

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		小杉賢一郎 (こすぎけんいちろう)	京都大学大学院 農学研究科	教授	
② 研究 テーマ	名称	紀伊山地付加体における深層崩壊対策に資する水文調査・解析手法の構築			
	政策 領域	[分野] 地域課題分野 (砂防) [公募課題]	融合 技術	(リモートセンシング、非破壊 検査、認知行動学 等)	
③ 研究経費 (単位: 万円)		平成25年度	平成26年度	平成27年度	総合計
		161	159	179	500
④ 研究者氏名					
氏名		所属・役職 (※平成28年3月31日現在)			
水山高久		政策研究大学院大学・教授			
中谷加奈		京都大学農学研究科・助教			
山川陽祐		筑波大学農林技術センター・助教			
正岡直也		京都大学農学研究科・研究員			
糸数 哲		京都大学農学研究科・研究員			
⑤ 研究の目的・目標					
<p>本研究は、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紀伊山地を対象として、深層崩壊対策の検討に資する水文調査・解析手法を開発することを目的とする。</p> <p>紀伊山地の崩壊斜面内およびその周辺部で実施されている調査ボーリングのデータを用いて、個々の斜面の崩壊機構を解析すると共に、全調査地区の結果を統合的に解析し、紀伊山地付加体の深層崩壊に関わる水文特性を明らかにする。また、従来から用いられてきた電気伝導度による危険斜面抽出手法は、複雑な地質構造を有する紀伊山地の付加体では適用が難しいと考えられることから、これに代わる新たな手法として、湧水の安定同位体比に着目する。雨水の同位体比は標高に依存するが、山体に浸透した後は変化しない為、湧水の同位体比を計測する事で地下水集中斜面 (高い標高で降った雨水が流域界を越えて集中する斜面) を抽出できると期待される。そこで、深層崩壊発生斜面周辺で雨水・湧水の安定同位体比の計測を行い、この手法の有用性について検討する。さらに、物理水文モデルを開発し、豪雨時の地下水位変動量や水抜きボーリングによる水位低下量を予測することによって、警戒・避難態勢の整備やハード対策検討に資する解析手法を構築する。</p>					

⑥研究成果

1. 水文特性の解析（降雨と地下水位変動の対応関係）

深層崩壊発生の直接の誘因となる山体地下水位について、降雨の入力に対する応答関係を解析した。解析は、平成 23 年台風 12 号により甚大な被害が発生した長殿、熊野、栗平、清水、北股、那智、赤谷、坪内（冷水）地区について実施し、各地区で掘削されたボーリング孔のうち、概ね 1 年以上の長期にわたって地下水位変動データが蓄積されている孔を対象とした。総解析地点数は 44 である。また検討した雨量指標は、イベント積算雨量、1～24 時間積算雨量、半減期 1.5～240 時間実効雨量である。

長殿地区の H24-5 孔について、観測された地下水位を、1 時間雨量、半減期 72 時間実効雨量、半減期 240 時間実効雨量と比較したものが図-1.1 である。地下水位の変動波形は、半減期 72 時間実効雨量の変動波形と良好な対応を示しているように見受けられる。

図-1.1 に示したデータから、降雨イベント毎の雨量指標のピーク値とそのイベント中の地下水位ピーク値を抽出し、相関をとったものが図-1.2 である。図中の青丸は、当該イベント中に地下水位の増加が見られた場合のデータであり、プロットのサイズはイベント直前の地下水位を表している（イベント直前の地下水位が浅い深度に存在していた場合ほど、サイズが大きい）。また白丸は、当該イベント中に地下水位の増加が見られなかった場合のデータであり、この場合の地下水位はイベント直前の地下水位に対応している。さらに灰色丸は、地下水位の増加が見られたイベントについて、当該イベントの降雨直前の地下水位を表している。いずれの雨量指標も、そのピーク値が地下水位ピーク値と正の相関を示しているが、1 時間雨量や半減期 240 時間実効雨量の場合はプロットのばらつきが大きく、同じピーク値に対して、地下水位ピーク値が大きく異なっていたり、地下水位が全く上昇を示さなかったりする場合は比較的多くみられる。これに対して半減期 72 時間の実効雨量の場合には、雨量指標と地下水位ピークの相関がかなり良いことがわかる。

図-1.3 は、各地下水位観測地点について、地下水位ピークとの相関の高さに基づき雨量指標をランク付けしたものである。図-1.1, 1.2 に示した長殿地区 H24-5 孔では、18 個の雨量指標のうち半減期 72 時間実効雨量が、地下水位ピークと最も高い相関を示していることがわかる。全地点についてみると、概して半減期 72～120 h の実効雨量が適切な指標となっていることがわかる。地点ごとの特徴

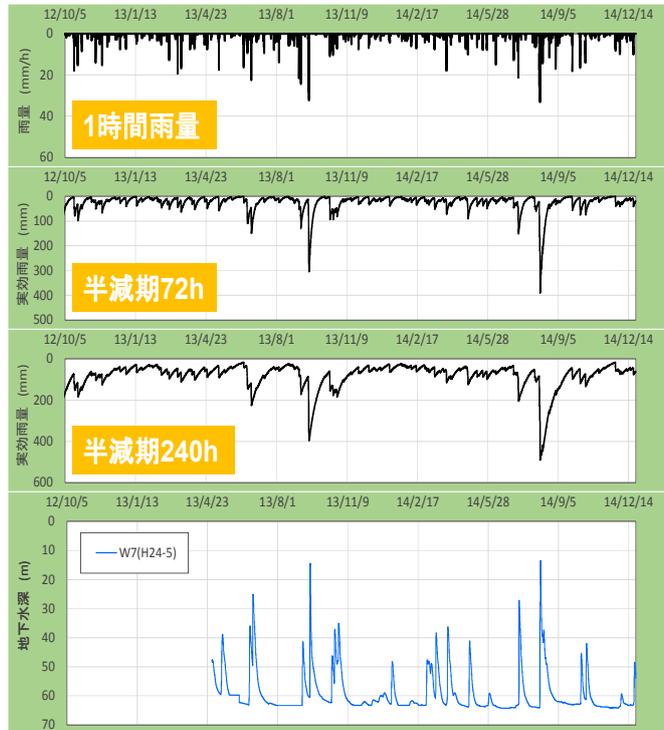


図-1.1 長殿地区の 1 時間雨量、半減期 72 時間の実効雨量、半減期 240 時間の実効雨量と地下水位変動（H24-5 孔）

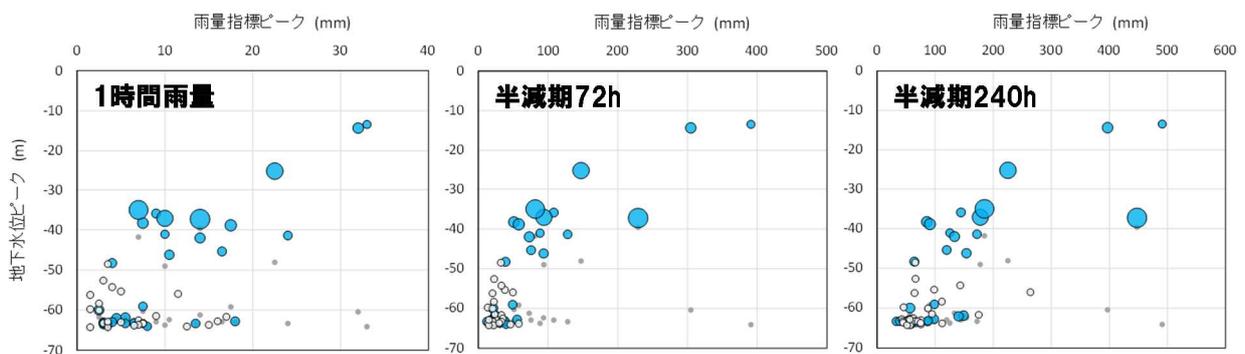
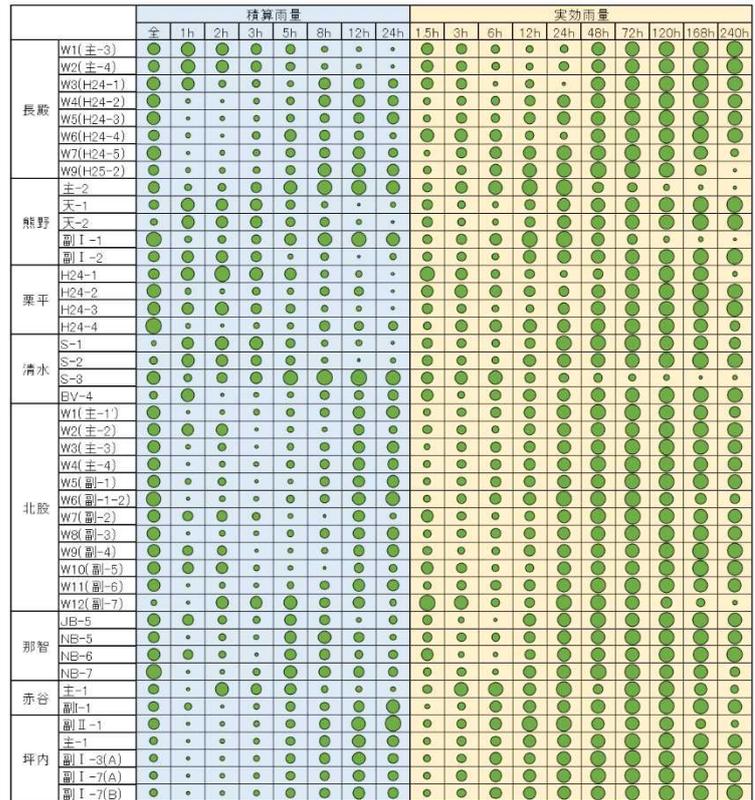


図-1.2 各雨量指標ピークと地下水位ピークの相関（長殿地区 H24-5 孔）

と最適指標との関係を詳しく検討したところ、① 尾根筋・斜面上部は半減期の短い実効雨量が適し、崩土内・斜面下部は半減期の長い実効雨量が適する、② 地下水深が深くなるほど最適な実効雨量の半減期が長くなる、という傾向が検出された。また、地下水位ピークと雨量指標ピークの相関は、概して凸型の飽和型曲線で表されることが多いが、大規模降雨時に限って地下水位ピークが急増する地点が存在することもわかった。

地下水位ピークの雨量指標ピークに対する遅延時間については、図示していないが、降雨規模が大きいほど地下水位ピークが雨量指標ピーク直後に現れるようになることがわかった。解析期間中の最大規模の降雨時における遅延時間は、44 孔中の 28 孔で 4 時間以内であったが、8 孔では 12 時間以上になった。



2. 雨水と湧水の安定同位体比の計測と解析

雨水の酸素安定同位体比は標高が上がるにつれて小さくなるといわれている（高度効果）。一方、山体に浸透した後は同位体比に変化が生じないため、湧水の同位体比を計測することによって、その起源となる雨が降った標高を推測することができる。この結果、山体地下水が集中する斜面（高い標高で降った雨水が流域界を越えて集中する斜面）を検出でき、水文学的視点に基づく崩壊危険箇所抽出が可能になると期待される。そこで、既往崩壊斜面とその周辺地域を対象として、湧水の同位体比の計測を行った。

図-2.1に示した飛養曾地区では、湧水の酸素安定同位体比は標高が高くなるにつれて概して減少している（図-2.1左パネル）。これは雨水の高度効果を反映した結果と考えられる。ただし左岸側や右岸側の流域界末端の地点（12番、19～21番）では、標高が低いにも関わらず同位体比は小さくなった。次に、雨水の高度効果に基づき予測した同位体比からの偏差（図-2.1右パネル）をみると、上記の12番、19～21番では著しく小さな値となった。このことから、流域の集水地形とは関係なく、流域界の尾根を流動経路とする山体地下水の流れが存在することが示唆された。そして、このような地下水流が、長殿、赤谷、北股、川原樋川などで発生した深層崩壊の誘因になっている可能性が推察された。



図-1.3 地下水位ピークの再現精度の高さに基づく雨量指標のランク付け

緑色の○が大きいほど、再現精度が高いことを表す。赤色の○は、全 44 地点についての各指標の平均順位を表す。「全」はイベント積算雨量を表す。

3. 物理水文モデルの開発と適用

付加体の地質構造を持つ山地における水文プロセスを解析するために、物理水文モデルの開発を行った。このモデルは、有限要素法に基づき三次元のリチャーズ式を陰解法で解くものである。各地区の深層崩壊の深さを考慮して、透水性基岩の厚さを清水地区および那智地区については30 m、長殿、熊野、栗平、北股、赤谷、坪内（冷水）地区については40 mと仮定した。基岩の水分特性には、Katsuma et al. (2009, Vadose Zone J., 8. 557-573) を参考にしてDL級岩盤の値を設定した。飽和透水係

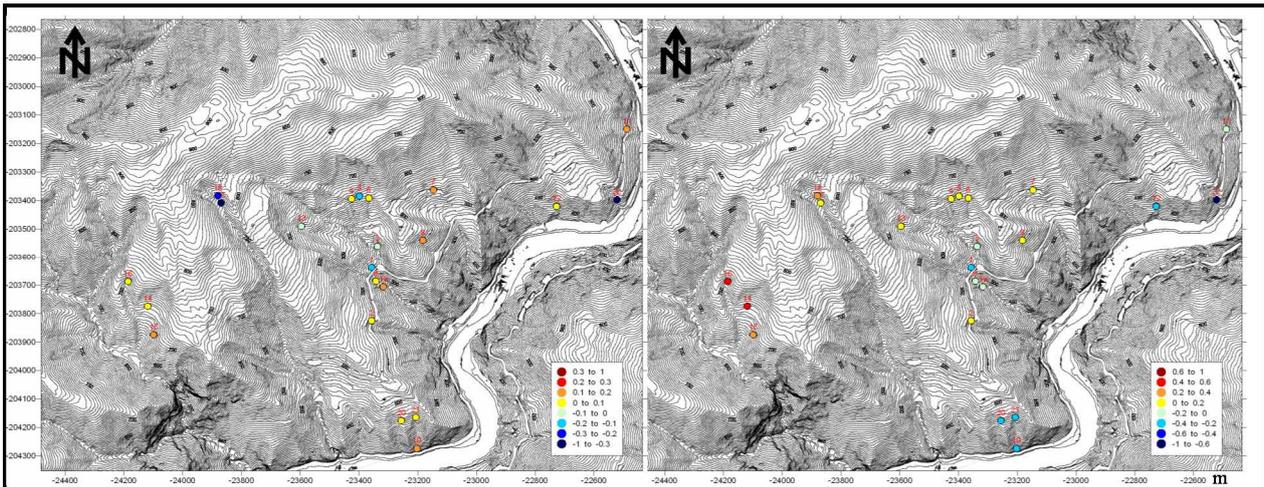


図-2.1 飛養曾地区湧水酸素安定同位体比の平均からの偏差(左)と予測値からの偏差(右)

数の値は12.24 mm/hである。

まず初めに、豪雨発生前の地下水位(通常時地下水位)分布を特定する為に、気象庁アメダス風屋の1996~2015年の平均年雨量から年蒸発散量(800 mmと仮定)を差し引くことで得られた平均降雨強度(0.19 mm/h)を地表面から供給し、動的平衡状態が達成されるまで計算を行った。これに続いて、紀伊半島大水害時の降雨イベントを模した計算を行った。紀伊半島大水害時には、基岩の飽和透水係数を超える強度の降雨が、およそ3日間続いた。このような雨が降る場合、基岩に浸透しきれなくなった雨水が土層と基岩の境界面において飽和帯を形成する。このことから本研究では、豪雨の継続中に土層基岩境界面の圧力水頭をゼロに固定する計算手法を提示した。実際の計算では豪雨の継続時間を72 hと仮定して、72 h後の基岩底面の圧力水頭を出力し、降雨開始前の値からの増加量を地下水位上昇量と見なして解析した。計算に際しては、観測地下水位の解析結果に基づいて、基岩の有効孔隙率の分布を推定した。

図-3.1には、熊野地区における地下水位上昇量の計算結果を示した。崩壊斜面直上の稜線において高い地下水位上昇が計算されている。また崩壊地東側の斜面では、上部において水位上昇量が小さく、

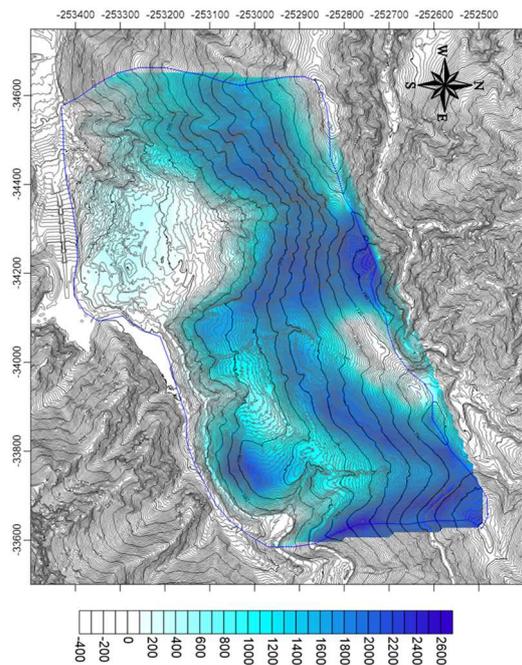


図-3.1 地下水位上昇量(熊野地区)
軸の単位は m ; カラースケールの単位は cm

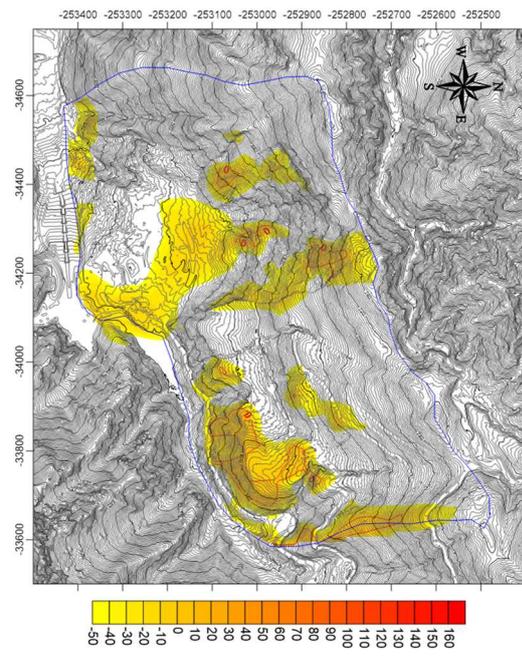


図-3.2 地下水位既往最大値超過量
軸の単位は m ; カラースケールの単位は cm

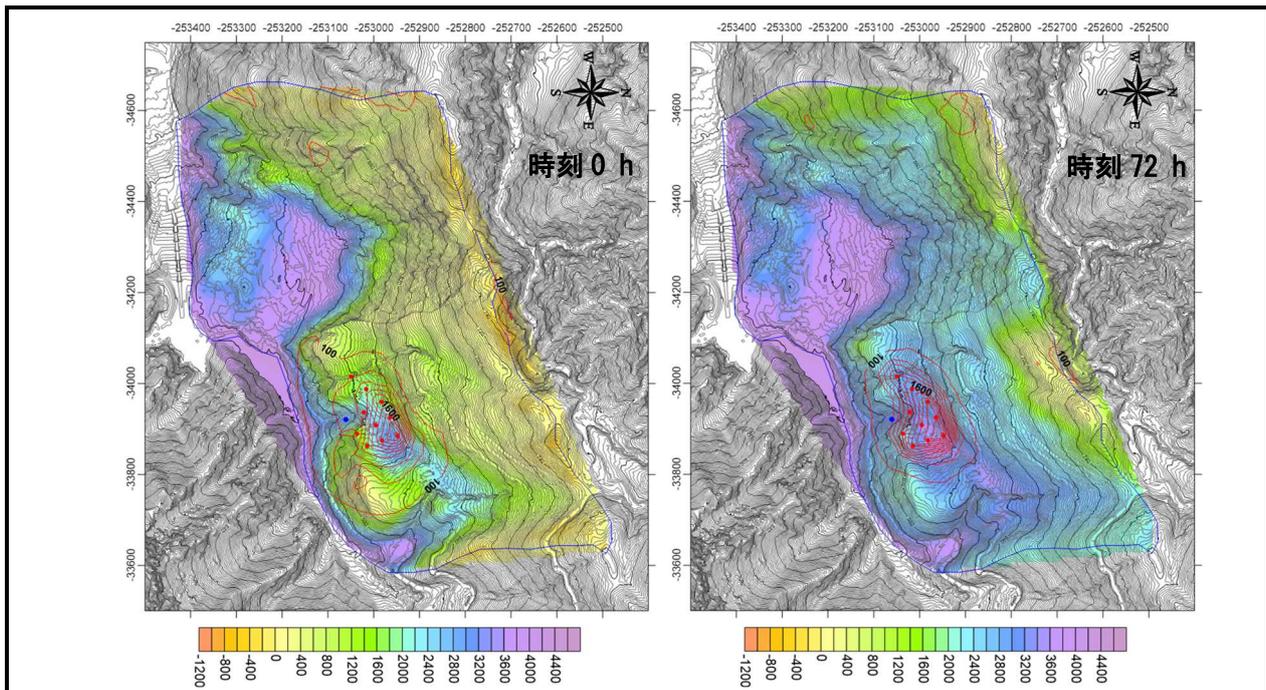


図-3.3 排水工による地下水位低下量 (軸の単位は m ; カラースケールとコンターの単位は cm)

中部～下部において水位上昇量が大きい。これらの計算結果は実測値の傾向を良好に再現していた。

次に、開発した物理水文モデルを使用して豪雨時の地下水位変動予測を行い、その結果に基づいて深層崩壊に対する警戒・避難を実施する方法について検討した。ここでは、紀伊半島大水害時の降雨イベントを模した計算で得られた地下水位の最大値を「地下水位既往最大値」とみなし、これを上回る地下水位上昇が予測された場合に、深層崩壊の発生危険度が大きくなっているとして、警戒・避難の判断を行うのが適切と考えた。想定した降雨波形は、「豪雨が18時間継続し、その後6時間休止する」という24時間周期のパターンを5回繰り返したものである。時刻96 hの計算結果を図-3.2に示した。この図では、基岩底面において発生した地下水位を「既往最大値」と比較し、両者の差の空間分布を示している。崩壊地内の斜面や、崩壊地東側斜面の下部で、地下水位が既往最大値を超過し始めている。その後時間の経過とともに、超過エリアは拡大し、超過量も大きくなった。時刻120 hでは、崩壊地の縁や、崩壊地東側の斜面上部を除いたほぼ全域において、既往最大値超過となり、超過量の最大値は160 cmに達した (図は省略)。

さらに開発した物理水文モデルを使用して、深層崩壊発生リスクを低下させるための水抜きボーリングの効果を評価した。計算では、図-3.3の青○印の位置から水抜きボーリングを掘削し、赤○印の位置の地下水を排除することを想定した。その他の計算条件 (初期条件、降雨波形、基岩の物理特性) は図-3.1と同じである。

図-3.3では、排水工事を行っていない場合の地下水位分布を塗りつぶしの色で表示した上で、排水工事 (水抜きボーリング) による水位低下量を赤色のコンターで示している。時刻0 h (通常時地下水位分布) の結果を示した図-3.3左パネルでは、1 m以上の水位低下を示すエリアが、地下水を排除した地点 (赤○印) の周辺に大きく広がっていることがわかる。詳しく見ると、地下水排除地点の上流側だけでなく、側方や下流側にも水位低下エリアが広がっている。このことから、地下水排除工は、水抜きボーリング掘削地点やその上流側の水位を低下させる直接的な効果に加えて、地下水脈を遮断することによって地下水流下域の水位を間接的に低下させる効果も発揮すると考えられる。そして、この間接的な効果を発揮させるためには、排水工事を斜面末端で行うのではなく、斜面中部や上部で行うことが有効と考えられる。豪雨時の状況を示した図-3.3右パネルでは、排除工の効果が及ぶエリアは縮小したものの、水抜きボーリング掘削地点周辺における地下水位低下量の絶対値は大きくなった。以上の計算結果から、水抜きボーリングによる地下水排除工は、地下水位の低下に大きな効果を発揮するが、豪雨時にはその効果が及ぶ範囲が限定的になることを考慮して、施工の位置や密度を決定する必要があることがわかった。

⑦研究成果の発表状況

- 小杉賢一朗，山体地下水の調査技術について，砂防学会関西支部研究報告会，京都，2014. 6. 21.
- 小杉賢一朗・正岡直也・糸数 哲・水山高久，基岩地下水位変動の解析と深層崩壊発生時刻の予測について，H26砂防学会研究発表会，新潟コンベンションセンター，2014. 5. 28-29.
- 小川内良人，桜井亘，酒井良，岩田孝治，小杉賢一朗，横山修，佐藤美波：紀伊山地に分布する四万十帯で抽出された岩盤クリープ斜面の地質および水文特性について，H26砂防学会研究発表会，新潟コンベンションセンター，2014. 5. 28-29.
- 金村和生，桜井亘，酒井良，岩田孝治，小杉賢一朗，岡島信也：熊野地区における深層崩壊と地質・水文特性との関係，H26砂防学会研究発表会，新潟コンベンションセンター，2014. 5. 28-29.
- 正岡直也・小杉賢一朗・水山高久・糸数 哲・桜井 亘・酒井 良・岩田孝治・永田雅一・植田芳弘・小川内良人・清水幹輝，安定同位体比を用いた地下水流動機構の解明ー紀伊半島深層崩壊地の事例ー，H26砂防学会研究発表会，新潟コンベンションセンター，2014. 5. 28-29.
- 柿本篤史・小杉賢一朗・糸数 哲・正岡直也・水山高久・山川陽祐・小島永裕・安井 秀・安永一樹・田中利和，中古生層堆積岩山地における山地下水を考慮した水文過程，H26砂防学会研究発表会，新潟コンベンションセンター，2014. 5. 28-29.
- 金村和生・桜井 亘・北垣啓文・酒井 良・平野 剛・小杉賢一朗・岡島信也・今井千鶴，熊野地区における深層崩壊と地質・水文特性との関係（その2），H27砂防学会研究発表会，栃木県総合文化センター，2015. 5. 20-21.
- 高見友佑・小杉賢一朗・正岡直也・水山高久・松四雄騎・山川陽祐・安井 秀・安永一樹・田中利和，大起伏堆積岩山地における基岩地下水の水文挙動の解析，H27砂防学会研究発表会，栃木県総合文化センター，2015. 5. 20-21.
- 小杉賢一朗・高見友佑・正岡直也・Cristobal Padilla・水山高久・松四雄騎・山川陽祐・安井 秀・安永一樹・田中利和・山内政也・山根 誠・小松慎二・影浦亮太・奥村 稔・河戸克志，地形解析・調査ボーリング・高密度電気探査・空中電磁探査ならびに水文観測を組み合わせた崩壊危険斜面の特性把握，H27砂防学会研究発表会，栃木県総合文化センター，2015. 5. 20-21.
- 小松慎二・村重直邦・伊藤正美・山根誠・今森直紀・北垣啓文・平野剛・小杉賢一朗，北股地区深層崩壊地における水理地質構造の検討（その2），H28砂防学会研究発表会，富山県民会館，2016.5.18-19.

⑧研究成果の社会への情報発信

読売新聞，深層崩壊 進む避難態勢作り 危険度探る先端的研究も，2013年7月29日

毎日新聞，解明進む深層崩壊 地下水位上昇がカギ，2013年8月17日

平成26年度京都大学農学研究科オープンキャンパス・ミニレクチャー，森と水の関わりを解き明かす，2014年8月7日（参加人数60名）

⑨表彰、受領歴

なし

⑩研究の今後の課題・展望等

地下水位変動を推定するための最適な降雨指標の検討に関しては、警戒情報・避難勧告を適切に発表することを念頭に検討を行ったが、今後は、本研究の成果を発展させて、警戒避難を解除するタイミングについても検討を行っていききたい。

本研究では、雨水安定同位体比の高度効果を利用して、湧水安定同位体比の絶対値から地下水流動経路の推定を行った。これとは別に、安定同位体比の季節変動を利用した滞留時間の推定方法もある。今後の研究では、この方法も併用して、地下水流動経路の推定精度向上を図っていききたい。

本研究で開発した物理水文モデルは、強降雨条件下でも安定的に計算を進めることができ、警戒避難の判断に有益な情報を提供できるとともに、水抜きボーリングなどのハード対策の効果を評価できるものである。今後は、実際の地下水排除工データを用いて、モデルの更なる精度向上を図っていききたい。さらに、高密度電気探査結果や空中電磁探査結果を利用して、計算領域の物理特性を自動的に特定する手法についても開発を行っていききたい。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

深層崩壊の発生危険度を適切に評価する雨量指標については、これまで十分な検討がなされておらず、土壌雨量指数と60分間雨量を組合せや、半減期72時間実効雨量と半減期1.5時間実効雨量の組合せなど、表層崩壊や土石流の予測において使用される指標がそのまま用いられてきている。本研究の成果に基づけば、深層崩壊をターゲットとした、より適切な降雨解析手法を提示することができ、適切な警戒・避難に貢献すると考えられる。

これまで用いられてきた湧水の電気伝導度の代わりに、安定同位体比を指標とすることによって、複雑な基岩地質構造に伴い電気伝導度が複雑な空間分布を示す付加体堆積岩山地においても、地下水流動経路の把握を精度よく行うことが可能となり、崩壊危険斜面の絞り込みに貢献すると考えられる。

本研究で開発した物理水文モデルを応用することにより、警戒避難の判断に有益な情報を提供できるとともに、水抜きボーリングなどのハード対策の効果を定量的に評価できると期待される。