

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 29 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24580222

研究課題名(和文) 森林が地震時の山地崩壊発生に及ぼす影響の研究

研究課題名(英文) Influence of forests to landslides after strong earthquakes

研究代表者

久保田 哲也(Kubota, Tetsuya)

九州大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授

研究者番号：40243381

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：強い地震の場合には森林斜面の崩壊が予想されるが、その場合の森林地上荷重および根系の影響を明確にし、山地斜面の安定に対する地震時の森林の影響を明らかとした。

同時に、地震後の強雨が森林斜面安定に与える影響、つまり、震後の強雨時における、地震動および地震で生じた亀裂や森林の影響とその影響の持続期間を解明し、崩壊危険箇所調査や警戒・避難など災害対策に応用できる崩壊発生危険雨量＝警戒避難基準雨量も明確とした。

さらに、地球温暖化にともなう豪雨の増加が心配されており、地震振動の基準雨量への影響を比較検討し、警戒避難システムの改良を考える上で有意義な成果を得た。

研究成果の概要(英文)：We conducted research on the influence of forests and rainfall warning criteria for landslides after strong earthquakes. This research is measured against the great earthquake such as the one in Eastern Japan (M=9.0). After an earthquake of this magnitude, slope soil strength in the region exposed to strong seismic forces is generally reduced by seismic activity (vibration) or disturbance by certain slope deformation. In this situation, revised rainfall criteria for landslides are required. Considering the forest influence, we are intrigued to elucidate the response of landslide to rainfall under this deteriorated soil condition. Hence, the impact of rainfall events on the specific landslide slopes that experienced strong seismic activity is analyzed using a numerical simulation method. i.e. the finite element method (FEM) to evaluate the critical rainfall for landslide occurrence.

研究分野：砂防学

キーワード：地震 森林 崩壊 斜面安定 根系 土質強度 気候変動

1. 研究開始当初の背景

(1) 地震国でかつ雨期に豪雨の発生する国や地域においては、東日本大震災のような巨大地震は言うまでもなく、強い地震は山地斜面に衝撃を与え、地震動により山地崩壊などを生じると共に斜面全般を脆弱にする。このように、強い地震の場合には森林斜面の崩壊が予想されるが、その場合の森林地上荷重や根系の影響は十分には明確にされていない。

(2) 加えて近年では、地球温暖化にともなう豪雨の増加が心配されており、地震振動の土砂災害警戒基準雨量への影響を比較検討することは、山地災害警戒避難システムの改良を考える上でも有意義と考えられた。

2. 研究の目的

(1) 山地斜面の安定に対する地震時の森林の影響を明らかにすることは重要であると共に、地震後の強雨が森林斜面安定に与える影響、つまり、震後の強雨時における、地震動および森林の影響とその影響の持続期間を解明し、崩壊危険箇所調査や警戒・避難など災害対策に応用できる崩壊発生危険雨量＝警戒避難基準雨量への影響を明らかとする。

(2) また、上記のように地球温暖化にともなう豪雨の増加が見られており、地震振動の土砂災害警戒基準雨量への影響を、この降雨増加の影響と比較検討し、山地災害警戒避難システムの改良の基礎知識の蓄積を目指す。

3. 研究の方法

(1) 現地調査、文献調査などから地震時とその後の森林斜面崩壊など山地災害発生の現況とその危険雨量を調査する。

(2) 各種の地質における森林斜面崩壊発生箇所の現地調査により土質試験用サンプルを採取し、室内振動試験を実施し、地震加速度が作用した場合の土質強度の変化を研究する。

(3) 有限要素法 (FEM) など数値解析により地震後の降雨時の森林斜面安定解析を行い、地震後の斜面不安定化の検討を行う。

(4) 現地調査と気象資料調査により地震後の降雨による森林斜面災害発生雨量データを収集し、地震後の災害発生危険雨量を統計的な手法で解析する。

4. 研究成果

(1) 東日本大震災の地震後の森林斜面崩壊危険雨量 — 地震時に生じた土砂災害の特徴

本研究では、自然斜面を中心に発生したものを調査対象としているが、今回の震災では盛土や宅地造成地、土堰堤など人工斜面に発生した崩壊・地すべりなども多い。ただし、自然斜面に発生したものが

やはり卓越し (阿部ほか 2011)、それらの特徴は過去の大地震時に発生したもの (久保田ほか 2005、内田ほか 2002、Kubota et. al. 2002、久保田ほか 2002、水山ほか 2001、地頭菌ほか 1998、谷口ほか 1986) と地形・地質・植生など発生条件 (素因) に異なった点はないと思われる (蔡ほか 2011、若井ほか 2011 など)。

また、規模の大小はともかくとして深層崩壊も多く、この場合はすべり面が根の到達深度より深く、森林の根系による斜面安定化は期待できない。表層崩壊については森林の地上荷重の負荷が影響する場合もあるかと思われる (久保田ほか 2011、T. Kubota et. al. 2006、久保田ほか 2004)。

ただし、福島県や栃木県の火山堆積物地域で発生したものは既往研究 (久保田ほか 2006、Kubota et. al. 2006) と同様に崩壊土砂が遠くまで到達する傾向が見られ (蔡ほか 2011、若井ほか 2011)、発生危険箇所、避難場所、避難経路を考える際には検討を要する特徴を持つが、このことは次に述べる警戒避難基準雨量そのものには影響しない。

現地調査によれば、この地震で、山腹に 1 m 規模の亀裂や滑落崖を伴う変動斜面が見られており (例えば、中嶋ほか 2011) これらの亀裂からは雨水が浸透しやすく、今後の降水では、容易に地下水の上昇や間隙水圧の上昇に繋がるとと思われる。また、変動や地すべりを生じているため、土質強度もピーク強度からは低下しているものと考えられ、このような斜面では、地震後の土砂災害発生雨量が小さくなる考えなければならない。気候変動に伴う降雨の増加が見出される今日の状況 (久保田 2011、Kubota 2011) では、今後の強雨による災害が懸念されることから、次に述べる地震後の崩壊発生基準雨量の研究を進めている。

(2) 既往地震の地震後の崩壊発生雨量

2011 年 9 月 1 日時点では、幸いなことに東日本大震災の被災地に大きな豪雨はなく、地震後の土砂災害発生データが集まらないので、現地降雨データをニューラルネットワークや多変量解析に入力するような解析から震後山地災害発生危険基準雨量を検討することは目下のところ難しい。従って、ここでは、地震後の崩壊発生基準雨量を検討するために、類似の災害事例を使った FEM (有限要素法) による雨水浸透・安定解析連成数値シミュレーションによる研究を実行している。この場合、①斜面頭部に亀裂が生じ (見かけ上は表層の透水係数が増加して)、降水の浸透が増加し崩壊が発生し易くなる場合と、②地震動のため斜面が変形または小滑動してすべり面が形成されるまたは土質強度が減少する場合が観測されており、このような条件を勘案した解析を行っている。森林の根系による斜面補強効果や、地上部荷

重による斜面不安定化効果なども既往の研究（久保田ほか 2011、T. Kubota et. al. 2006、久保田ほか 2004）を参考に考慮するが、これら森林の影響は地震前後で大きくは変わらないと思われる。

亀裂は過去の調査研究に基づき深さ 1 m 幅 1 m とし、亀裂の代わりに表層の透水係数が 5 倍になる（平松ほか 1999）方法も検討した。また土質強度の低下についても既往の研究例（長嶺ほか 2009）を参考に、内部摩擦角の減少を検討した。

・現況の結果と考察

1) 地震後に生じた土砂災害の事例

1995 年神戸・淡路大震災（阪神淡路大震災後） $M=7.3$ 後の神戸や、2000 年鳥取県西部地震 $M=7.3$ などでは振動の強かった所では、数年間にわたり、地震前の 1/2 から 1/3 程度の雨量で発生している。

海外では、1999 年台湾中部の集集地震 $M=7.3$ 後に震源から 20km の南投県の森林で、少なくとも 2002 年までは、上記のような少ない雨量で斜面崩壊が発生している。

2005 年の福岡西方沖地震では、2005 年 6 月までは比較的渇水状態で、半乾燥地の乾季なみに土壌水分が少なく、土砂災害が生じ難かった。通常の土壌水分量であれば、地震直後の梅雨期などに土砂災害が生じたかも知れない。その後は、やはり地震前の 1/2 から 1/3 程度の雨量で小規模な崩壊などが発生している。

2) FEM を用いた数値解析

解析に用いる透水係数や土質強度などは現地採取サンプルを用いた土質試験により求め、それ以外のヤング率やポアソン比などの係数は、降雨を与えない場合の安全率 F_s が 1 より大きくなることを念頭に、一般的な値を使用した。降雨は、過去の災害雨量または地震直後に発生した最大強雨を用いた。

①表層崩壊の場合

ここでは、花崗岩地帯の表層崩壊事例を対象に解析を行い、崩壊が発生した地震後の当該地域の強雨データを入力した。この斜面は亀裂無しでは、地震直後の強雨でも $F_s > 1$ であったが、前述の 1 m 程度の亀裂が斜面頭部にあり、降雨時の安全率 F_s は、亀裂無しの時の $F_s=1.0$ から 0.670 とかなり下がる結果となる。地震による亀裂のために表層の透水係数が 5 倍（平松 2009）になった場合には、10% 以下の雨でも斜面が不安定となる可能性がある。

前述のように森林の影響は地震前後で大きくは変わらないと思われるので、それらはとりあえず無視した。

②深層崩壊の場合

片岩地帯の深層崩壊事例を対象に解析を行い、崩壊発生時に発生した地域の強雨データを入力した。この斜面では亀裂の有無では F_s に変化はなく、1 m

程度の亀裂は深さが 10m 近くに及ぶ、規模の大きな崩壊には効果が小さいものと思われた。ただし、滑動しているため、土質強度が軟岩状態から風化岩状態に落ちると思われ、その際は内部摩擦角 ϕ が約 4% 低下する（長嶺ほか 2009）。従って、この土質強度が低下した状態では、地震前の 50~60% 以下の雨量でも斜面が不安定となる可能性がある。

・結論

- 表層崩壊に関しては、地震後は斜面頭部の亀裂などにより降雨が透水し易くなり、地震前発生基準雨量の 10% 程度の降雨量でも発生する可能性がある。
- 深層崩壊に関しては、地震後に土質強度の低下した変形斜面では、地震前発生基準雨量の 50%~60% で発生する可能性がある。また、過去の事例から判断すると、今後数年は少ない雨でも発生する可能性がある。
- 火山堆積物の埋積谷が崩壊しているものなどは、粘板岩や片岩などの斜面よりも流動性が相対的に高くなる可能性が見られる。このような傾向は過去の地震でも良く見られることでもあり、避難時に注意を要する。

(3) 地震動に伴う土質強度の変化と斜面安全率

ここでは土質強度に着目し、根系の有無も勘察した異なる土質における、地震動に伴う土質強度の変化、および、それに伴う事例崩壊斜面における斜面安全率の変化を研究した。

・せん断試験

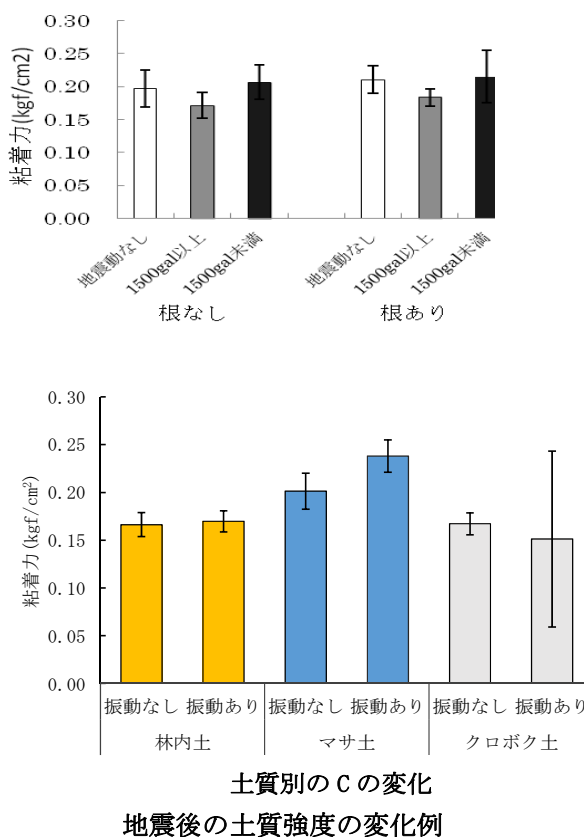
まず、根系あり及びなし、地震動あり及びなしの 4 ケースを用いた一面せん断試験により、それぞれの場合の粘着力 C と内部摩擦角 ϕ を求めた。試料には九州大学福岡演習林内の片岩風化土（以下、林内土と呼ぶ）を用いたが、他の研究同様 2mm 以上の粒径と有機物を除いた（執印他 2009）。根は同じく演習林内から採取した林齢 50 年のヒノキのものを用いた。根は、せん断面に位置するように付加した。その後、根系なしのケースには花崗岩風化土（マサ土）とクロボク土を追加して、3 種類の土質により試験を行った。地震動は地震計でモニターしながら振とう器により発生させ、片岩風化土の場合約 400gal~1500gal の水平振動を 10 秒間印加したが、その他の土質は約 1500gal を 10 秒間の印加とした。

・試験結果

結果は、震動を加えたサンプルは 1500gal 以上と未満（約 400~1000gal）で分けている。棒グラフが平均値、エラーバーが標準偏差を表している。粘着力 C は、根系を加えたものが根系無しよりも僅かに大きな値を取ることが分かる。また、1500gal 未満の地震動では、地震動なしのサンプルと比べて、大きな差はない。しかし、1500gal の地震動を加えた場合、 C は減少する傾向にある。内部摩擦角 ϕ は、

根系のあるなしでは差が観られない。また地震動を加えると ϕ は増加する傾向にある。次に3種類の土を用いた比較試験の結果を見ると、振動によるCの変化は、林内土で微増、マサ土で18.3%増、クロボク土で8.3%減だった。このうち、マサ土のみ有意差があった(5%水準:U検定)。 ϕ の変化は、林内土で10.2%増、マサ土で1.3%減、クロボク土で21.6%減だった。このうち、林内土のみ有意差があった(同上)。このように、今回の試験では振動により林内土は土質強度が上昇、クロボク土は土質強度が低下する傾向がみられた。なお、振動を加えたクロボク土は、C、 ϕ 共に標準偏差が大きくなった。

林内土に関して見ると、Cについては明確ではな

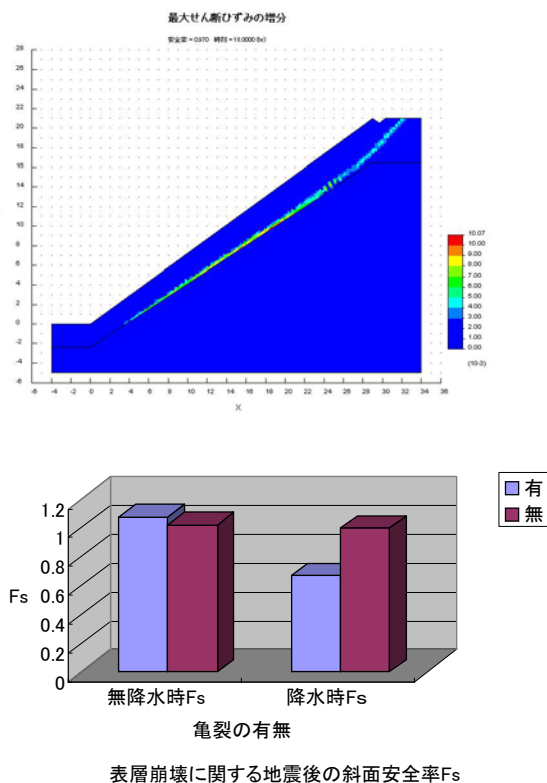


いが振動により減少傾向が見られ、 ϕ は増加する傾向がある。マサ土の結果を、同じ土質の既往の研究(伊藤他 2013)と比較すると、Cは逆の、 ϕ は同じ傾向を示した。この既往研究では体積含水率の異なる2つの条件でも試験を行い、Cや ϕ の変化は同じ傾向だったと報告している。これは、同じ乾燥密度ならば、地震動がC、 ϕ に与える影響は体積含水率によって異なることを示唆しているが、一方、本研究とは乾燥密度が同じではなく、振動に対するCの変化が異なる結果となっている。すなわち、地震動がCに与える影響は乾燥密度によって異なることも考えられる。一方、 ϕ は、本研究と既往研究では同じ傾向を示した。そのため、マサ土では、 ϕ は乾燥密度・体積含水率に関係なく地震動により減少

する可能性がある。

・斜面安定解析

2005年福岡県西方沖地震時や2012年豪雨災害時などの崩壊斜面事例を用いたFEMまたはLEMによる安定解析を行い、土質強度の変化が斜面安全率 F_s に及ぼす影響を検討した。上記の土質試験結果の最大強度減少率を用いると、表層崩壊(クロボク土:阿蘇表層崩壊)では、崩壊前元斜面に対する F_s が約1.2~1.3%減少(1.10から0.96、1.14から約1.00)となる。また、片岩風化土では土質強度が増す場合もあるが、減少する場合は、 F_s が4%減少(1.0が0.96)する。 F_s が1.0以下になってしまう場合は、地震動そのもので崩壊しなくても、その後の土質強度低下で崩壊が生じることになる。マサ土斜面の事例では、既往研究(伊藤他 2013)におけるCの低下率約10%を考慮して解析したが、 F_s は約3%低下(1.01が1.04)する。ただし、今回の土質試験



FEM 解析による地震後発生降雨の検討事例

(地震に伴う亀裂による浸透増加や、土質強度低下の影響を解析)

結果では強度が増加する場合もあるので、上記の F_s 減少は最悪の場合(対策として最安全側を見た場合)に当たると思われる。実際には、地震動の作用により逆に斜面が安定化する場合も考えられる。

・考察

今回の研究では、根系の有無による土質強度の差がわずかな上に、振動に対する反応の差は不明確だったので、地震動の影響に関して根系の有無は重要

な要因ではないことが示唆される。また、既往の研究（久保田 2012）から、表層崩壊のFs に関しては土質強度の変化よりも、地震に伴って斜面上方に発生する亀裂の影響がより一層重要である場合も考えられる。

・結論

本研究では、地震動の土質強度に対する影響における根系の有無による差は明確ではなかった。また、土質によっては振動により強度が増加する場合もあったが、クロボク土では斜面安全率が地震後に13%程度減少する場合があることが示めされた。

（４）地震後土砂災害発生基準雨量

・地震後土砂災害発生雨量の実態例

2011年の東北地方太平洋沖地震の震災後の土砂災害発生雨量については種々研究があり（例えば執印他 2012）、ここでは、現地調査が容易であった2005年の福岡県西方沖地震後の福岡市東区志賀島における土砂災害発生降雨の実態について研究したので報告する。

使用した降雨は、志賀島での実測雨量（福岡県志賀島潮見公園雨量計）と気象庁福岡アメダス降雨量を比較し、地震時の欠測を捕捉する目的で福岡アメダス降雨量から推定した志賀島雨量を用いた。

2005年の福岡県西方沖地震においては、総雨量20mm以上の降雨の土砂災害発生雨量指数（総雨量R×最大時間雨量Ri）は、地震後約19%まで下がり、低下率は89%となった。

また、地震前後の災害非発生降雨のR×Ri平均値にはT検定において1%の有意水準で有意な差が認められた。すなわち、地震後の非発生降雨指数R×Ri平均値は地震前のそれより有意に小さい。（地震前非発生R×Ri=4202.375、地震後非発生R×Ri=2052.753、両側P値0.0036、片側P値0.0018。）

ただし、この平均値の比較にはデータ期間中降雨の降り方に変化がない（大きな気象パターンに変化がない）との仮定がある。しかし、気候変動の視点からは、九州では、福岡県を含め降雨は長期的に増加傾向にあり（例えばAri1他 2014）、この事実を勘案すると地震後の非発生降雨指数R×Riは小さくなっている、すなわち土砂災害が発生しやすくなっていると思われる。その傾向は5年後の2010年程度まで続いていたことが認められた。

・地震後土砂災害発生基準雨量の引き下げと解除の実態

各地方自治体の地域防災の経験上、最大50%の災害発生雨量引き下げを数年間持続することが行われている。本研究結果からは、もう少し長期間に地震の影響が及ぶとも思われる。

<主な引用文献>（著者50音順）

- ①阿部真郎、檜垣大助（2011）：2011年東北地方太平洋沖地震に伴って発生した地すべりの地形・地質的特徴、第50回地すべり学会研究発表会概要集、3-4。
- ②内田 勉、山田正雄、森 正一、藤井 優、久保田哲也（2002）：鳥取県西部地震による落石・岩盤崩壊の発生状況と復旧対策、地すべり、39(1)、128-136。
- ③T. Kubota（2011）：Impacts of the Increased Rain Due to Climate Change on Shallow Landslides and Sediment Runoffs in Kyushu District, Japan, *Advances in geosciences*, Vol.23, World Scientific Publishing, 63-73。
- ④久保田哲也、大村寛、松本雅道、ハスナウヰル、武石久佳、茅島信行（2006）：福岡県西方沖地震における崩壊の地形地質的特徴－2005年台風災害等他災害との比較－、第3回土砂災害に関するシンポジウム論文集、1-6。
- ⑤T. KUBOTA, P. PAUDEL, H. OMURA（2006）：The influence of forests on susceptibility factors for slope stability - Some typical case for shallow landslides in western Japan -, *Proc. of the Int. Conf. on Geotechnical Engineering Singapore*, 111-118。
- ⑥久保田哲也、大村寛、海堀正博、清水 収、地頭菌隆、落合博貴、内田太郎、石井靖雄、安田勇次（2005）：2005年3月20日福岡県西部沖地震による土砂災害に関する調査報告、砂防学会誌、58(2)、32-37。
- ⑦久保田哲也（2002）：2000年10月6日の鳥取県西部地震による斜面崩壊・地すべり、地すべり、38(4)、52-57。
- ⑧執印康裕、堀田紀文、鈴木雅一、小山内信智、岡本 敦（2012）：地震後の崩壊発生降雨基準に関する一考察、砂防学会誌、65(2)、16-22
- ⑨地頭菌隆（1998）：1997年鹿児島県北西部地震による斜面崩壊の分布と地形特性、砂防学会誌 51(1)、38-45。
- ⑩野村康裕、岡本敦、倉本和正、池田寛（2013）土砂災害警戒情報の地震後暫定基準の妥当性に関する検討、平成25年度砂防学会研究発表会概要集、B190-191。
- ⑪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、地すべり学会誌、36(2)、3-12。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計6件）

- ①Hasnawir and T. Kubota: Rainfall Threshold for Shallow Landslides in Kelara Watershed,

Indonesia, International Journal of Erosion Control Engineering, Vol. 5 No.1, Japan society of erosion control engineering, 2012, pp86-92.

②久保田哲也、篠原 慶：平成 24 年梅雨末期豪雨による九州北部の山地災害、自然災害研究協議会西部地区部会報・論文集、37号、37-39、2013年2月。

③ Aril Aditian, Tetsuya Kubota, Yoshinori Shinohara: Influence of increasing rain on slope stability in forested area in Northern Kyushu, Japan, 自然災害研究協議会西部地区部会報・論文集、38号、2014、pp17-20。

④T. Kubota, Gou Nakamura, Yoshinori Shinohara: Consideration to the early warning rainfall criteria of landslides after strong earthquakes in Japan, Proc. InterPraevent, 2014, pp190-191.

⑤ Tetsuya KUBOTA, Go NAKAMURA, Yoshinori SHINOHARA, Aril ADITIAN: Consideration on the influence of seismic shaking on forest slope stability and landslide warning rainfall in the aftermath of the strong earthquake, Journal of faculty of agriculture, Kyushu University, 59(1), 2014, pp163-167.

⑥Laura Sanchez Castillo, Tetsuya Kubota, Israel Cantu Silva and Hasnawir: Critical Rainfall for the Triggering of Sediment Related Disasters under the Urban Forest Development in Nuevo Leon, Mexico, International Journal of Ecology and Development., Volume 30, Issue 1, 2015.

〔学会発表〕 (計9件)

①T. Kubota, Y. Shinohara, M. Matsui: The impact of increasing rainfall due to the climate change on landslide slope stability in Kyushu district, Japan, Proc. 3rd International Conference on Forest and Water Conference 2012 Sept.

②Tetsuya Kubota: Landslides induced by heavy rainfall in July 2012 in Northern Kyushu District and the influence of long term rainfall increase comparing with the slope destabilization due to strong seismic shaking, EGU2013-4132, European geosciences union, EGU April, 2013.

③久保田哲也：地震により亀裂を生じた森林斜面の崩壊危険雨量、平成 24 年砂防学会研究発表会、150-151、2012年5月。

④久保田哲也：気候変動下における山地からの土砂流出・山地災害、平成 24 年度地すべり学会九州支部講演会、2012年6月。

⑤Aril Aditian, Tetsuya Kubota: Influence of increasing Rain due to Climate Change on Forest Slope Stability in Aso City, Kumamoto Prefecture,

ISABE(international symposium on agricultural and biosystem engineering) 2013, Aug. 2013.

⑥久保田哲也、篠原慶規、中村豪、井上陽太：地震動に伴う土質強度の変化と斜面安全率、平成 26 年砂防学会研究発表会、A48-49、2014年5月。

⑦Aril Aditian, Tetsuya Kubota: Influences of increasing maximum hourly rainfall to slope stability in Aso city and Yame city, Japan, 平成 26 年砂防学会研究発表会、A52-53、2014年5月。

⑧Tetsuya Kubota: The influence of increasing rain and earthquake activities on landslide slope stability in forest areas, AGU (American Geophysical Union) Fall meeting 2014, San Francisco, NH43A-3804, 2014年12月。

⑨Laura Sanchez Castillo, Tetsuya Kubota, Israel Cantu Silva, Hasnawir: Rainfall thresholds for the initiation of landslides in Nuevo Leon, Mexico, AGU Fall meeting 2014, San Francisco, NH43A-3818, 2014年12月。

〔図書〕 (計0件)

〔産業財産権〕

該当なし (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://ffpsc.agr.kyushu-u.ac.jp/control/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久保田哲也 (KUBOTA, Tetsuya)
九州大学大学院・農学研究院・教授
研究者番号：40243381

(2) 研究分担者

篠原慶規 (SHINOHARA, Yoshinori)
九州大学大学院・農学研究院・助教
研究者番号：10615446