

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2014

課題番号：22248018

研究課題名(和文) 豪雨時の表層崩壊に起因する土石流の規模と発生時刻の予測

研究課題名(英文) Estimation of debris flows triggered by surface landslides

研究代表者

小杉 賢一郎 (Kosugi, Ken'ichirou)

京都大学・(連合)農学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30263130

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,300,000円

研究成果の概要(和文)：土石流に対するハード対策・ソフト対策を的確かつ効率よく実施する為に、豪雨に伴う表層崩壊の発生と崩土の土石流化のメカニズムを解明し、予測手法を開発した。表層崩壊については、地形のみでは発生メカニズムを十分に説明できず、基岩内部の地下水流動を把握する必要があることが明らかとなり、電気探査や空中電磁探査に基づく予測手法が提示された。さらに、基岩からの湧水が土石流の規模を増大させる可能性があることが確かめられた。

研究成果の概要(英文)：For contributing to effective hard- and soft-counter measures against debris flows, this study clarified mechanisms of surface landslide occurrences and movements of collapsed materials, and developed estimating methods. It was found that, in addition to surface topography information, bedrock groundwater should be considered for accurate estimations of surface landslides. We combined ground-based electric resistivity measurements and airborne electromagnetic measurements for developing groundwater survey technique. Moreover, we confirmed that bedrock groundwater plays dominant rolls for the growth of debris flows.

研究分野：砂防学，山地保全学，森林水文学

キーワード：土砂災害 斜面崩壊 土石流

## 1. 研究開始当初の背景

豪雨のたびに発生する土石流から、人命および財産を守る為に、各種のハード対策（砂防堰堤の整備）やソフト対策（ハザードマップの作成や避難勧告の発令）が行われているが、これらの対策を的確かつ効率よく実施する為には、土石流の規模と発生タイミングを正確に予測する必要がある。

土石流の発生には、斜面の表層崩壊が引き金となっている事例が多くみられる。この場合、複雑な水文特性を有する自然斜面を対象として、自然降雨によって崩壊が発生する時点の、水みち周辺への浸透水の集中の仕方、土壌水分分布、ならびに崩壊後に堆積した土砂への水分供給の仕組みを、詳細な観測により明らかにすることによって、表層崩壊の位置、規模、タイミングならびに崩土の土石流化のプロセスを解明することが必要不可欠である。

## 2. 研究の目的

表層崩壊の危険性が高い斜面を高精度で抽出し、抽出された斜面とそれらを含む山地源流域において、水文プロセス、斜面崩壊プロセス、および崩壊土砂の挙動をモニタリングすることで、豪雨に伴う表層崩壊の発生と崩土の土石流化のメカニズムを解明する。その結果に基づき、山地源流域において発生する土石流の規模とタイミングを予測することを目的とする。

## 3. 研究の方法

水分計付貫入計と高密度電気探査を組み合わせた探査手法を、リモートセンシング技術と結合させることで発展させ、表層崩壊危険度が高い斜面を高精度で抽出できるようにする。次に、崩壊危険度が高い斜面とそれらを含む流域に、水文観測施設を設置して、自然降雨条件下で発生する表層崩壊と崩土の土石流化の様子を、モニタリングする。データ解析では、斜面崩壊から土石流に至るプロセスを、斜面内部の雨水流動、浸透水の過度の集中による崩壊発生、流域スケールでの洪水流出、崩壊土砂の土石流化の4つに分類し、それぞれの現象を再現するモデルを開発した上で、モニタリング結果を用いてモデルに改良を加えていく。そして、これらのモデルを結合させて「表層崩壊・土石流発生解析モデル」を構築し、個々の崩壊危険斜面に適用した結果を統合することによって、流域全体での土石流の規模と発生タイミングを予測する。その結果に基づいて、土石流対策のより適切なあり方について検討を加える。

## 4. 研究成果

従来の国内外の研究では、表層崩壊の予測

において、土層に浸透した雨水が地形に依って流動することによって過剰間隙水圧を発生させるとの仮定に基づいた「ブロック集合モデル」が用いられてきた。しかしながら本研究の検討によって、「ブロック集合モデル」による土層内の地下水位変動の再現精度があまり高くないことが明らかとなり、崩壊予測に誤差を生じる可能性が指摘された。例えば図-1は、六甲山系の詳細な地形を解析した結果であるが、断層線に沿った崩壊は集水面積が小さい箇所でも発生しており、「ブロック集合モデル」では地下水の集中を十分に予測することはできない。すなわち「ブロック集合モデル」により算定される斜面崩壊危険度は、地形・土層厚・土壌物理性・降雨波形などの要因を結合した指標の一つに過ぎず、実際の崩壊の発生には、断層線などに規定された地形に依存しない基岩内部の地下水流動を的確に把握する必要があることが明らかとなった。

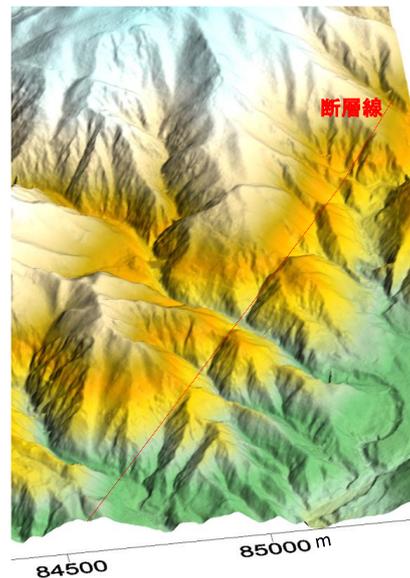


図-1 六甲山系の地形の解析結果

そこで、貫入試験による土層計測、高密度電気探査、およびリモートセンシング（空中電磁探査）を結合し、表層崩壊危険度が高い斜面の抽出を行った。図-2は、堆積岩山地の斜面末端部において、高密度電気探査ならびに空中電磁探査により得られた比抵抗値を比較したものである。空中電磁探査により検出された「低比抵抗帯が谷を横切る地点」の周辺において、高密度電気探査では明瞭な縦方向に連なる低比抵抗ラインが検出されていることがわかる。現地の露頭の観察や地形解析から、この低比抵抗ラインは断層線を表していることが確かめられており、粘土を伴った断層線に規定された不均質な地下水流が発生し、斜面末端部において湧水を形成するという水文プロセスが推測された。この傾向は、高密度電気探査では、斜面末端部で 300 Ω・m の比抵抗コンターが表層近くまで上昇

していることで表現され、空中電磁探査では、斜面末端部において表層の比抵抗が下層よりも小さくなっていることで表現されている。

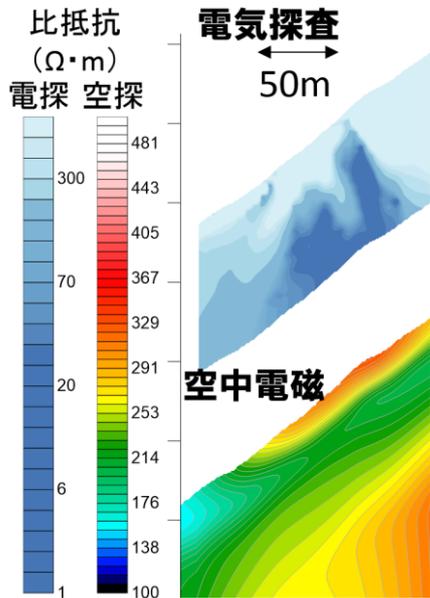


図-2 高密度電気探査ならびに空中電磁探査により得られた比抵抗値

図-2 に示した測線に隣接する谷筋で豪雨時の水文観測を行った結果、土層内に一時的に形成される飽和側方流や復帰流型の表面流の発生に、イベント雨水のみでなく地下水が寄与することが示唆された。この谷では、実際に小規模な土石流が発生したことから、基岩内の地下水が断層に規定されて土層内に湧出し、土層内の間隙水圧を大きく上昇させることで、豪雨時の斜面崩壊、土石流発生に寄与していることが推察された。

以上のように、地上の踏査・観測とリモートセンシングを組み合わせることで、斜面崩壊・土石流を引き起こす特徴的な地質・水文構造を検出できることが示された。今後、より多くの事例を検証することによって、この手法を、土砂災害の危険度予測技術として社会実装できると考えられる。

次に、崩壊発生危険斜面として抽出された斜面において間隙水圧の計測を行い、実際に基岩地下水が土層内に湧出している様子を詳細に解析した。図-3 は、花崗岩質環状岩脈を地質とする斜面の末端部において、深度の異なる3点（基岩直上、土層中央、土層上部）で間隙水圧を計測した結果であり、積算雨量 75mm の降雨イベント時の変動を示している。基岩直上の間隙水圧が最も早いタイミングで大きく上昇を示しているのに対し、土層上部の反応は開始が遅く、変動幅も小さい。土層中央の間隙水圧は中間的な振る舞いをしている。このことは、基岩直上の間隙水圧の上昇が、雨水の鉛直浸透によって引き起こされたものではない

ことを示している。基岩直上および土層中央の間隙水圧は、降雨開始以前から正の値を示していたことから、降雨開始以前から基岩内部の地下水と連結していた土層内の地下水帯において、降雨時の急激な圧力伝搬が生じ、間隙水圧の特異的な上昇が引き起こされたものと考えられる。このような現象は、本研究で実施した詳細な間隙水圧の計測によって初めて捉えられたものであり、基岩地下水と土層地下水の密接なインタラクションを示す重要なデータであり、今後、現象の普遍性・一般性の検討を実施していく予定である。

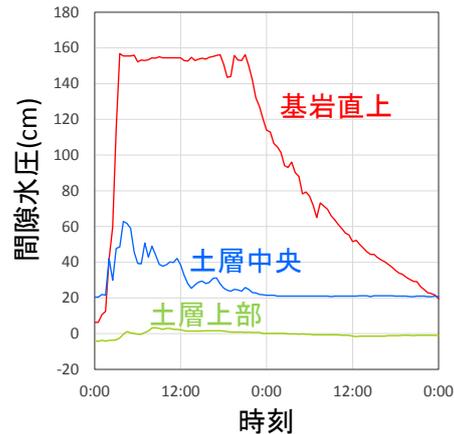


図-3 花崗岩質環状岩脈を地質とする斜面の末端部において計測された間隙水圧

更に風化花崗岩を母材とする別の斜面の末端部では、48 地点において深度の異なる3点（土層浅層、中層、下層）にテンシオメータを設置し、より詳細な間隙水圧の計測を行った。図-4 には、観測結果の一部を示した。豪雨時（たとえば図-4 の 22~25 日目）について土層下層の間隙水圧の平面二次元分布を解析したところ、降雨ピークの直前に斜面上部では、雨水の鉛直浸透と上流域からの側方流によって一部のエリアに地下水帯が形成されていた。一方斜面下部では、地下水帯が全体にまんべんなく広がっていること、ならびに大きな間隙水圧を示す部位が局所的に存在していることがわかった。そして、地下水の流れを示すフラックスベクトルからは、この高間隙水圧部位を中心として地下水が周囲に拡散していることがわかった。さらに間隙水圧と同時に計測した水温データからは、この高間隙水圧部位において基岩からの湧水があることが確認された。このように斜面下部では、基岩湧水が間隙水圧分布の形成に支配的な影響を及ぼしていることが明らかとなった。さらに時間が経過すると、斜面上部の地下水帯と斜面下部の地下水帯が連結し、間隙水圧が全域において大きく上昇することが確認された。また、斜面からの土砂生

産が、この間隙水圧の上昇のタイミングと一致する傾向があることが示唆された。以上のことから、豪雨時における基岩地下水の湧水量の増大と、降雨の鉛直浸透ならびに側方流動が結合することによって斜面土層の不安定化を招く、という表層崩壊発生プロセスが推測された。

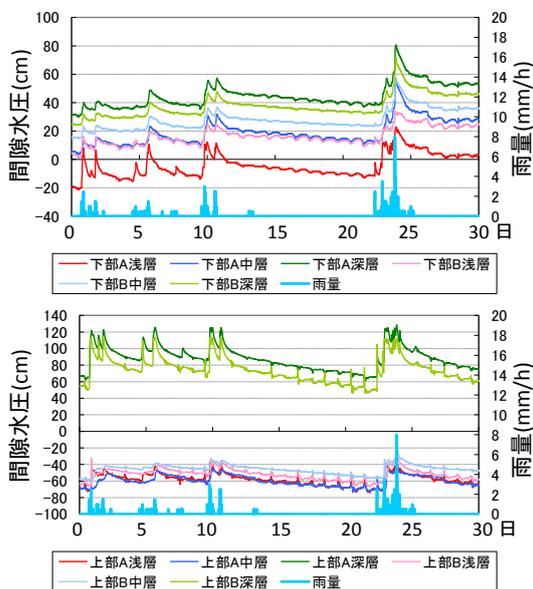


図-4 風化花崗岩を母材とする斜面の下部および上部において計測された間隙水圧

同様の結果は、同じく風化花崗岩を母材とする六甲山系の他の斜面における降雨、流量、間隙水圧、並びに斜面傾斜角の計測によっても明らかとなり、普遍性を持つ現象であると考えられた。さらにこの斜面では、小規模な土石流発生時に基岩内部の間隙水圧が大きな上昇を示すことが確認され、斜面崩壊・土石流の発生に基岩地下水が寄与することを強く示唆するデータが得られた。さらに、2014年8月20日に広島市で発生し、甚大な被害をもたらした土砂災害跡地の調査を行ったところ、土石流源頭部において大量の湧水が存在することが確認された。水温の調査から、この湧水が基岩地下水を起源としていることが推定され、基岩からの湧水が土石流の規模を増大させる可能性があることが確かめられた。

表層崩壊・土石流の発生予測については、シンプルで実用的な実効雨量を用いた手法を詳細に検討した。従来の研究では、半減期72時間の実効雨量と半減期1.5時間の実効雨量を組み合わせる手法が提案されてきたが、実際の地下水の挙動は斜面ごと、地点ごとに異なるため、半減期を一定値に固定した場合には十分な予測精度が得られないことが明らかとなった。そこで、1種類もしくは2種類の実効雨量の関数で地下水位を再現するモデルを提示し、半減期を最適化する手法を検討した。この結果、観測された地下水位を

良好に再現することに成功した。例として図-5には、六甲山の流域において計測された土層内の地下水位と基岩内の地下水位を、モデル計算値とともに示した。土層内の地下水位については、実効雨量の半減期を10.2時間に設定することによって、良好な再現結果が得られていることがわかる。一方、基岩内の地下水位については、2種類の実効雨量の組合せで良好な再現が得られたが、最適半減期の値は、68時間と1143時間であり、既往研究で提示された値よりもかなり大きくなることがわかった。さらに、これら最適化された半減期の値は、調査斜面における三次元的な地下水流動の特徴を的確に反映していることが示された。

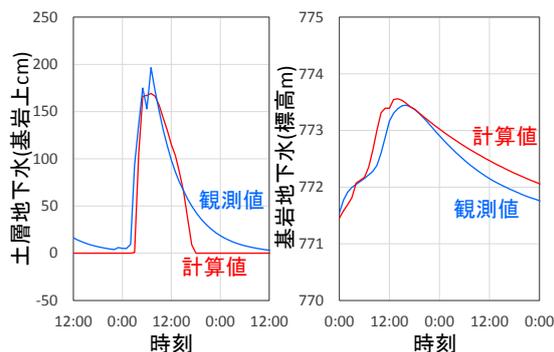


図-5 六甲山で観測された地下水位変動と実効雨量を用いたモデルによる再現結果

さらに、上記モデルよりも厳密な物理プロセスを考慮・反映させた上で、斜面内部の雨水流動、浸透水の過度の集中による崩壊発生、流域スケールでの洪水流出、崩壊土砂の土石流化を予測する手法を構築した。この手法では、実際の斜面形状を与えた上で、三次元の雨水浸透と流動を飽和・不飽和浸透理論に基づいて解き、得られた間隙水圧と土壌含水率の空間分布から力学計算に基づいて斜面崩壊・土石流の発生を予測する。土砂の移動は、土層と基岩の境界をすべり面として発生すると仮定している一方で、雨水の浸透・流動については、本研究の観測によって明らかとなった基岩地下水の影響を反映できる様に、土層と基岩層を連動して解析する構造を持たせている。

開発した手法を風化花崗岩を母材とする流域に適用し、実際に土石流が発生した際の降雨イベントを解析した結果を図-6に示した。斜面の安全率は流域の主谷中央部ならびに左岸側の小谷において1を下回り、崩壊の発生が予測されている。これは実際の崩壊発生箇所と比較的良好な一致を示していた。基岩直上の間隙水圧の分布をみると、主谷中央部には飽和地下水帯が広い範囲で発生しているのに対し、左岸側の小谷では顕著な飽和帯の存在は確認されていない。このことから、主谷中央部では基岩からの湧水が土層内に

大量の雨水の集中をもたらしており、崩土が容易に土石流化しやすい条件が形成されていたことが考えられる。この場所に、左岸側の小谷で発生した表層崩壊によって土砂が供給され、主谷で発生した表層崩壊による土砂と共に大規模な土石流となって流下し、大きな被害をもたらしたことが示された。

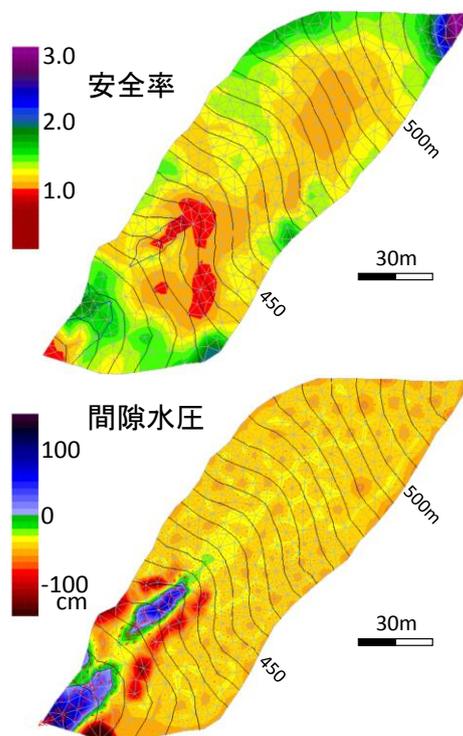


図-6 開発したモデルによる表層崩壊・土石流の発生危険度ならびに土層内水分量の予測計算結果

以上の様に本研究によって、表層崩壊が土石流化するプロセスの解明に進展が得られた。また、基岩地下水の寄与が既往研究で考えられていた以上に大きいことが明らかとなった。このことから、土石流による被害規模を正確に把握するには、地質的な要因によって基岩地下水が集中する斜面や流域をあらかじめ調査しておくことが重要であることが示された。本研究の成果に基づくことで、各溪流において災害発生前に適切な土石流対策を講じることが可能になると期待される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 33 件)

- ①宮田秀介, 藤田正治 (2015) TDR (時間領域反射測定法) を利用した堆積土砂面位および空隙率測定, 砂防学会誌, 32-38 (短報論文), 査読有,  
<http://www.jsece.or.jp/indexj.html>
- ②小杉賢一朗・水山高久 (2014) 2014 年 7 月

9 日に発生した長野県南木曾町の土石流災害の誘因となった降雨イベントの解析, 砂防学会誌, 67(4), 18-22 (短報論文), 査読有,

<http://www.jsece.or.jp/indexj.html>

- ③Katsura, S., K. Kosugi, Y. Yamakawa, T. Mizuyama, (2014) Field evidence of groundwater ridging in a slope of a granite watershed without the capillary fringe effect, J. Hydrol., 511, 703-718, 査読有,  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.021>
- ④速見智・里深好文 (2013) 山地源頭部における溪岸堆積物の水分動態と土砂移動の観測, 土木学会論文集 B1 (水工学), 69, I\_943-I\_948, 査読有,  
<https://www.jsce.or.jp/collection/index.html>
- ⑤Yamakawa, Y., K. Kosugi, S. Katsura, N. Masaoka, T. Mizuyama, Spatial and temporal monitoring of water content in weathered granitic bedrock using electrical resistivity imaging (2011) Vadose Zone J., 11,  
doi:10.2136/vzj2011.0029
- ⑥藤本将光・小杉賢一朗・林祐妃・谷誠・水山高久 (2011) 数値標高モデル (DEM) の空間分解能の違いが斜面安定解析に及ぼす影響, 砂防学会誌, 64(3), 3-10, 査読有,  
<http://www.jsece.or.jp/indexj.html>
- ⑦Liang, W. L., K. Kosugi, and T. Mizuyama (2011) Soil water dynamics around a tree on a hillslope with or without rainwater supplied by stemflow, Water Resour. Res., 47, W02541, 査読有,  
doi:10.1029/2010WR009856, 2011.
- ⑧Kosugi, K., M. Fujimoto, S. Katsura, H. Kato, Y. Sando, and T. Mizuyama (2011) A localized bedrock aquifer distribution explains discharge from a headwater catchment, Water Resources Research, 47, W07530, 査読有,  
doi:10.1029/2010WR009884

〔学会発表〕(計 37 件)

- ①堤 大三, トポチューブを用いた地形分割と界すべり面解析による表層崩壊評価手法の検討, 砂防学会研究発表会, 2015 年 5 月 21 日, 栃木県総合文化センター (栃木県・宇都宮市)
- ②和田孝志・糸数 哲・小杉賢一朗・水山高久, 林地残材の流木化に関する実態調査, 砂防学会研究発表会, 2014 年 5 月 28-29 日, 新潟コンベンションセンター (新潟県・新潟市)
- ③Miyata, S., Fujita, M., Tujimoto, Teratani, T., Simulation of flash floods in steep watersheds covered by volcanic ash, Cities on Volcano 8,

September 9-13, 2014, Yogyakarta (Indonesia)

- ④中谷加奈, 小杉恵, 今泉文寿, 里深好文, 水山高久, 平成 25 年 10 月台風 26 号により伊豆大島で発生した土石流災害の検討, 土木学会全国大会第 69 回年次学術講演会, 2014 年 9 月 10-12 日, 大阪大学豊中キャンパス (大阪府・豊中市)
- ⑤正岡直也・小杉賢一朗・糸数哲・杉本康平・藤本将光・水山高久, 花崗岩山地源流域における降雨流出と基岩内地下水位の集中的観測, 2014 年 3 月 28 日, 第 125 回日本森林学会大会, さいたま市ソニックシティ (埼玉県・さいたま市)
- ⑥小杉賢一朗・山川陽祐・松四雄騎・藤本将光・高木将行・正岡直也・糸数哲・水山高久, 花崗岩ならびに堆積岩を地質とする大起伏山地における山体地下水挙動の比較, 砂防学会研究発表会, 2013 年 5 月 29-31 日, 静岡市民文化会館 (静岡県・静岡市)
- ⑦Kosugi, K., M. Fujimoto, Y. Yamakawa, M. Takagi, T. Mizuyama, Intensive observations of stream flow and bedrock groundwater in headwater catchments with steep topography, 4-7 March 2013, US-Japan Joint Seminar on Responses of Catchment Hydrology and Forest Biogeochemistry to Climatic and Environmental Change, Honolulu (USA)
- ⑧佐山敬洋・小杉賢一朗, 分布型モデルと T-SAS 法による山地流出の時空間起源変動解析, 第 124 回 日本森林学会, 2013 年 3 月 26~27 日, 岩手大学 (岩手県盛岡市)
- ⑨正岡直也, 小杉賢一朗, 山川陽祐, 水山高久, 堤大三, 三次元浸透計算による斜面土層の不均質な透水性分布の推定, 2012 年 3 月 27-28 日, 日本森林学会大会, 宇都宮大学 (栃木県・宇都宮市)
- ⑩小杉賢一朗, 藤本将光, 三道義己, 水山高久, 木下篤彦, 岡本敦, 網野功輔, 亀田尚志, 池原浩平, 西島健二, 六甲山系西おたふく山水文試験地における基岩内地下水の動態と地質構造の解析, 砂防学会研究発表会, 2011 年 5 月 19 日, 神奈川県民ホール (神奈川県・横浜市)
- ⑪糸数哲, 小杉賢一朗, 恩田裕一, 蔵治光一郎, 田中延亮, 後藤大成, 太田岳史, 水山高久, 植生回復状況の異なる花崗岩山地小流域の降雨流出シミュレーション, 砂防学会研究発表会, 2011 年 5 月 19 日, 神奈川県民ホール (神奈川県・横浜市)
- ⑫山田拓, 小杉賢一朗, 糸数哲, 藤本将光, 水山高久, 谷誠, 小島永裕, 堆積岩流域における基岩地下水の観測研究, 砂防学会研究発表会, 2011 年 5 月 19 日, 神奈川県民ホール (神奈川県・横浜市)
- ⑬藤光智香, 小杉賢一朗, 水山高久, 岡本敦, 木下篤彦, 池原浩平, 西島健二, 三次元浸透流解析に基づく表層崩壊発生予測手法の六甲山系への適応, 砂防学会研究発表会,

2011 年 5 月 19 日, 神奈川県民ホール (神奈川県・横浜市)

- ⑭三道義己, 小杉賢一朗, 藤本将光, 谷誠, 水山高久, 岡本敦, 木下篤彦, 平松晋也, 福山泰治郎, 山地源流域における岩盤地下水の降雨応答特性に地形・地質が及ぼす影響, 砂防学会研究発表会, 2011 年 5 月 19 日, 神奈川県民ホール (神奈川県・横浜市)
- ⑮Kosugi, K. M. Fujimoto, Y. Sando, T. Mizuyama, Effects of bedrock groundwater on landslide occurrences in a steep headwater catchment, American Geophysical Union Fall Meeting, 7 Dec. 2011, San Francisco (USA)

[図書] (計 1 件)

小杉賢一朗 (2014) 調整サービス「どのように環境が制御されるのか?」, 日本森林学会 (監修) 井出雄二・大河内勇・井上真 (編), 『教養としての森林学』, 文永堂, 97-105.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小杉 賢一朗 (KOSUGI, Kenichiro)  
京都大学・農学研究科・准教授  
研究者番号: 30263130

### (2) 研究分担者

水山 高久 (MIZUYAMA, Takahisa)  
京都大学・農学研究科・教授  
研究者番号: 00229717

里深 好文 (SATOFUKA, Yoshifumi)  
立命館大学・理工学部・教授  
研究者番号: 20215875

堤 大三 (TSUTSUMI, Daizo)  
京都大学・防災研究所・准教授  
研究者番号: 40372552

宮田 秀介 (MIYATA, Shusuke)  
京都大学・防災研究所・助教  
研究者番号: 80573378

勝山 正則 (KATSUYAMA, Masanori)  
京都大学・学際融合教育研究推進センター・特定准教授  
研究者番号: 40425426

佐山 敬洋 (SAYAMA, Takahiro)  
独立行政法人土木研究所・水災害リスクマネジメント国際センター・研究員  
研究者番号: 70402930

藤本 将光 (FUJIMOTO, Masamitsu)  
立命館大学・理工学部・助教  
研究者番号: 60511508