

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2013～2016

課題番号：25350504

研究課題名（和文）崩壊予測手法の解析精度向上のための森林斜面内での雨水の挙動に関する水文学的研究

研究課題名（英文）Hydrological study on behavior of rainwater in forest slopes to improve analysis accuracy of collapse prediction method

研究代表者

平松 晋也（HIRAMATSU, Shinya）

信州大学・学術研究院農学系・教授

研究者番号：70294824

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,900,000円

研究成果の概要（和文）：樹木根系が斜面土層の安定性に関わる地下水位上昇に及ぼす影響を定量的に把握するため、擬似根系を用いた室内散水実験と現地水文観測を行った。その結果、樹木根系の存在が地下水流出開始時間を短縮させ、地下水流出量の増加を促すなど、土層内での雨水の挙動に多大な影響を及ぼすことになった。この傾向は、構成地質の相違に関わらず認められ、難透水層境界面が明瞭な砂質片岩地域では境界面付近の樹木根系周辺部からの流出量が卓越するのに対し、深層部まで高い透水性を有している風化花崗岩地域ではすべての深度において樹木根系周辺部からの流出が卓越することが確認された。

研究成果の概要（英文）：Hydrological properties of soil layer are determined by various kinds of heterogeneities, and these heterogeneities give large influences to hydrological processes in the soil layer. This study focused on the common and abundant forest roots, infiltration experiment using a pseudo roots and local hydrological observation was carried out. As a result, the presence of forest roots significantly affects behavior of rainwater in soil layer, such as, reduced the startup time of groundwater runoff and increased the amount of groundwater runoff. In addition, the startup time of groundwater runoff and the amount of groundwater runoff were able to approximate by using circumferential length of pseudo roots and sprinkling intensity. In the region of metamorphic sandstone, runoff along tree roots was greater near the boundary surface. However, in the weathered granite region, high permeability zone extended to the deep soil layers and runoff due to the presence of roots was high at all depths.

研究分野：砂防学

キーワード：樹木根系 根系流 斜面崩壊 マトリックス流 バイパス

1. 研究開始当初の背景

表層崩壊の発生場や発生時間の予測を目的とした「従来の崩壊予測モデル」では、山腹斜面を構成する土層の内部構造を均一と見なして解析が進められてきた(平松ほか, 1990; 小川, 1997)。しかしながら, 実際山腹斜面では, 樹木根系やその腐朽, 地中の小動物の活動や雨水の集中により形成される大小の孔隙(パイプ), 土層中に点在する転石(礫), クラック等が多数存在し, 土層構造の不均一性が極めて大きいというのが現状である(熊沢ほか, 2001)。水山(1994)が指摘しているように, 従来の崩壊予測モデルによる崩壊発生予測時間の遅れは, この【土層構造の不均一性】に起因するものであり, 崩壊モデルによる予測精度(特に, 崩壊発生時間の再現精度)を向上させるためには土層構造の不均一性の解明は言うに及ばず, そのモデル化が急務となる。これらの不均一性構成要素の内, パイプに焦点を当てた研究(例えば, 北原, 1994; 内田ほか, 1998; 平松ほか, 2002)は従来より数多く実施されているものの, その他の不均一性に着目した研究はほとんどみあたらない。

研究代表者である平松らが既往研究において, 山地域における土砂生産能力やその変化をもたらした影響因子を明らかにする過程で, 樹木根系に代表される土層構造の不均一性が流域からの土砂生産環境に大きな影響を及ぼしている事実が明らかになり, 流域からの土砂生産予測精度(表層崩壊の発生予測)を向上させるためには, 山腹斜面内のいたるところで見られる樹木根系と崩壊現象との因果関係を解明する必要があるとの結論に至った。

【引用文献】

平松晋也・水山高久・石川芳治(1990): 雨水の浸透・流下過程を考慮した表層崩壊発生予測手法に関する研究, 砂防学会誌(新砂防) Vol.43, No.1, p.5-15

平松晋也・前川美紀子・小山内信智(2002): 結晶片岩地域で発生した崩壊地の源頭部に形成されたパイプの変遷とパイプ流の降雨応答特性, 地形 Vol.23, No.4, p.585-609

平松晋也・水山高久・石川芳治・小山内信智(1999): 地震により斜面上に形成された亀裂が土砂生産危険度に及ぼす影響, 地すべり(地すべり学会誌) Vol.36, No.2, p.3-12

北原曜(1994): 森林土層中の水移動におけるパイプ孔隙の特性に関する研究, 森林総合研究所報告 No.367, p.63-115

熊沢至朗・平松晋也(2001): 斜面土層内の大径礫(転石)が雨水の挙動や斜面の安定性に及ぼす影響に関する実験的研究, 砂防学会誌 Vol. 54, No. 3, p. 4-13

水山高久(1994): 山腹斜面のパイプフローが表層崩壊発生に与える影響に関する研究, 平成3~5年度科学研究費補助金(一般研

究(B))研究成果報告書, p.10-18

小川紀一郎(1997): 山地斜面における表土層の構造特性と水分変動過程に関する研究, 北海道大学農学部演習林研究報告, 第54号, p.87-141

内田太郎・小杉賢一郎・水山高久(1998): 山地源流域の流域流量に及ぼすパイプ流の影響, 日林誌 Vol. 80, No.2, p. 89-97

2. 研究の目的

現地水文観測や室内散水実験を実施することにより, マトリックス流を含めた土層内部での雨水の挙動に及ぼす樹木根系の影響を定量的に評価するとともに, 樹木根系周辺での水の流れの形態(水理特性)を明らかにする。さらに, 樹木根系周辺部での雨水の挙動に及ぼす地質(愛媛県: 古生層, 信州大学演習林: 花崗岩)の影響を定量的に評価する。そして, これらの知見を踏まえ, 樹木根系周辺部での流れのモデル化を行い, 同モデルを従来の崩壊予測モデルに組み込むことにより, 新たな崩壊発生予測モデルを構築する。さらに, 次の段階として, 従来の崩壊予測手法による解析精度の向上といった研究面だけではなく, 土砂災害による被害軽減に資する(社会的効果)ことを目的としたシステムの構築を目指すものとする。

3. 研究の方法

現地採取土壌を用いた室内散水実験を実施し, 降雨中に森林土層内部で生じている樹木の根系周辺部での雨水の流れ(根系流)を定量的に把握した。そして, 樹木根系周辺部での雨水の流れの水理特性を明らかにし, そのモデル化を行った(図-1)。さらに, 自然降雨を対象とした現地水文観測を実施し, モデルの妥当性について考察を加えた。さらに, このモデルを従来の「表層崩壊発生予測モデル」に組み込むことにより, 予測精度の向上を目指した。研究方法の詳細を以下に示す。

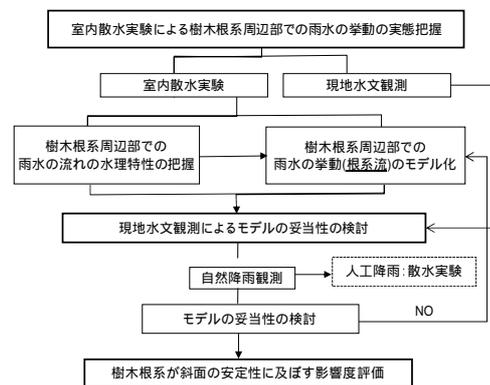


図-1 研究フロー

(1) 室内散水実験による樹木根系周辺部での雨水の挙動の実態把握

疑似根系を用いた室内散水実験を実施し, 樹木根系が土層内部での雨水の挙動に及ぼす影響を定量的に把握する。

(2) 現地水文観測による樹木根系周辺部での雨水の挙動の実態把握

試験地(愛媛県重信川上流域:古生層)内に設置した土層断面を改良し,樹木根系(活性根&腐朽根)周辺部における雨水の挙動を観測する。また,同様の試験地を長野県与田切川流域内(花崗岩)にも設置し,樹木根系周辺部での雨水の挙動に及ぼす地質条件の影響について考察する。

(3) 樹木根系周辺部での雨水の挙動のモデル化

室内散水実験結果と現地観測結果を用いて,樹木根系周辺部での雨水の流れ《根系流》の水利特性(流れの形態)を考慮することにより,根系流のモデル化を行う。

(4) 現地水文観測の継続と根系流モデルの妥当性の検討

現地観測結果を用いて,根系流モデルの妥当性の検討を行い,樹木根系が土層内での雨水の挙動に及ぼす影響を定量的に把握する。

(5) 土層構造の不均一性が林地斜面の安定性に及ぼす影響度評価

(3)~(4)で構築した樹木根系周辺部での雨水の流れのモデル《根系流モデル》を用いて【土層内部の不均一性を加味した新たな崩壊発生予測モデル】を構築する。そして,同モデルを用いて土層構造の不均一性が斜面の安定性(特に,崩壊発生タイミングに着目)に及ぼす影響度合いを定量的に把握する。さらに,同モデルと従来のモデル(根系流をはじめとする不均一性の評価なし)との比較を行い,土層構造の不均一性が林地斜面の安定性に及ぼす影響度評価を行う。

4. 研究成果

(1) 樹木根系周辺部での雨水の挙動

現地流域より $\phi=20\text{cm}$ の大型不攪乱供試体を採取し,この供試体に種々の直径の疑似根系(活性根,腐朽根)を埋設することにより室内散水実験を実施した。

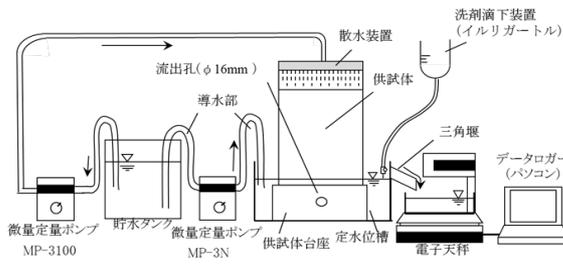


図-2 室内散水実験装置の概要

疑似活性根を埋設した場合の散水強度 45mm/hr を与えた場合を例として,地下水流出高の経時変化を図-3 に示す。散水時間の継続とともに地下水流出高は増加し,やがては定常状態に達している。疑似根系の円周長の増加とともに定常状態に達するまでに要する時間が短縮されるといった興味深い事実が明らかになった。

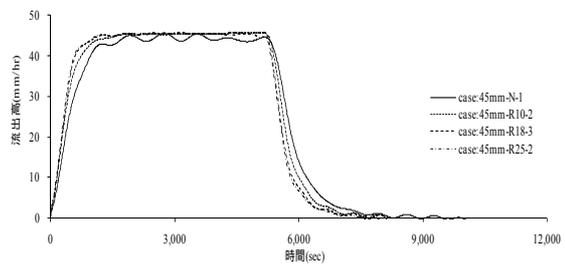


図-3 地下水流出高の経時変化 (R=45mm/hr, 活性根: $\phi=0,10,18,25\text{mm}$)

定常状態に達するまでに要する時間: $T_c(\text{sec})$ は,擬似根系の円周長: $S(\text{mm})$ と散水強度: $R(\text{mm/hr})$ を用いてべき乗近似可能となった。根系の埋設に伴う地下水流出高の増加分: ΔQ について,根系の影響時間: Δt を基底とし,ピーク増加流出高: ΔQ_p を高さとする三角形を仮定することによりモデル化し,再現計算を行ったところ,概ね良好な再現結果が得られた(図-4)。

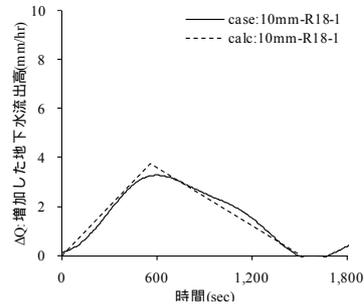


図-4 根系周辺での雨水の挙動の再現: 活性根

(2) 現地流域での樹木根系周辺部での雨水の挙動実態

現地流域に観測断面(図-5)を作成し,樹木根系周辺部での流出量観測と散水実験を実施した。

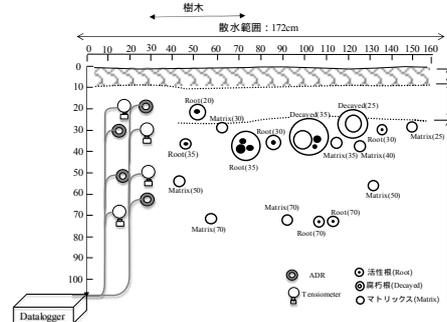


図-5 土層断面の採水装置と計測機器の設置

マトリックス部では土層断面が湿っているものの流出までには至らなかったのに対し,同深度に位置する根系周辺部では流出がみられ,マトリックス部より根系周辺部からの流出開始時間の方が早いという事実が確認された。この興味深い事実は,透水性の高い花崗岩地域でも変成岩地域と同様に根系周辺部を選択的に流れる水路の存在を示唆

するものである。樹木根系の存在による断面からの流出量の増加量（以下、根系流量： q_R と呼ぶ）は、散水強度： R 、根系の出現深度： Z 、根系の円周長： S 、飽和度： S_r を用いて近似可能となり、

$$\text{花崗岩地域： } q_R = 1.530 \times 10^1 \times R^{0.738} \times Z^{-1.559} \times S^{1.041} \times S_r^{1.753}$$

$$\text{変成岩地域： } q_R = 1.492 \times 10^{15} \times R^{2.113} \times Z^{-10.270} \times S^{2.793} \times S_r^{13.784}$$

花崗岩地域、変成岩地域ともに説明変数 (R , Z , S , S_r) の係数は、 $|S_r| > |Z| > |S| > |R|$ の順となり、地質の相違にかかわらず、根系流量： q_R には、飽和度が最も大きな影響を及ぼし、次いで根系の出現深度、根系の円周長、散水強度の順となることが明らかにになった。

(3) 根系流に及ぼす地質の影響

花崗岩地域と変成岩地域での観測結果より、100mm 程度の総降雨量を記録した降雨イベントを例として、樹木根系周辺部からの流出量をとりまとめたものを図-6 に示す。

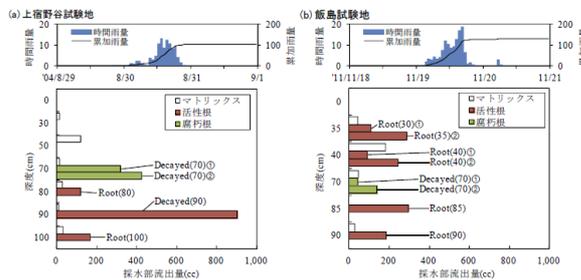


図-6 樹木根系周辺部からの流出状況の比較

樹木根系（活性根、腐朽根）は斜面土層内を分岐や屈曲しながら展開しているため同条件での比較とはならないものの、樹木根系周辺部からの流出量は、両試験地ともにマトリックス部よりも多い傾向にある。変成岩地域である上宿野谷試験地では、マトリックス部からの流出量は総じて少なく、樹木根系、特に腐朽根からの流出量が卓越し、難透水層境界面付近でより顕著となった。一方で、花崗岩地域の飯島試験地では、マトリックス部からの流出量は上宿野谷試験地に比べて全体的に多いものの、樹木根系周辺部からの流出量は、根系の出現深度如何にかかわらずすべての深度で確認され、マトリックス部よりも卓越した傾向を示す事実が確認された。

(4) 樹木根系周辺部での流出量のモデル化

室内散水実験結果を基に、図-7 に示すように、擬似根系の埋設により地下水流出量（流出高）が増加した T_a (sec) から定常状態到達時 T_b (sec) までの時間において、擬似根系を埋設した場合から埋設しない場合の地下水流出量（流出高）を差し引いたものの累加値を樹木根系周辺部における地下水流出増加量と定義し、この値を次式により算出した。

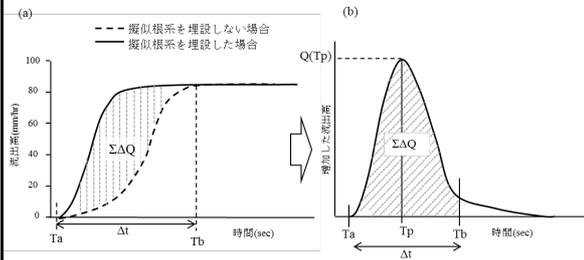


図-7 根系の存在による流出量増加量のモデル化

$$Q = \sum_{t=T_a}^{T_b} \left\{ \frac{Q_R(t) - Q_N(t)}{60 \cdot 60 \cdot 10^3} \right\} \cdot A \cdot 10$$

ここに、 Q ：地下水流出増加量(cc)、 t ：実験開始からの経過時間(sec)、 Q_R ：擬似根系がある場合の t 時の地下水流出高(mm/hr)、 Q_N ：擬似根系がない場合の t 時の地下水流出高(mm/hr)、 T_a ：擬似根系がある場合の地下水流出開始時間(sec)、 T_b ：擬似根系がある場合と無い場合の地下水流出量の差がなくなるまでの時間(sec)、 A ：供試体の断面積(cm^2)である。

根系の演習長： S の増加とともに Q は増加し、腐朽根の Q は同じ直径の活性根の 2 倍程度大きくなるといった注目すべき結果が得られた。さらに、 S が同値である場合、根系本数の増加とともに Q が減少する結果となった。

根系の円周長： S (mm)と散水強度： R (mm/hr)を用いて活性根の存在による地下水流出高の増加量： Q を次式によりモデル化した。

$$Q = 2.09 \times 10 \cdot S^{0.637} \cdot e^{(0.010 \cdot R)}$$

実測値と再現値との関係を示す図-8 より、上式による地下水流出増加量： Q の再現値は、ケース数が少ないものの概ね実測値と同値を示し、比較的良好な再現結果が得られた。

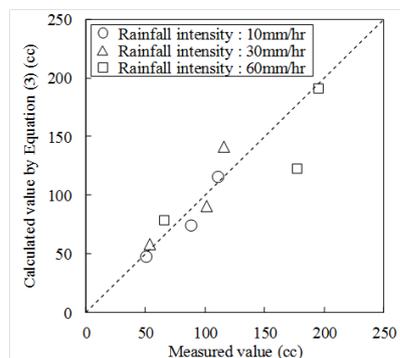


図-8 地下水流出増加量の再現値と実測値の比較

(5) 根系量の変化が斜面の安定性に及ぼす影響

現地水文観測により、樹木根系が存在する場合には、基岩面への到達水量が無植生の場合よりも増加する事実が明らかになった。別途擬似根系を用いた室内鉛直浸透実験により、根系の効果量は、鉛直根の円周長と降雨量を説明変数として次式で表されることが明らかになった。

$$E = 27.50 \cdot S^{0.1827} \cdot R^{0.3088}$$

ここに、E:鉛直根 1 本あたりの根系の効果量(基岩面への到達水量の樹木根系による増加量)(cc/hr), S:斜面土層内の鉛直根 1 本あたりの円周長(mm), R:降雨量(mm/hr)である。

本研究では、表土層厚を 1m とする単位土柱(投影面積:1m²)を想定し、斜面勾配を 20° から 50° まで 5° 毎に変化させた 7 パターン、鉛直根の直径を 10mm から 50mm まで 10mm 毎に変化させた 5 パターンをそれぞれ組み合わせた計 35 ケースについて、実績降雨波形を上式に入力することによって得られた根系の効果量を根系が存在しない場合の基岩面への到達水量に加算することにより、地下水深と安全率を求めた。また、同一の斜面勾配で樹木根系が存在しない場合に対する地下水深や安全率の計算も行い、樹木根系による安全率の変化度合いを求めた。

地下水深は、基岩面への到達水量を用いて次式により算出し、安全率は半無限長斜面の安定解析により求めた。

$$H^t = \left(\frac{I^t}{10^6 \cdot A} - K_s \right) / (n - \theta) \left. \vphantom{\frac{I^t}{10^6 \cdot A}} \right\}$$

$$I^t = I_n^t + E^t$$

ここに、H^t:t 時の地下水深(m), I^t:t 時の樹木根系が存在する場合の基岩面への到達水量(cc/hr/m²), K_s:飽和透水係数(m/hr), A:単位土柱の投影面積(m²), n:間隙率(m³/m³), θ:体積含水率(m³/m³), I_n^t:t 時の無植生の場合の基岩面への到達水量(cc/hr/m²), E^t:t 時の根系の効果量(cc/hr)である。

地下水深と斜面安定解析結果の一例として、斜面勾配を 20° とし、直径 50mm の鉛直根が斜面土層内に存在すると想定した場合の地下水深と安全率の経時変化を図-9 に示す。

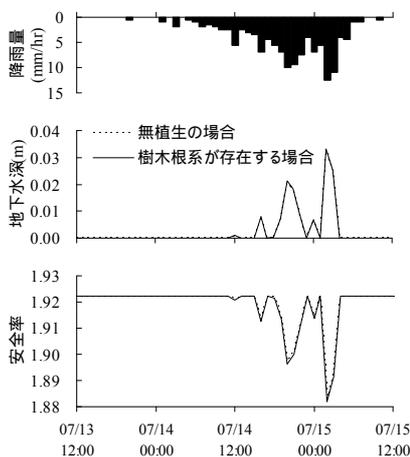


図-9 地下水深と安全率の挙動
(斜面勾配: 20°, 根系直径 50mm)

土層内に樹木根系が存在すると、無植生の場合よりも地下水深は 3%程度上昇し、安全率は 0.05%程度減少することになり、樹木根

系は斜面の安定性を若干ながらも低下させる事実が確認できる。この傾向は、全てのケースにおいて認められた

根系が存在しない場合の安全率に対する樹木根系が存在する場合の安全率の変化量を「安全率の減少率」と定義し、安全率の減少率と斜面勾配や鉛直根の直径との関係を図-10 に示す。

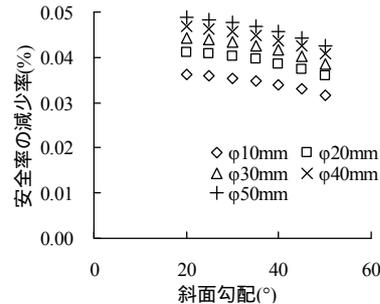


図 10 安全率の減少率と鉛直根の直径との関係
(土層内に鉛直根が 1 本存在する場合)

鉛直根の直径を一定にした場合には斜面勾配の低下とともに安全率の減少率は増大し、斜面勾配が一定の場合には鉛直根の直径の増加とともに安全率の減少率が大きく増加していることがわかる。

以上の結果は、緩勾配斜面の方が樹木根系の影響を強く受け、鉛直根の直径の増加によってその影響はより顕著になることを示唆するものである。

さらに、単位土層内に占める鉛直根の断面積が同一となるように、鉛直根の本数を変化させた場合における斜面の安定性への影響について考察を加えた。具体的には、単位土層内に直径 20mm の鉛直根が 10 本存在する場合を基準として、直径 10mm と 50mm の鉛直根の本数を断面積が基準値と同一となるように変化させた。

鉛直根の直径を一定とした場合、斜面勾配の低下とともに安全率の減少率が増大し、土層内に鉛直根が 1 本存在する場合と同様の結果となった。しかしながら、斜面勾配を一定とした場合には、鉛直根の直径の減少とともに安全率の減少率は急激に増加し、直径 10mm の鉛直根に対する安全率の減少率は直径 20mm の鉛直根の場合の 3 倍程度大きな値を示すことが明らかになった。

以上より、土層内に占める鉛直根の断面積を同一とした場合(斜面土層内の根系量が同一の場合)、小径根の方が斜面の安定性により大きな影響を及ぼすといった興味深い事実が明らかになった。

本研究は、森林土壌中に存在する「水移動に影響する不均一性構成要素」のうち一般的かつ多量に存在する樹木根系が、斜面土層の安定性に関わる地下水位上昇に及ぼす影響を定量的に把握することを目的として実施したものである。その結果、樹木根系の存在

が地下水流出開始時間を短縮させ、地下水流出量の増加を促すなど、土層内での雨水の挙動に多大な影響を及ぼすことが明らかになった。また、樹木根系の存在を考慮した地下水流出開始時間や地下水流出増加量は、根系の円周長や散水強度を用いて近似可能であることが確認された。これらの結果は、現象を単純化した擬似根系に対して実験室内で得られた限られた条件下での結果であり、今後は斜面土層内に存在する樹木根系を対象にした現地観測を通じて本研究で得られた結果の確認が必要となる。浸透流は、樹木根系や礫などの存在により選択的に移動してこれらの箇所集中するようになる。この浸透流の選択的移動にともなう集中が雨水流出課程や斜面の安定性に影響を及ぼすこととなるため、樹木根系周辺部での浸透流の選択と集中に関する詳細な検討が今後必要となる。さらに、今後は、樹木根系の密度と雨水の浸透課程との関係について新たに展開していく必要がある。

信州大学・学術研究院農学系・助教
研究者番号：00231241

福山 泰治郎 (FUKUYAMA, Taijiro)
信州大学・学術研究院農学系・助教
研究者番号：60462511

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)

[学会発表](計 5件)

夏目明歩, 平松晋也, 樹木根系の存在が花崗岩地域での雨水の挙動に及ぼす影響に関する現象論的研究, 平成 28 年度砂防学会研究発表会, 2016.5.18-19, 富山
碓井公貴, 平松晋也, 福山泰治郎, 樹木根系の存在が花崗岩地域での雨水の側方流出過程に及ぼす影響, 平成 28 年度砂防学会研究発表会, 2016.5.18-19, 富山
稲田隆平, 平松晋也, 福山泰治郎, 斜面土層内部に存在する樹木根系周辺部からの流出に及ぼす地質の影響, 平成 27 年度砂防学会研究発表会, 2015.5.20-21, 宇都宮
阿部美沙, 平松晋也, 福山泰治郎, 樹木根系が花崗岩斜面土層内での雨水の挙動に及ぼす影響, 平成 26 年度砂防学会研究発表会, 2014,5,28-29, 新潟
稲田隆平, 平松晋也, 宮前 崇, 福山泰治郎, 中谷洋明, 鈴木 豊, 斜面土層内部における雨水の挙動に関する基礎的研究, 平成 26 年度砂防学会研究発表会, 2014,5,28-29, 新潟

6. 研究組織

(1)研究代表者

平松 晋也 (HIRAMATSU, Shinya)
信州大学・学術研究院農学系・教授
研究者番号：70294824

(2)研究分担者

小野 裕 (ONO, Hiroshi)