

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 4 日現在

機関番号：34315  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2011～2012  
 課題番号：23780163  
 研究課題名（和文） 山地斜面における地下水流出に伴う土砂流出の実態と斜面崩壊に及ぼす影響  
 研究課題名（英文） Sediment discharges by the groundwater discharge at mountainous hillslope and its effect on the shallow landslide  
 研究代表者  
 藤本 将光（FUJIMOTO MASAMITSU）  
 立命館大学・理工学部・助教  
 研究者番号：60511508

### 研究成果の概要（和文）：

山地斜面における地下水流出に伴う土砂流出の実態の把握およびそれらが表層崩壊に与える影響を評価するために観測を行った。降雨の規模が大きくなるほど土砂流出量は多くなる傾向を示したが、斜面内の水の選択的流出経路の変化は明瞭に認められず、観測斜面は比較的均質な水の流動形態であった。しかし、大規模な降雨時において、基岩から土層に向けた鉛直上向きの基岩地下水の湧出が観測され、斜面の不安定要因となると考えられる。

### 研究成果の概要（英文）：

Sediment discharges by the groundwater discharge at mountainous hillslope and its effect on the shallow landslide, is still incomplete. A dense observation study was conducted to understand the groundwater and bedrock groundwater movements and sediment discharge. We observed relatively homogeneous groundwater movement and the exfiltration of bedrock groundwater, forming perennial groundwater that was very specific and local.

### 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：森林科学

科研費の分科・細目：森林学・森林科学

キーワード：斜面崩壊，高密度観測，トレーサ，選択的流出経路，斜面安定解析

#### 1. 研究開始当初の背景

近年、地球環境変化に伴って、気象変動が激化する傾向にあり、降雨特性の変化に伴って災害の発生数の増大、規模の拡大が懸念される。

従来の研究では、崩壊跡地における観測、観察から、数多くのパイプが存在することが指摘されている。パイプを含む選択的流出経路は、斜面土層内の浸透水の排水システムと

して機能的に効果し、斜面を安定化させる場合と経路の閉塞により排水システムの効果が低下することで、間隙水圧の上昇を引き起こし、崩壊発生の要因となることが指摘されている。崩壊発生の要因となるパイプや選択的経路の閉塞現象を明らかにするためには、斜面土層内部の流出経路を把握することが必要不可欠である。そのため、高密度観測網を用いた土層内水移動経路の詳細な観測と

土砂流出観測を併用することで、選択的な流出経路の実態および地下水流動に伴う土砂流出過程を解明することができ、さらに、それらの要因が斜面安定に与える影響を評価することが求められている。

## 2. 研究の目的

本研究は、山地斜面において高密度観測網およびリアルタイムモニタリングを行うことによって、斜面内部の水文プロセスおよび土砂流出プロセスに関する時間・空間分解能の高い詳細なデータを計測し、パイプ流や選択的流出経路などの不均一な水移動過程と土砂生産過程の把握、地下水の流出に伴う土砂流出過程を解明する。また、豪雨時における土砂移動に伴う選択的流出経路の閉塞および間隙水圧の上昇が斜面安定に与える影響を評価する。これらの結果に基づき、不均一な水流動過程、土砂生産過程を組み込んだ斜面崩壊発生解析モデルを構築し、豪雨時における斜面の不安定化がどのように起きるのかを明らかにし、豪雨災害の軽減を図ることを目的とする。

## 3. 研究の方法

研究は滋賀県田上山地に位置する不動寺水文試験地において実施した。平均降水量は約1600mm、平均気温は11.3°Cである。基岩地質は田上花崗岩である。対象斜面は谷壁斜面下部の約3.5×5mの区画である。斜面の土層厚を簡易貫入試験によって計測した。計測した土層深に基づいてテンシオメータ、熱電対の計測深度を決定した。テンシオメータの計測点を図1に示す。全51地点に合計141

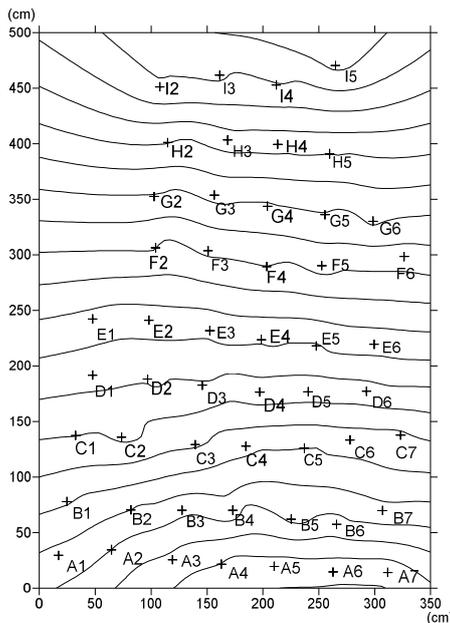


図1 調査斜面の地形図および計測点位置図 (等高線間隔: 20 cm)

本の熱電対と同数のテンシオメータを表層、中層、基岩面上に設置した。

## 4. 研究成果

(1) 圧力水頭の結果から、無降雨時にはCラインより下部に恒常的な地下水帯が存在することが示された(図2)。降雨中にはCラインより上部の範囲にも地下水帯が形成され、降雨の規模が大きい場合には全範囲が飽和することが明らかになった。降雨中において過剰間隙水圧は観測されなかった。また、選択的流出経路も認められず、比較的均質な水の流動であることが示された。

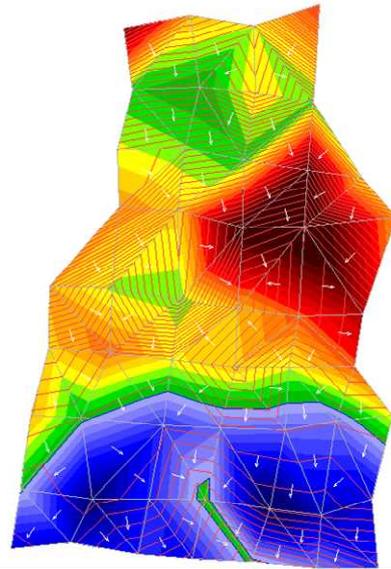


図2 無降雨時の地下水帯の分布図 (青色の範囲が地下水帯に対応)

地温、および地下水温の長期変動から地下水の起源を検討した。地温は水の移動の影響を無視できる場合、一次元の理想的な土層中において熱伝導理論が適用できるといえる。熱伝導率と比熱が深さによって変化しない場合、一次元の熱伝導率式は以下のようになる。

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} \quad (1),$$

ここで、 $\kappa$  は熱拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )、 $T$  は平均地温、 $z$  は地表面からの深さである。地表面温度の季節変化が振幅  $A_0$  の Sin 曲線で表せるとき、任意の深さ  $z$  における振幅は以下の式で得られる。

$$A(z) = A_0 \exp\left(-z \sqrt{\frac{\pi}{\tau \kappa}}\right) \quad (2),$$

ここで  $\tau$  は周期 (1年) である。式 (2) は以下の式のように得られる。

$$\ln A(z) = \sqrt{\frac{\pi}{\tau k}} \cdot z + \ln A_0 \quad (3).$$

この式は、振幅は傾き  $K [(\pi/\tau k)^{1/2}]$  を持ち、深さとともに指数関数的に減少することを示している。

図3に観測点の地温の振幅と土層深の関係を示す。圧力水頭の観測結果からE-Iの地点は降雨時を除いて不飽和状態であった。そこで、E-Iのデータを用いて図3中の減衰直線を求めた。先行研究の結果から熱拡散係数  $\kappa$  は  $1.2 \times 10^{-3}$  から  $1.26 \times 10^{-2}$  cm/s の範囲であることが報告されている。この熱拡散係数の範囲は、傾き  $K$  が  $2.8 \times 10^{-3}$  から  $9.1 \times 10^{-3}$  の範囲に相当する。この図3中の破線で囲まれた範囲が一次元の熱伝導で説明可能な範囲となる。つまり、図3の下側破線の下に位置するデータは地下水の熱伝導の影響を受けていることが示された。図4に各観測点の傾き  $K$  の計算結果を示した。傾きが  $9.1 \times 10^{-3}$  を越える範囲(図3中の下側破線より下のデータ)はC4,C5地点より下に位置していることが明らかにな

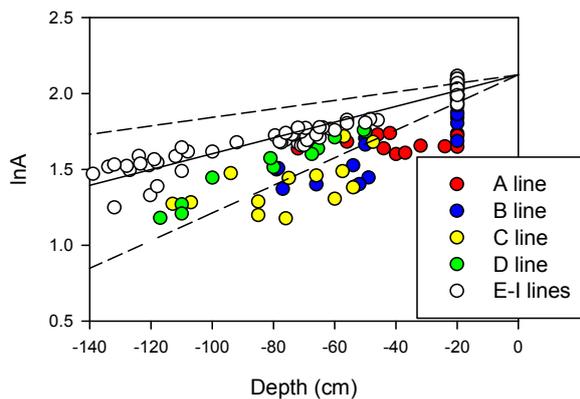


図3 土層深と地温の振幅の関係

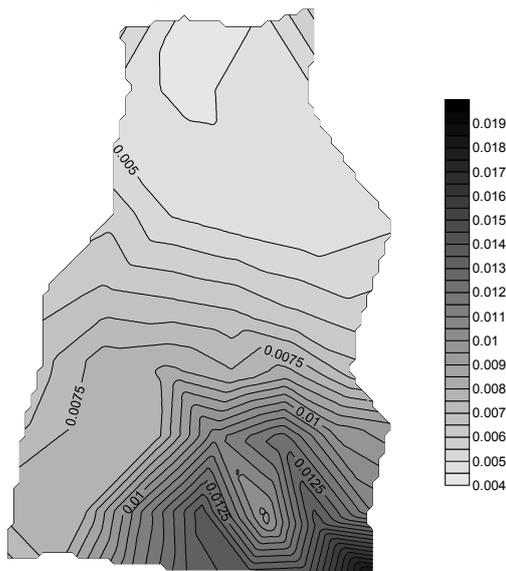


図4 傾き  $K$  の空間分布図

った。この結果は圧力水頭値から得られる恒常的地下水帯の平面分布の結果と調和的であった。

(2) 夏季において地表面温度と土層が厚い地点の地温に大きな差が見られるため、降雨時における地温、地下水温の短期的変動は地下水流動の良い指標となる。図5にC5地点における降雨時の圧力水頭と地温、地下水温の変動を示す。降雨の規模が大きくなるにつれて地下水位が上昇し、土層中層まで飽和した。C5の中層、土層基岩境界面の地温、地下水温は地下水位の上昇時に同時に大きく低下した。また、圧力水頭値に基づいて動水勾配を計算した結果、C5地点では基岩から土層に向けた鉛直上向きのフラックスが生じていることが明らかになった。C5と同様の結果を示したのはC4地点であった。地温、地下水温と動水勾配の結果を併せて考えると基岩内部から土層に向けて基岩地下水が湧出していることが示唆される。つまり、降雨時には基岩内部から土層に向けた水の流れが局所的に発生していると考えられる。また、これらの点では通常鉛直下向きであったフラックスが降雨時には逆向きになることから、降雨時のフラックスの変化は斜面の不安定要因となると考えられる。

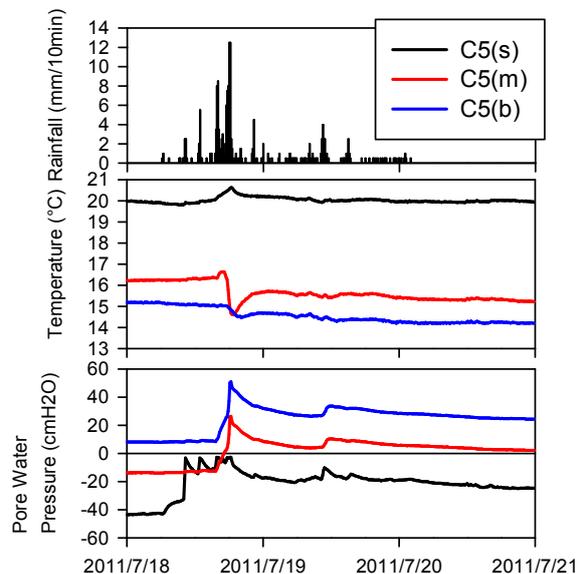


図5 降雨時におけるC5地点における圧力水頭と地温の変動

(3) 降雨の規模の増加に伴って土砂の流出量が多くなる傾向を示した。観測期間中の総降水量が最も大きい降雨イベントでは大量の土砂の流出によって流出量の観測機器が詰まり、動作不良が生じた。間隙水圧の計測結果から土砂流出時において斜面内の選択的流出経路を通じた水移動は観測されな

った。この結果から斜面内は比較的均質な水移動であり、選択的な流出経路の変化に伴った土砂流出は認められなかった。土砂流出時は地下水位の上昇が生じ、パイピングの指標となる限界流速が大きくなると土砂流出量が大きくなることが示された。土砂流出量が最大であった降雨イベントでは限界流速も最大であった。土砂流出時の安定解析を行った結果、安全率の低下は小さく、土砂流出が斜面不安定化に大きく寄与していないことが示された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

- ① 著者名：藤本将光，小杉賢一朗，林祐妃，谷誠，水山高久，論文題名：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，雑誌名：砂防学会誌，査読：有，巻：64，発行年：2011，ページ：3-10

〔学会発表〕(計2件)

- ① 発表者名：Masamitsu Fujimoto, Ken'ichirou Kosugi, Takahisa Mizuyama 発表標題：Specific spring point of bedrock groundwater at the bottom at a hillslope, 発表学会：International Symposium on Sustainability/Survivability Science for a Resilient Society Adaptable to Extreme Weather Conditions, 発表年月日：2012年8月4日，発表場所：京都大学防災研究所（京都府）
- ② 発表者名：道幸李佳，小杉賢一朗，藤本将光，水山高久 発表標題：山地斜面における地温観測による水分フラックス挙動の解析，発表学会：平成24年度砂防学会研究発表会，発表年月日：2011年5月18日，発表場所：神奈川県民ホール（神奈川県）

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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