

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19380087

研究課題名（和文）

物理的根拠に基づく表層崩壊発生限界雨量の検討

研究課題名（英文）

Physical evaluation of critical rainfall for triggering landslides

研究代表者

小杉 賢一郎 (KOSUGI KEN' ICHIROU)

京都大学・大学院農学研究科・准教授

研究者番号：30263130

研究成果の概要（和文）：表層崩壊（崖崩れ）を引き起こす降雨強度・量の閾値を、物理的なメカニズムに基づいて検討する為に、自然斜面土層内部に発達した通水経路網（水みち）の探査手法を開発し、通水経路網を介した地下水の流動プロセスを解明した。土壌の硬さを計測するための貫入試験機に水分計を取り付けた土壌水分計貫入計を開発・改良し、これを用いた計測と、高密度電気探査を組み合わせることにより、通水経路網を効率良く探査できることが示された。

研究成果の概要（英文）：For the purpose of physical evaluations of critical rainfall for triggering landslides, we constructed a new method to detect preferential water flow pathways developed in natural hillslopes. The method combine the electrical resistivity measurements with the measurements using the newly-developed CPMP (combined penetrometer moisture probe). By using this method, we clarified rain water dynamics around the preferential water flow pathways.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2008年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	13,100,000	3,930,000	17,030,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：林学 ・ 林学・森林工学

キーワード：崩壊・地すべり・土石流

1. 研究開始当初の背景

豪雨の度に繰り返される土砂災害のなかで、表層崩壊は最も発生件数が多く、人命及び財産に莫大な被害をもたらしている。表層崩壊発生に関する雨量基準は、過去の崩壊実績に基づいて経験的に定められているのが現状で、雨水浸透の物理プロセスは考慮されていない。実際の斜面では、「それぞれの地域において、通常観測される降雨を効率よく排水できる水みち（通水経路網）が斜面土層

内に自然に発達して崩壊の発生を抑制している一方、その斜面がこれまで経験した規模を大きく上回る規模の降雨が起きた場合には、通水経路網がその排水能力を大きく超える浸透水の集中を引き起こし過剰間隙水圧が発生する」という崩壊発生メカニズムが想定される。そこで、斜面における通水経路網の発達具合や、通水経路網を介した浸透雨水の挙動を解析することにより、物理的根拠に基づいて崩壊発生限界雨量を検討できるので

はないかとの発想に至った。

2. 研究の目的

斜面土層内における通水経路網の発達過程の解析、通水経路網の探査手法の確立、ならびに排水能力を超えた浸透水の集中による表層崩壊発生機構の解明を通じて、物理プロセスに基づく適正な表層崩壊発生限界雨量の検討を目的とする。

3. 研究の方法

まず、一定条件の降雨の下で土層内に通水経路網が自然に形成されていくプロセスを、室内水路実験により解明する。その上で、降雨強度を増加させて排水能力以上の浸透強度を与えた場合に、過剰間隙水圧が発生し崩壊が引き起こされるプロセスを明らかにし、モデル化する。次に、申請者・分担者が開発した水分計付貫入計および流水音検知器による計測方法を改良し、従来の探査手法と組み合わせることによって、自然斜面土層内の通水経路網を探査する手法を確立する。その上で、然斜面を対象として調査・観測を

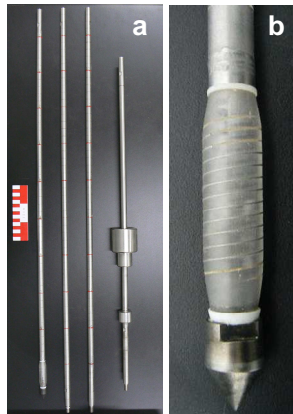


図-1 水分計付貫入計の全体(a)と先端部(b)

行い、通水経路網の発達具合とその排水能力を解明する。さらに、人工降雨実験・注水実験により、過剰間隙水圧が発生するプロセスを解析し、崩壊発生雨量について物理的考察を加える。

4. 研究成果

(1) 斜面内部の通水経路網の発達具合を知るには、土壌水分の空間分布を計測することが有効である。そのためには、テンシオメータや土壌水分計を埋設すれば良いが、この場合、データの空間的な分解能がセンサーの数に依存してしまうという問題がある。センサーは一台数万～数十万円してコストがかかる上、測器の設置に手間と時間がかかり、機動性を重視した使用には適さない。一方、最も標準的な秤量法による計測では、決められた体積の土壌を、土壌断面を掘削したり専用のオーガーを用いたりして採取せねばならず、非常に効率が悪い。かつ、破壊的な計測方法である。

そこで、斜面の土層厚計測を目的として頻繁に実施される貫入試験に着目し、土壌水分計付貫入計 (CPMP) の開発・改良を行った。この測器は、土壌貫入計のロッドの先端に小型の水分計を取り付けたものであり、貫入抵抗を測定しながら同時に土壌水分の鉛直分布を計測できる。その写真を図-1 に示した。長谷川式土壌貫入計をベースとして設計されていて、2 kg の錘を 50 cm の高さから自由落下させたときの衝撃で、先端に直径 20 mm の貫入コーンが取り付けられたステンレスロッドを土層内に貫入させていく (図-1a)。貫入ロッドの長さは 1 m 程であるが、延長が可能であり、土層が厚い場合でも計測できる。土壌水分計測には TDR 式水分計の原理を用いた。貫入コーンの直上がセンサー部であり、アクリル管の周囲に二本のステンレスワイ

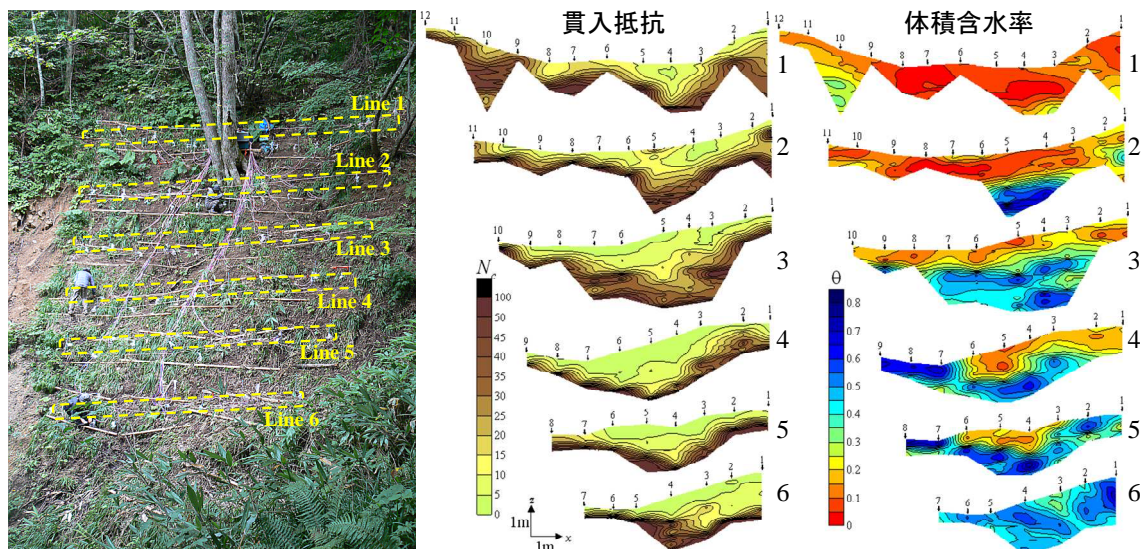


図-2 水分計付貫入計による計測を行った斜面と貫入抵抗・体積含水率の計測結果

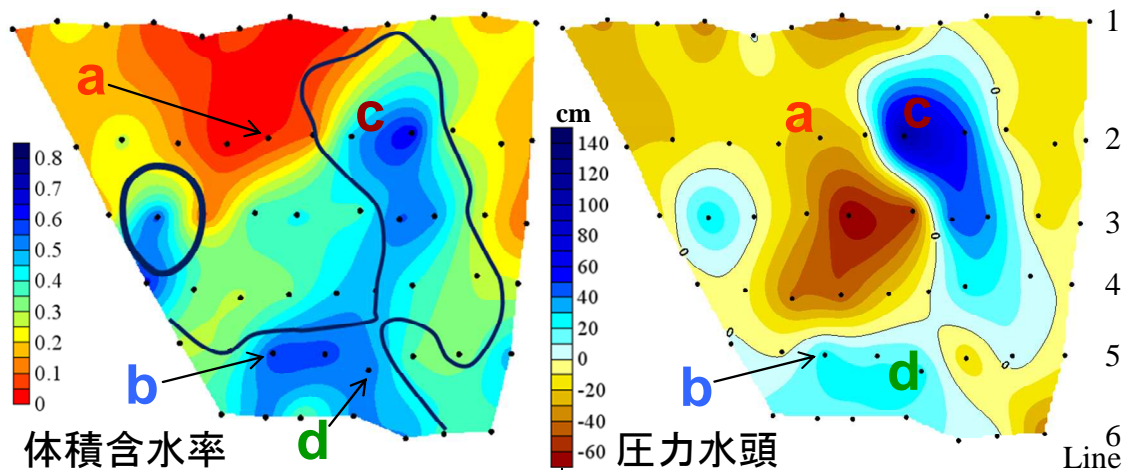


図-3 図-2の計測斜面における基岩面上の体積含水率と間隙水圧の分布

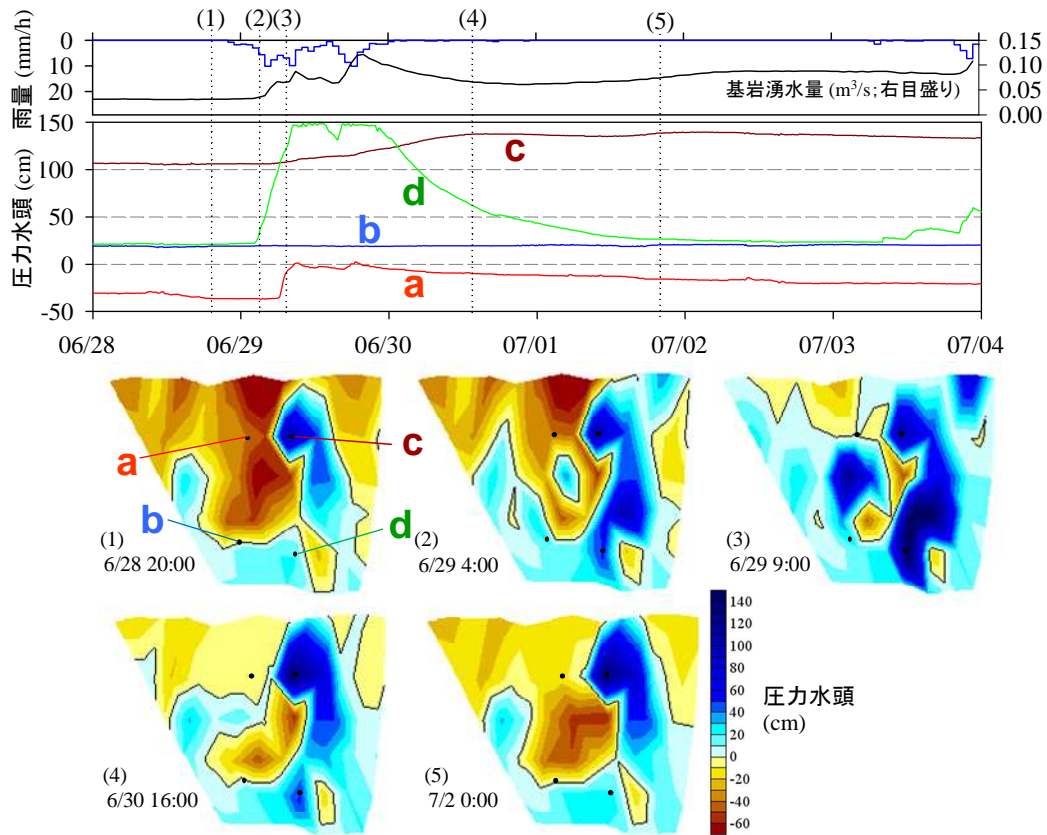


図-4 雨量・基岩湧水量・間隙水圧の時系列と基岩面上の間隙水圧分布

ヤをコイル状に巻き付けた構造をしている (図-1b)。ステンレスワイヤは、それぞれ同軸ケーブルの信号線とシールド線に繋がれ、中空にした貫入ロッド内部を貫通して貫入計上端から取り出され、電磁波パルスの発生・解析装置と接続されている。計測された比誘電率は、専用のキャリブレーション式により体積含水率・に変換される。

この CPMP を用いて、山地斜面内部の水分分布を計測した。観測斜面は、京都大学防災研究所穂高砂防観測所のヒル谷試験流域内に設けた。この地域の年間降水量は 2,000 mm

で、そのおよそ 4 分の 1 が冬期の積雪によってもたらされている (気象庁アメダスデータ; 栃尾)。ヒル谷は、割谷山溶岩・火砕岩、砂岩・チャート・玄武岩・石灰岩を含む中生界メランジ堆積物、花崗岩質岩脈等から成る複雑な地質構造を持ち、観測斜面の地質は花崗斑岩に属している。観測斜面は平均勾配 40° のほぼ平行な地形を呈し、下端では常に湧水が見られた (図-2 左側パネル)。また、既往の崩壊地が隣接しており、この崩壊地内には基岩割れ目からの湧水が確認された。

観測斜面上に 6 本の横断測線を設け (図-2

左側パネル),各測線において1m間隔でCPMPによる計測を実施した。各断面で得られた貫入抵抗(Nc値;10cmの貫入に必要な打撃数を表す)の分布を示したものが図-2の中央パネルである。各断面図の下端は、土層と基岩の境界面を表しており、ここでは既往研究に倣って、Ncが100を超える深さを境界面と定義した。土層-基岩境界面には複雑な凹凸があり、地表面形状が平坦であるのとは対照的である。またLine2より下流側では、中央が窪んだ集水地形を呈していることがわかった。土壌の体積含水率・(図-2右側パネル)は、最上流部のLine1で全体的に小さくなっていた。Line2より下流側では、土層-基岩境界面が凹んだ部分で含水率の上昇が見られ、Line6では断面全体が湿っていた。またLine4と5では、斜面に向かって左側の土層が薄い部分でも含水率の大きな上昇が見られた。この様に、一様に見える斜面内でも、土壌水分はかなり不均一に分布していた。

図-3の左側パネルは、基岩面上で計測された体積含水率の二次元分布を示したものである。Line2の中央やや右寄りの高含水率部は、下流のLine3~6の高含水率部と連続しており、一連の通水経路網を形成していることが窺える。これとは別に、Line3とLine4の左端付近にも、小規模な通水経路網の存在が示唆された。

(2) CPMPによる計測を実施した図-2斜面の各地点において、テンシオメータを土層-基岩境界面に設置し、基岩面上の土壌間隙水圧を観測した。間隙水圧は、その上昇が表層崩壊発生の直接の原因となることから、崩壊予測において最も重要となる物理量の一つである。図-3の右側パネルには、無降雨時に観測された土壌間隙水圧(圧力水頭表示)の平面分布を示した。間隙水圧は非常に不均質に分布し、その分布の様子はCPMPで計測され

た含水率の分布(図-3左側パネル)とよく対応していた。例えば、Line2中央やや右寄りの含水率が高い部分では、80cm以上の大きな間隙水圧が観測された。さらに、この高含水率部から下流側に続く通水経路網に沿って、飽和帯が分布していた。また、Line3の左端付近の含水率が高い部分でも、間隙水圧が大きくなっていた。以上の様に、CPMPで計測された土壌水分の空間分布から、土壌間隙水圧の不均質分布の状況を的確に把握できるといえる。

図-4には、積算雨量112mm、最大時間雨量10.2mm/hの降雨時に観測された、間隙水圧の変動を示した。降雨前の間隙水圧分布(時刻(1))は、図-3に示したものとほぼ同様であった。降雨中(時刻(2)および(3))には、CPMPによる含水率分布や降雨前の圧力水頭分布(図-3)で示された通水経路網の周辺で、間隙水圧が鋭敏な上昇を示した。特に地点dでは、間隙水圧が最大150cmまで達した。降雨が終了すると、ほとんどの地点で間隙水圧は低下を示した。ただし、Line2中央やや右寄りの地点c周辺では、間隙水圧は降雨後も上昇を続け、降雨終了後13時間たった時点(時刻(4))でピークとなり、その後長期間にわたって高い値が維持された(時刻(5))。この降雨イベントでは、観測斜面に隣接する既往崩壊地内の基岩割れ目からの湧水量も、降雨に遅れた二次的な上昇を示していた(図-4上側パネル)。このことから、地点cにおける間隙水圧の変動は、基岩からの湧水の影響を受けたものだと考えられた。

CPMPによる計測結果(図-3,図-4)においては、地点c付近の基岩面上において周囲よりも突出して高い含水率が検出されていた。よってCPMPは、土層内の通水経路網のみでなく、土層内に隠された基岩湧水ポイントの探査にも有効であると考えられた。

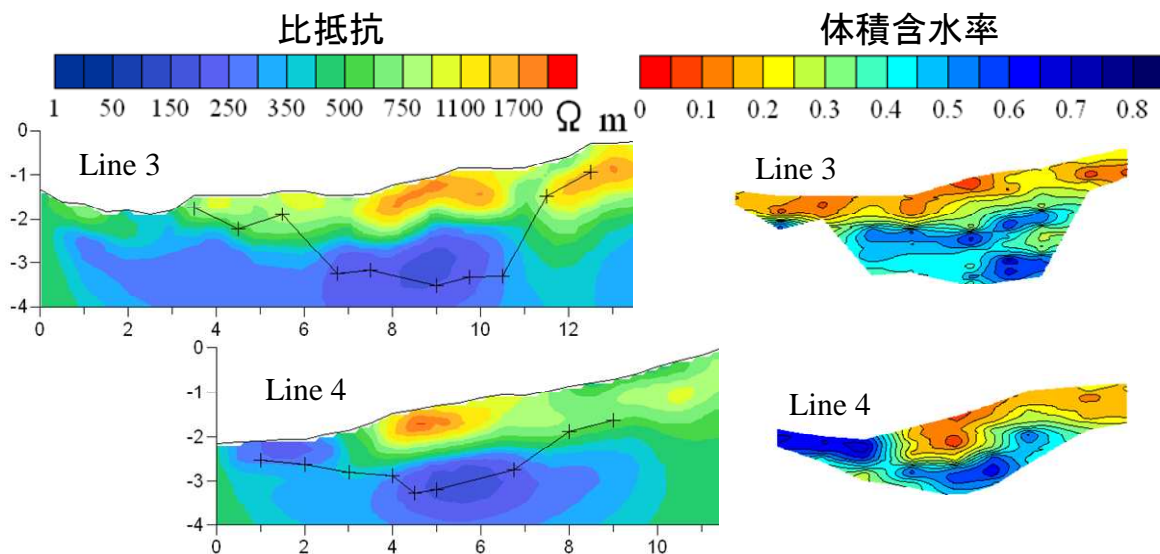


図-5 図-2の計測斜面における比抵抗と体積含水率の分布

(3) CPMP を用いた斜面調査と、その結果を受けて実施したテンシオメータ網による観測で、斜面内部の水分集中箇所や水移動の様子を把握することができた。しかしながら、これらの調査・計測は斜面上の各地点で実施する必要があり、空間的に連続した水分分布を把握するには手間がかかる。そこで同じ図-2の斜面において、非接触計測技術の一つである高密度電気探査を実施した。対象としたのは、図-2のLine 3, 4に沿った横断測線である。電極の配置にはダイポール・ダイポール法を用い、電極間隔は0.5~1.0mとした。

横断面内の比抵抗分布は、図-5の左側パネルのようになった。図中には、CPMPによって計測された土層-基岩境界面を黒線で示している。また、CPMPにより計測された含水率分布を図-5右側パネルに示した。Line 3, 4とも、土層-基岩境界面の凹みで含水率が高くなっているが、この部分では低比抵抗値が計測された。さらに、Line 4左側の高含水率部でも、比抵抗が小さくなっていた。この様に、電気探査により計測された比抵抗分布は、CPMPにより計測された含水率分布と良好な対応を示したことから、高密度電気探査は斜面の土壌水分空間分布を知るための有力な手法と考えられる。

ただし電気探査では、CPMPの計測で得られた局所的な含水率の増加部・低下部は検出されず、空間分解能的には劣ると考えられる。その一方で、CPMPでは計測不可能な土層-基岩境界面より深い部分についても比抵抗分布が得られ、基岩内部の水分状態を把握できるという利点もある。この様なことから、高密度電気探査とCPMPによる計測を適切に組み合わせることによって、精度の高い水分分布計測を効率的に行えると考えられる。

以上の計測・観測により、土層内に発達した通水経路網が、降雨流出に支配的な影響を及ぼしていることが判明した。ただし当初計画していた人工降雨実験では、不十分であることも明らかとなった。その理由は、通水経路網の発達と浸透水の挙動に重要な影響を持つ基岩湧水は、数ヶ月にわたる先行雨量の影響を受ける上、その集水域が表面地形の集水域とは異なる為、人工降雨では正確に再現できないからである。さらに、林地斜面の降雨は樹木により林内雨と樹幹流に分離され、大きな空間不均質性を示す為、地表面に直接人工降雨を散布しても自然状態を再現できないことも問題である。このようなことから、自然斜面の崩壊機構を解明するには、自然降雨によって崩壊が起きる時の土層内部の状況を克明に計測する必要があるとの認識に至った。以上の結果を受けて研究を再構築し、現在、基盤研究Aの課題として継続研究を行っている。

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16件)

- ①Yamakawa, Y., K. Kosugi, N. Masaoka, Y. Tada, and T. Mizuyama, Use of a combined penetrometer-moisture probe together with geophysical methods to survey hydrological properties of a natural slope, *Vadose Zone J.*, 9, 768-79, doi:10.2136/vzj2010.0012, 2010. 査読有
- ②Yamakawa, Y., K. Kosugi, N. Masaoka, J. Sumida, M. Tani, and T. Mizuyama, Estimation of soil thickness distribution on a granitic hillslope using electric resistivity method, *Int. J. Erosion Cont. Eng.*, 3, 20-26, 2010. 査読有
- ③Masaoka, N., Y. Yamakawa, K. Kosugi, and T. Mizuyama, Intensive measurements of soil pore water pressure for analyzing heterogeneous hydrological processes on a hillslope, *Int. J. Erosion Cont. Eng.*, 3, 53-58, 2010. 査読有
- ④Kosugi, K., Y. Yamakawa, N. Masaoka, and T. Mizuyama, A combined penetrometer-moisture probe for surveying soil properties of natural hillslopes, *Vadose Zone J.*, 8, 52-63, doi:10.2136/vzj2008.0033, 2009. 査読有
- ⑤Liang, W.-L., K. Kosugi, and T. Mizuyama, A three-dimensional model of the effect of stemflow on soil water dynamics around a tree on a hillslope, *J. Hydrol.*, 366, 62-75, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.12.009, 2009. 査読有
- ⑥Miyata, S., K. Kosugi, T. Gomi, and T. Mizuyama, Effects of forest floor coverage on overland flow and soil erosion on hillslopes in Japanese cypress plantation forests, *Water Resour. Res.*, 45, W06402, doi:10.1029/2008WR007270, 2009. 査読有
- ⑦Katsura, S., K. Kosugi, T. Mizutani, and T. Mizuyama, Hydraulic Properties of Various Weathered Granitic Bedrock in Headwater Catchments, *Vadose Zone J.*, 8, 557-573, doi:10.2136/vzj2008.0142, 2009. 査読有
- ⑧Sonoda, M., K. Kosugi, and T. Mizuyama, Numerical simulation of secondary discharge peak generation in a steep forested hillslope of weathered granite, *Trans. Jpn. Geomorphological Union.*, 30, 161-188, 2009. 査読有
- ⑨Liang, W.-L., K. Kosugi, and T. Mizuyama,

Characteristics of stemflow for tall stewartia (*Stewartia monadelpha*) growing on a hillslope, *J. of Hydrol.*, 378, 168-178, DOI:

10.1016/j.jhydrol.2009.08.013, 2009. 査読有

- ⑩ Kosugi, K., S. Katsura, T. Mizuyama, S. Okunaka, and T. Mizutani, Anomalous behavior of soil mantle groundwater demonstrates the major effects of bedrock groundwater on surface hydrological processes, *Water Resour. Res.*, 44, W01407, doi:10.1029/2006WR005859, 2008. 査読有
- ⑪ Katsura, S., K. Kosugi, and T. Mizuyama, Application of a coil-type TDR probe for measuring the volumetric water content in weathered granitic bedrock, *Hydrol. Processes*, 22, 750-763, DOI: 10.1002/hyp.6663, 2008. 査読有
- ⑫ Kosugi, K., Comparison of three methods for discretizing storage term of the Richards equation, *Vadose Zone J.*, 7, 957-965, doi:10.2136/vzj2007.0178, 2008. 査読有
- ⑬ Katsura S., K. Kosugi, T. Mizutani, S. Okunaka, and T. Mizuyama, Effects of bedrock groundwater on spatial and temporal variations in soil mantle groundwater in a steep granitic headwater catchment, *Water Resour. Res.*, 44, W09430, doi:10.1029/2007WR006610., 2008. 査読有
- ⑭ Hayashi, Y., K. Kosugi, and T. Mizuyama, Characterization of soil water retention curves of a natural forested hillslope using a scaling technique based on a lognormal pore-size distribution, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 73, 55-64, doi:10.2136/sssaj2007.0235, 2008. 査読有
- ⑮ 小杉賢一朗, 森林の水源涵養機能に土層と透水性基岩が果たす役割の評価, *水文・水資源学会誌*, 20, 201-213, 2007. 査読有
- ⑯ Liang, W. L., K. Kosugi, and T. Mizuyama, Heterogeneous soil water dynamics around a tree growing on a steep hillslope, *Vadose Zone J.*, 6: 879-889, doi:10.2136/vzj2007.0029, 2007. 査読有

[学会発表] (計5件)

- ① Kosugi, K., 山地源流域における土層と基岩の水文学的連続性に関する研究, JpGU meeting, 2010年5月23日, 千葉
- ② Kosugi, K., A localized bedrock aquifer distribution explains discharge from a headwater catchment, AGU fall meeting,

2009年12月15日, サンフランシスコ

- ③ Yamakawa, Y., K. Kosugi, Estimation of soil thickness distribution on a granitic hillslope using electric resistivity method, 砂防学会国際シンポジウム, 2009年11月19日, 東京
- ④ Kosugi, K., Investigations on Hydrological Connectivity between Soil Mantle and Weathered Bedrock in Headwater Catchments, AGU fall meeting, 2008年12月15日, サンフランシスコ
- ⑤ Masaoka, N., K. Kosugi, A combined penetrometer-moisture probe (CPMP) for understanding hydrological properties in forested hillslopes, AGU fall meeting, 2008年12月15日, サンフランシスコ

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 土壌水分計付き貫入試験機

発明者: 小杉賢一朗・山川陽祐・正岡直也・梅川豊文

権利者: 同上

種類: 特願

番号: 2007-270385

出願年月日: 2007年10月23日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小杉 賢一朗 (KOSUGI KEN' ICHIROU)

京都大学・大学院農学研究科・准教授

研究者番号: 30263130

(2) 研究分担者

堤 大三 (TUSTSUMI DAIZO)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号: 40372552

多田 泰之 (TADA YASUYUKI)

森林総合研究所・水土保持研究領域・研究員

研究者番号: 40397518

(2009年に連携研究者に変更)

勝山 正則 (KATSUYAMA MASANORI)

京都大学・大学院農学研究科・研究員

研究者番号: 40425426

(3) 連携研究者

谷 誠 (TANI MAKOTO)

京都大学・大学院農学研究科・教授

研究者番号: 00314245

水山 高久 (MIZUYAMA TAKAHISA)

京都大学・大学院農学研究科・教授

研究者番号: 00229717