

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24780150

研究課題名(和文) 山体の水理地盤構造の実態解明に基づく斜面崩壊発生機構の検討

研究課題名(英文) Analysis of rainfall-induced landslide mechanism based on in situ hydro-geological surveys for mountain slopes

研究代表者

山川 陽祐 (YAMAKAWA, Yosuke)

筑波大学・生命環境系・助教

研究者番号：20611601

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：最新の地盤内探査手法、地形測量手法および高密度の水文観測網を複数の山地流域に適用し、原位置において地盤構造調査・水文調査を実施することにより、基岩深部層を含む山地流域の雨水挙動を規定する透水性の空間分布に関する構造の実態解明を従来に無く詳細に行った。その結果、1ha程度の比較的小さな流域であっても地質構造に規制された空間的に不連続な地下水帯構造の存在が示唆され、このような空間的に不均質な水理地質構造が斜面崩壊の発生・非発生および崩壊の発生時刻の地点間差に大きく寄与している可能性が考えられた。

研究成果の概要(英文)：In situ structures of mountain watershed in terms of spatial variations of permeability, which might significantly control groundwater dynamics within soil and deep bedrock layers, were observed with unprecedented detail by applying new subsurface investigation and topographical survey techniques coupled with intensive hydrometric observations for some mountain watersheds. This study imply existences of multi system of groundwater aquifer in the bedrock caused by geological structures within even the watershed smaller than about 1 ha, and indicated that those hydro-geological structure with highly spatial variation could significantly affect occurrence of landslides and time lags of landslides induced by rainfall.

研究分野：山地流域における地下水流動および斜面崩壊メカニズムの解明とそのための地盤内探査手法の開発・適用

キーワード：水理地質構造 基岩地下水 斜面崩壊 山地流域 地盤内探査手法

## 1. 研究開始当初の背景

豪雨に起因する土砂災害は毎年のように起こり、甚大な被害をもたらしている。今後、気候変動によって極端な大雨の頻度が増加する可能性や熱帯低気圧の強度が増加する可能性があり (IPCC 第 4 次報告書, 2007), 山腹斜面崩壊やこれに伴う土石流などの土砂災害が頻発することが懸念される。このような状況の下、国土の約 7 割が山地である我が国においては、斜面崩壊の発生予測 (箇所, 時刻, 規模) が益々大きな社会的要請となっている。しかし、実用的な危険箇所検出手法・システムが未だ確立していない。そして、それ以前に、崩壊予測を行うために不可欠な崩壊発生メカニズムの解明が十分に進んでいない。実際の山腹崩壊には表面地形からは水の集中が考えられない凸型斜面で発生する事例や、同様の地形要素 (集水面積や勾配) を有する複数の斜面のうちの幾つかで選択的に発生する事例が数多くあり (土木研究所資料「がけ崩れ災害の実態」, 1999), 近年の山間地を対象とした精密な数値地形図の整備にも関わらず、地表面地形から崩壊危険箇所を予測することの限界が露呈している。より本質的に崩壊の発生メカニズムを理解するためには、地盤強度に関する構造に加えて、上述のような雨水挙動を規定する透水性の空間分布に関する構造 (「水理地盤構造」) が流域内の斜面間において実際にどのように異なり、崩壊の発生・非発生に寄与しているかを明らかにすることが必要不可欠である。そのためには、より広範囲にわたる流域内での徹底的な (時空間的に高密度な) 地盤構造調査および水文観測を実施し、地盤強度の構造と水理地盤構造の実態を解明することが最も基礎的でありながら重要な研究課題である。

## 2. 研究の目的

最新の地盤内探査手法 (電気探査法, 土壌水分計付貫入計) と高密度観測網 (基岩ボーリング孔を用いた地下水位観測, 基岩湧水量観測, 多点水質分析) を山地流域に適用し、地盤調査・水文水質観測を実施することにより、土層および基岩層を含む地盤の雨水挙動を規定する透水性の空間分布に関する構造 (「水理地盤構造」) の実態を従来に無く詳細に解明する。さらに、その水理地盤構造がどのように斜面崩壊の発生形態 (箇所, 時刻, 規模) に影響を及ぼすかを検討する。

## 3. 研究の方法

研究期間全体を通して、花崗岩地質流域および堆積岩地質流域について、基岩ボーリングおよび基岩湧水の湧出量観測, 土壌水分計付貫入計を用いた地盤構造探査, 地形解析, 地質踏査等に基づいて水理地質構造の実態解

明に向けた原位置観測を行った。

## 4. 研究成果

各流域における原位置調査の結果, 1ha 程度の比較的小さな流域であっても地質構造に規制された空間的に不連続な地下水帯構造の存在が示唆された。このような空間的に不均質な水理地質構造が斜面崩壊の発生・非発生および崩壊の発生時刻の地点間差に大きく寄与している可能性が考えられた。以下にその詳細を地質毎に示す。

(1) 花崗岩地質の流域 (兵庫県六甲山系) については、流域面積 1.4ha の試験流域を設定し、土層井戸内の水位観測 (14 箇所), 基岩ボーリング孔内の水位観測 (8 箇所), 渓流水および地下水 (土層と基岩) の水質分析 (電気伝導度, 金属イオン濃度) を行った。採水試料の電気伝導度の値の大小に明瞭な空間分布が認められ、流域内において異なる涵養源をもつ地下水帯の存在が示唆された。土層井戸の降雨応答については、降雨に鋭敏に反応する箇所, 恒常的あるいは準恒常的な地下水帯が認められる箇所という空間的な差異があった。基岩地下水位の降雨応答特性にも流域内で鋭敏さに差異が認められた。乾燥期と湿潤期では、地下水面形状 (地下水面標高分布) が大きく異なり、時期 (先行降雨量の差異) による地下水流動プロセスの変化が示唆された。これらの空間的に不均一な水理構造は地形および現場踏査から推定されたりニアメントに強く規制されたものであると考えられた。

(2) 堆積岩地質の流域については、滋賀県の比良山系と静岡県の大井川水系を対象とした。比良山系においては斜面距離約 500m の流れ盤斜面 (面積約 400ha) を試験地として設定し、斜面上の湧水 (9 箇所) の流出量計測, 電気探査, 基岩ボーリング孔内の水位観測 (3 箇所), 渓流水および地下水 (ボーリング, 湧水) の水質分析 (電気伝導度, 水安定同位体, 金属イオン濃度), 航空レーザー測量に基づく詳細な数値地形モデルを用いた地形解析, および現地踏査による地質構造の検討を行った。地形解析の結果, 重力による変形の結果形成されたとみられる直線状あるいは馬蹄形の段差地形が多数確認された。特に、直線状の段差は斜面末端部を通る活断層に付随する断層破砕体を含む構造弱線と推察された。実際、湧水点 (15 点を確認) にはしばしば断層粘土が確認された。対象斜面では標高の異なる基岩湧水が多数存在することから、断層ガウジが遮水層となり、これに規制されて基岩地下水が湧出するという水文プロセスの形態が推定された。斜面上に掘削されたボーリング孔内の地下水面および湧水点を結んだ推定地下水面に明瞭な段差があること, また、電気探査による比抵

抗分布において湧水点付近において顕著な低比抵抗帯が検出されたことは、この地下水流動機構を支持するものである。基盤岩湧水の流出波形は、いくつかの類似したパターンに分類されることが分かった。斜面中腹の湧水は降雨応答が緩やかで基底流量が多く、斜面脚部の湧水は降雨応答が鋭敏で比較的早い流出が卓越していた。中腹の一つの湧水点では流出量が、その直上（水平距離約 40m）に掘削したボーリング孔内の水位と明瞭な相関（流出量が水位の 2 乗に比例）を示し、基岩地下水の貯留量が流出量を大きく規制する可能性が示された。中腹に位置する湧水群のハイドログラフはそれぞれ概ね類似し、脚部の湧水に比べて基底流出成分が豊富であった。斜面縦断方向に配列する中腹湧水と脚部湧水のハイドログラフのピークには 3 日程度の時間差があり、斜面縦断方向についてある程度分断された地下水流動機構を持つことが推定された。中腹の湧水群間についても、流出波形のピークは 1~2 日程度の時間差があった。さらに、湧水間で流量増加や逓減の特徴に違いが認められた。基底流成分が豊富な中腹湧水群についてもそれぞれある程度分断された地下水流動機構を有すると考えられた。また、中腹湧水群の年間水温変動は概ね 10~13 °C であり、脚部湧水群に比べて極めて安定しているものの、中腹湧水群の間でも変動幅の差が顕著であった。このことから、観測斜面において降雨に対する変動を異にする（異なった賦存量や地下水帯深度を持つ）複数の地下水帯が基盤内に存在していることが示唆された。湧水および雨水の水安定同位体比の分析から、湧水は滞留の影響を著しく受けていること、また、地点間での滞留時間にはそれ程差が無い可能性が考えられた。湧水の流出特性をタンクモデルを用いて解析した結果と水安定同位体比の分析結果を総合的に検討したところ、湧水群はそれぞれ 1~10 ha ほどの集水面積を有する可能性が考えられた。

大井川水系の試験地については、流域面積約 1700ha の流域内の小流域および斜面上の湧水（4 箇所）の流出量計測、渓流水および地下水（ボーリング、湧水）の水質分析（電気伝導度、水安定同位体、金属イオン濃度）、航空レーザー測量に基づく詳細な数値地形モデルを用いた地形解析、および現地踏査による地質構造の検討を行った。先行降雨の小さい時期に行った支流の流量観測から、右岸側の支流群は比流量が大きく電気伝導度が高く、左岸側の支流群は比流量が小さく電気伝導度が低い結果が得られた。湧水の降雨応答は（比良山系に比べて）地点間で大きく異なる特性を示した。高標高の湧水は低標高の湧水に比べて湧水量が顕著に少ないこと、同流域内の左右岸の斜面上に位置する湧水点間において、流量の逓減特性が異なること等が原位観測から示された。低標高の湧水水温は夏季、冬季を通じて概ね 8~11 °C 前後で

非常に安定しており、電気伝導度についても、観測期間を通じて極めて高い値を示し、より基岩深部からの流出成分が卓越すると考えられた。4 箇所の湧水量変動と実効降雨（先行降雨量の影響を M 時間後に半減させたものを累積する先行降雨量の評価法）の対応について検討した結果、それぞれの最適半減期（M 時間）は 21~117 時間の範囲で大きなばらつきを呈した。また、湧水の水安定同位体比の計測結果から、それぞれの標高に降った降雨が標高準に順当に湧出することによって湧水を形成している可能性が示唆された。これらの小流域の流出特性および基岩湧水の降雨応答特性は、流域の地質構造（断層および層理面の走行・傾斜）が地下水流動プロセスを大きく規制している結果と考えられた。特に左・右岸の流出応答特性の差異については、斜面勾配と斜面長の違いからも推定される左・右岸の地質構造の違いが大きく関係していると考えられた。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 2 件）

Yuki Matsushi, Yosuke Yamakawa, Yusuke Takami, Naoya Masaoka, Ken'ichiro Kosugi: Rainfall-recharge-runoff processes through bedrock groundwater - implications for triggering of deep-seated catastrophic landslides-, Proceedings of 10th Asian Regional Conference of IAEG, Tp1-09, 2015, 査読有り.

山川陽祐, 堀田紀文, 経隆悠: 南アルプス破碎帯流域における水・土砂流出特性の解析 -大井川水系・東河内沢流域における観測事例-, 中部森林研究, 第 63 号, pp. 141-142, 2015, 査読有り.

〔学会発表〕（計 9 件）

谷口未峰, 山川陽祐, 経隆悠, 堀田紀文, 山中勤, 岸和央: 南アルプス付加体堆積岩山地における基岩湧水の降雨応答特性 (ポスター), 平成 28 年度砂防学会研究発表会, P1-050, 富山県民会館 (富山県富山市), 2016.5.18.

山川陽祐: 南アルプス付加体堆積岩山地における基岩湧水の降雨応答特性 - 大井川水系東河内沢流域における観測事例 - (ポスター), 平成 27 年度砂防学会研究発表会, P1-032, 栃木県総合文化センター (栃木県宇都宮市), 2015.5.20.

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, 平成 27 年度砂防学会研究発表会, P1-034, 栃木県総合文化センター (栃木県宇都宮市),

2015.5.20.

山川陽祐, 堀田紀文, 經隆悠: 南アルプス  
破碎帯流域における降雨流出特性および  
地形・地質構造の解析 -大井川水系・東河  
内沢流域における観測事例- (ポスター),  
第6回 GIS-Landslide 研究集会, P-15, 東  
京大学柏の葉キャンパス駅前サテライト  
(千葉県柏市), 2015.1.16

山川陽祐, 堀田紀文, 經隆悠: 南アルプス  
破碎帯流域における降雨流出特性 -大井  
川水系・東河内沢流域における観測事例-  
(ポスター), 2014 年度中部山岳地域大学  
間連携事業年次報告会, WM1, 信州大学農  
学部 (長野県上伊那郡南箕輪村),  
2014.12.12

山川陽祐, 堀田紀文, 經隆悠: 南アルプス  
破碎帯流域における水・土砂流出特性の解  
析 -大井川水系・東河内沢流域における観  
測事例-(口頭), 第4回中部森林学会大会,  
712, 名古屋大学農学部 (愛知県名古屋市),  
2014.10.25.

山川陽祐, 松四雄騎, 小杉賢一朗, 高見友  
佑, 正岡直也, 糸数哲, 水山高久, 山根誠,  
小松慎二, 山内政也: 付加体堆積岩山地に  
おける降雨流出プロセスの解析 - 滋賀県  
葛川流域における湧水の観測事例 - (口  
頭), 平成 26 年度砂防学会研究発表会,  
R6-05, 新潟市朱鷺メッセ新潟コンベンシ  
ョンセンター(新潟県新潟市), 2014.5.28.

山川陽祐, 松四雄騎, 小杉賢一朗, 高見友  
佑, 正岡直也, 糸数哲, 水山高久: 付加体  
堆積岩山地における降雨流出プロセスの  
解析 - 滋賀県葛川流域の事例 - (口頭),  
第125回日本森林学会大会, T2-01, さい  
たま市ソニックシティ (埼玉県さいたま  
市), 2014.3.28.

Yosuke Yamakawa, Ken'ichirou Kosugi,  
Naoya Masaoka, Yuki Matsushi, Tetsushi  
Itokazu, Takahisa Mizuyama:  
Application of the electrical  
resistivity imaging for detecting  
groundwater flowing on a mountain  
slope(oral), International seminar on  
sediment disasters caused by deep  
landslides, Wood Composite Hall, Uji  
Campus, Kyoto University, Uji, Kyoto,  
Japan, 2013.9.26.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山川 陽祐 (YAMAKAWA, Yosuke)  
筑波大学・生命環境系・助教  
研究者番号: 20611601

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: