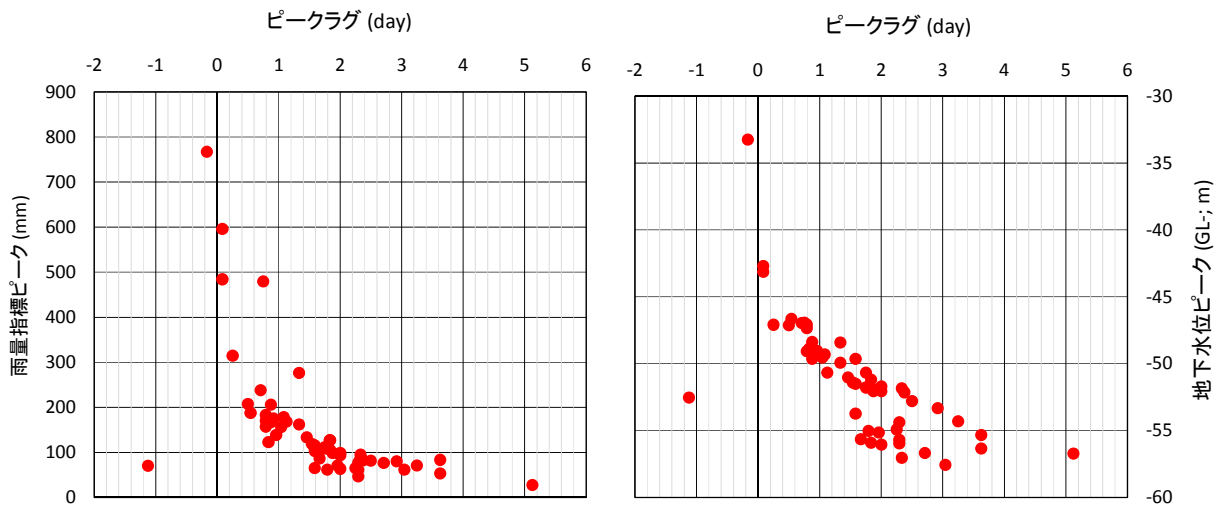


図-2 ピークラグと雨量指標ピーク（左）および地下水位ピーク（右）の相関（栗平地区 W2 地点）

すなわち、大規模降雨イベントではピークラグがゼロに近く、実効雨量がピークとなる時刻と比較的近い時間帯において地下水位ピークが出現していることになる。このような地点では、降雨ピークに極端に遅れた深層崩壊の発生は比較的少ない可能性が推察される。なお、ピークラグがマイナスになっている降雨イベントが数例存在しているが、これは地下水位のピークが雨量指標のピークよりも早く発生したことを意味している。

#### 4.2 ピークラグの解析

次に図-3 は、解析を行った全 140 地点について半減期 120h 実効雨量のピークとピークラグの相関を示したものである。雨量指標ピーク値が大きくなるほど、ピークラグは概してゼロに近づく傾向を示している。この図では、崩壊地の内部と外部の地点を区別しているが、崩壊地の内部にある地点においてピークラグがより大きくなるケースが多くみられる。この傾向は、特に雨量指標ピークが大きな大規模降雨イベント時に強く表れている。崩壊地内部では、圧密されて透水性が低下した崩土が厚く堆積することでピークラグを大きくしている可能性が考えられる。未崩壊斜面における災害を警戒する場合には、崩壊地外部の地点の傾向を分析することが適切だと考えられることから、以下の解析では、崩壊地内部の地点を除外した。

図-4 は、崩壊地外部の地点を対象とした「半減期 120h 実効雨量ピークとピークラグの相関」において、ピークラグの包絡線を引いたものである。例えば 95%包絡線は、実効雨量 300 mm において 1.74 day を示しているが、これは「実効雨量のピークが 300 mm 以上になる全てのデータのうち 95% は、ピークラグが 1.74 日以内に納まっている」ことを表している。包絡線のピークラグの値は、当然のことであるが、包絡割合を小さくするほど小さ

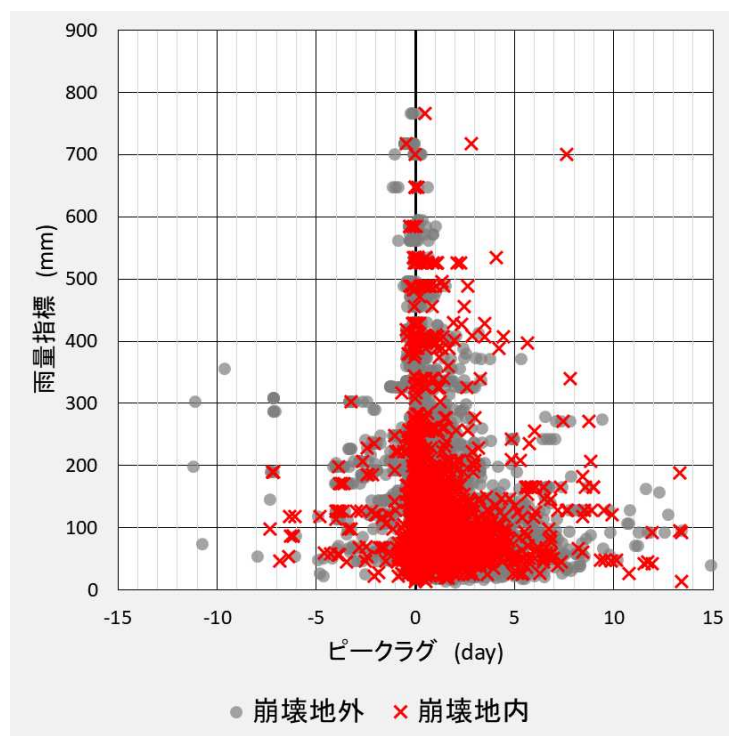


図-3 ピークラグと雨量指標ピークの相関（全観測地点）

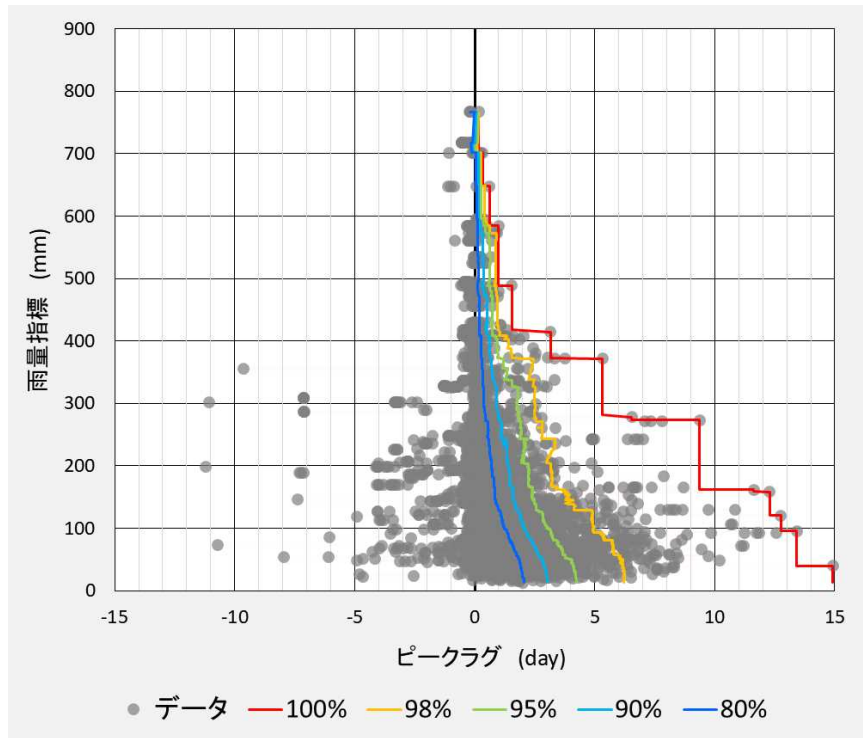


図-4 ピークラグと雨量指標ピークの相関（崩壊地外の全観測地点）  
図中の曲線は各種割合の包絡線を表している

くなっている。また、雨量指標ピークが大きくなるほど小さくなっており、これは、規模が大きな降雨イベントほど地下水水位ピークがより早く出現することを示している。

実効雨量の半減期  $M$  を変化させて図-4 と同様の解析を行うことで得られた 95%包絡線を図-5 に示した。この図の縦軸の降雨規模割合は、各雨量指標の大きさで降雨規模を表した際に上位に位置するデータの割合を表している。降雨規模割合を 5%に設定した場合のピークラグは、半減期 1.5, 24, 72, 120, 240h 実効雨量でそれぞれ 48.70, 21.35, 18.70, 19.70, 28.35 h となった。よって、ここでの条件設定の下では、各雨量指標のピーク後にこれらの時間が経過すれば地下水水位が低下すると推測できることになり、警戒避難解除のタイミングの推定に活用できる可能性が考えられる。そこで次節で

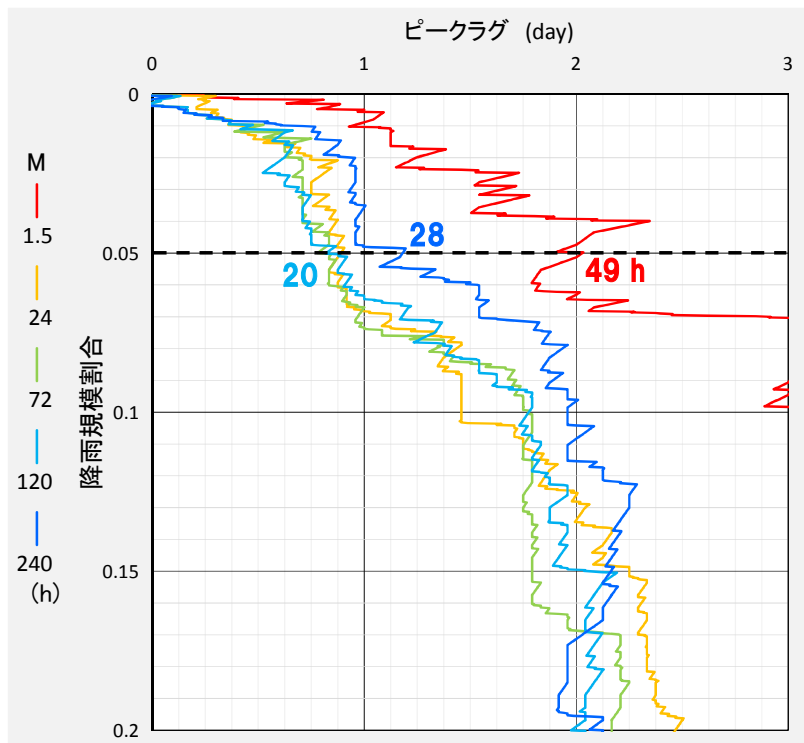


図-5 各種半減期の実効雨量について算定されたピークラグ包絡線  
縦軸の降雨規模割合は、各雨量指標の大きさで降雨規模を表した際に上位に位置するデータの割合を表している

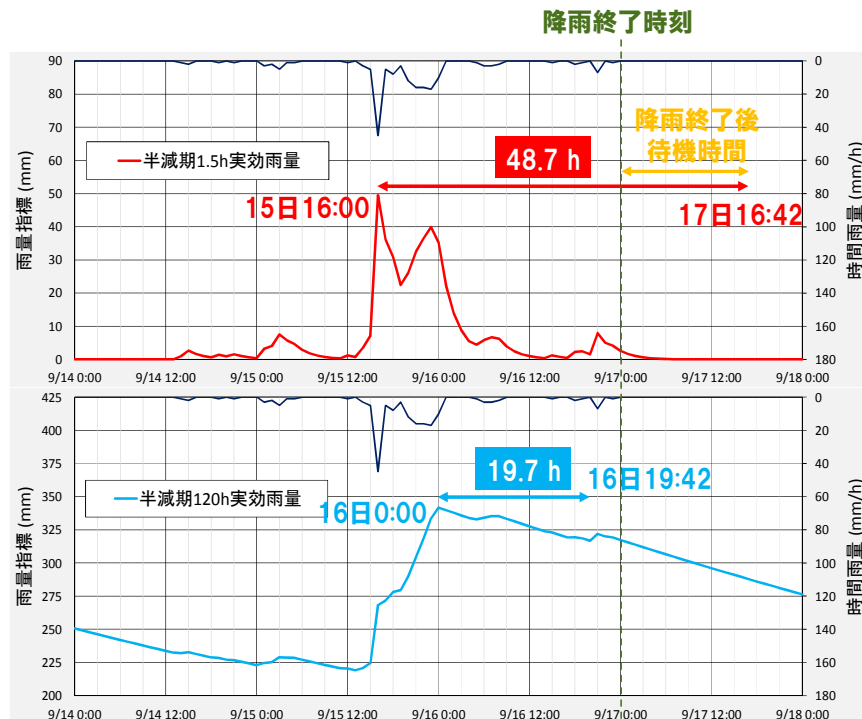


図-6 降雨後待機時間の算定例

は、このピークラグを用いて避難を継続すべき時間の試算を行った。

#### 4.3 降雨後待機時間の算定

試算においては、まず気象庁のアメダス風屋の1時間雨量データを用いて、1979～2011年の降雨イベントから積算雨量300mm以上の32イベントを抽出し、各実効雨量のピーク発生時刻を算定した。この時刻に、上記のピークラグを加算した時刻を「避難を解除する時刻（避難解除時刻）」とみなした。ただし、この時刻が降雨継続中になる場合には、避難解除時刻を降雨終了時刻に設定した。このようにして得られた避難解除時刻と降雨終了時刻との差を、「降雨終了以降に避難を継続しなければならない時間（降雨後待機時間）」として求めた。

試算の一例として、2009年9月14日に発生した降雨イベントに関する結果を図-6に示した。半減期1.5h実効雨量は9月15日16:00にピークとなっており、前述した「降雨規模割合を5%に設定した場合のピークラグ」である48.7hを採用すれば、避難解除時刻（地下水位が低下すると推測される時刻）は9月17日16:42となる。降雨終了時刻は9月17日0:00であることから、降雨後待機時間は16時間42分と計算される。一方、半減期120h実効雨量は9月16日0:00にピークとなっており、「降雨規模割合を5%に設定した場合のピークラグ」である19.7hを採用すれば、地下水位が低下すると推測される時刻は9月16日19:42となる。これは降雨終了時刻（9月17日0:00）より早いことから、降雨終了時には警戒避難を解除できることになる。すなわち、降雨後待機時間はゼロと計算される。

このような計算を、全32降雨イベントについて各種半減期を用いて行い、算定された降雨後待機

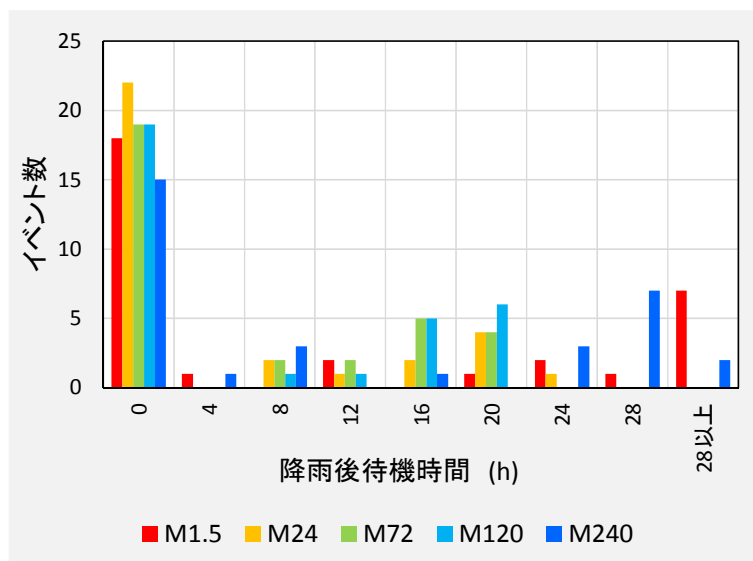


図-7 降雨後待機時間のヒストグラム

時間の分布をヒストグラムで表したものが図-7である。いずれの半減期についても、待機時間がゼロの（すなわち、降雨終了をもって避難を解除できる）イベントが最多であるが、半減期 1.5h 実効雨量と半減期 240h 実効雨量を用いた場合には、降雨後待機時間が 24 時間以上となるイベントも多く存在している。一方、半減期 72, 120h 実効雨量では、待機時間は 24 時間以内に納まっている。降雨後待機時間の平均値は半減期 1.5, 24, 72, 120, 240h 実効雨量で、それぞれ 12.59, 4.48, 5.38, 6.16, 10.56 h となった。よって、ここでの条件設定の下では、半減期 24~120h 実効雨量を用いることで降雨後待機時間を概して短く設定できると考えられた。

#### 5. おわりに

以上のように本研究では、深層崩壊に対する避難を解除するタイミングを検討する目的で、降雨後待機時間を算定する一連の手法を提案した。この手法は、対象とする崩壊の深度、捕捉割合（包絡線がカバーするデータの割合）、降雨イベントの規模（降雨規模割合もしくは雨量指標の閾値）等の条件を設定することによって、各種半減期実効雨量についてピークラグ（雨量指標のピークに対して地下水位のピークがどれだけ遅れて発生するか）を多数の観測データに基づき算出するものである。本研究では、この手法により得られたピークラグを用いて、降雨後待機時間の試算を行った。

今後、本手法を実用化していくためには、いくつかの課題を解決していかねばならない。具体的には、上記した各種条件のそれぞれについて、どのような根拠に基づき設定を行うかを検討する必要がある。加えて、算定された降雨後待機時間の有用性・信頼性について検証を行う必要がある。これらの課題について今後も研究を継続し、深層崩壊に対するソフト対策に貢献していきたい。

## ⑦研究成果の発表状況

平成29年度砂防学会研究発表会

平成29年5月24日～26日

深層崩壊の発生予測に資する雨量指標の評価および改良に関する研究

千野佑輝, 小杉賢一朗, 吉村元吾, 今森直紀, 田中健貴

平成30年度砂防学会研究発表会

平成30年5月16日～18日

基岩地下水位変動に着目した深層崩壊の発生予測に資する雨量指標の検討

千野佑輝, 小杉賢一朗, 吉村元吾, 菅原寛明, 田中健貴

令和元年度砂防学会研究発表会

令和元年5月21日～22日

深層崩壊に対する警戒避難の発表ならびに解除に資する雨量データ解析

小杉賢一朗, 千野佑輝, 中谷加奈, 正岡直也, 小竹利明, 菅原寛明, 田中健貴

## ⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

公開イベントにおける情報発信

土砂災害防止全国の集い 2016年6月21日 参加人数900人

土砂災害警戒避難における降雨データの活用方法について

公開講座における情報発信

京都大学森林科学公開講座 2016年10月15日 参加人数80人

森林の緑のダム機能・土砂災害防止機能の解明

公開講座における情報発信

京都大学春秋講義「山を知る」 2016年11月3日 参加人数430人

森と水の恵みと土砂災害—山に眠る地下水の実態と活用—

講習会における情報発信

平成30年度(公社)砂防学会講習会 2018年11月26日 参加人数120名

平成30年7月豪雨による土砂災害の実態と対応策

研修会における情報発信

神奈川県自然環境保全センター研究推進支援研修 2019年3月5日 参加人数60名

森林の水源涵養機能における土壌の役割と岩盤地下水の関係

## ⑨表彰、受領歴

(単なる成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

なし

## ⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や砂防政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

本研究では、紀伊半島における平均的な傾向として、半減期120h実効雨量に着目して深層崩壊に対する警戒・避難を行う方法が合理的であることが示唆された。ただし120h以外の半減期の実効雨量がより適切な指標となる地点も多いことから、各種半減期の実効雨量を指標とした計算を実施することで見逃しを軽減できることが示唆された。

さらに、深層崩壊に対する警戒避難を解除するタイミングを検討する目的で、降雨終了後に待機が必要な時間を算定する一連の手法を提案した。この手法は、対象とする崩壊の深度、捕捉割合、降雨規模、雨量指標等の条件を設定することによって、降雨後待機時間を推定するものである。

本研究で得られた結果や提示した解析手法の有効性・妥当性については、今後、より多くの地点の地下水位データ、より多くの降雨イベント時の地下水位データ、ならびに実際の災害事例等を用いて検証する必要がある。また提示した手法を実用化していくためには、適用の上での各種条件設定について、どのような根拠に基づき実施すべきかを検討する必要がある。これらの課題について研究を継続し発展させることにより、深層崩壊に対するソフト対策に資する技術として実用化できると考えられる。

## ⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、砂防政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

深層崩壊は頻度が少なく規模が大きいため、効率的・効果的なハード対策が難しく、ソフト対策が重要となる。既往の土砂災害警戒情報の発表には、実効雨量や土壌雨量指数が用いられ、あたかも実際の雨水貯留量を表しているかのような扱いがされるが、これらの雨量指標と崩壊の誘因となる地下水位との対応は解明されていない。

本研究では、紀伊山地付加体特有の基岩内地下水位の変動と雨量との対応関係を明らかにし、紀伊山地の深層崩壊をターゲットとした警戒避難の発表ならびに解除に資する、雨量データの解析・活用手法を提案することができた。

この手法を検証し発展させることによって、将来的に、紀伊山地付加体に特有な地下水位変動を高精度で予測できるようになると期待される。さらに、避難勧告・指示を解除するタイミングを科学的根拠に基づき合理的に判断できるようになると期待される。