

雨の降り方の違いが斜面の水文過程と表層崩壊規模に及ぼす影響

INFLUENCE OF RAINFALL INTENSITY DURATION ON HYDROLOGICAL PROCESSES AFFECTING THE SLOPE, AREA, AND SIZE OF SHALLOW LANDSLIDES

木下 篤彦¹・野池 耕平¹・西岡 恒志²・筒井 和男²・福田 和寿²・
村田 雄一³・今森 直紀⁴・荒木 義則⁵・倉本 和正⁵・島田 徹⁶

Atsuhiko KINOSHITA, Kohei NOIKE, Tsuneshi NISHIOKA, Kazuo TSUTSUI, Kazuhisa FUKUDA,
Yuichi MURATA, Naoki IMAMORI, Yoshinori ARAKI, Kazumasa KURAMOTO and Toru SHIMADA

¹ 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

E-mail: a-kinoshita@pwri.go.jp

² 和歌山県土砂災害啓発センター (〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

³ 国土交通省中国地方整備局河川計画課 (〒730-8530 広島県広島市中区上八丁堀 6-30)

⁴ 国土交通省近畿地方整備局紀伊山地砂防事務所 (〒637-0002 奈良県五條市三在町 1681)

⁵ 中電技術コンサルタント株式会社 (〒734-8510 広島県広島市南区出汐二丁目 3-30)

⁶ 国際航業株式会社 (〒660-0805 兵庫県尼崎市西長州町 1 丁目 1-15)

Key Words: shallow landslide, precipitation, tank model, SCE-UA method, tensio meter

1. はじめに

近年, 2014年の広島災害, 2011年の那智川災害など大規模な表層崩壊が発生している¹⁾²⁾。これらの災害による被害を軽減するには, 予想される降雨分布から, 斜面での水文過程を推定し, 崩壊発生の有無や規模を予測することが重要である。

これまで, 斜面での水文観測事例³⁾⁵⁾や降水量から斜面の水文過程を予測する研究⁶⁾¹⁰⁾は多数ある。これらの研究によって, およそ斜面の水文過程は推定できるようになっている。その他, 表層崩壊の予測手法としては六甲山のハチース谷でのタンクモデルを用いた手法が鈴木ら¹¹⁾によって提案されており, 各段のタンクの貯留高から災害の発生の有無を予測できる可能性があることが分かっている。本研究の目的は, 近年の複数の災害の降雨特性と実際に発生した表層崩壊の規模を比較するとともに, その水文過程を再現することで, 簡易的な崩壊規模の予測に役立てることである。

本研究では, まず, 2014年の広島災害, 2011年の那智川災害, 2009年の防府災害, 1999年の広島災害を例に挙げ, 災害時の降雨分布や崩壊状況を調査し, 比較検討を行った。次に, それぞれの災害についてタンクモデルによって災害時の水文過程の再現を行った。これらの結果と崩壊規模を比較することにより, 水文過程が崩壊規模に及ぼす影響について検討した。最後にこれらの計算結果を検証する目的で,



図-1 4つの災害の発生箇所(数字:災害発生年)

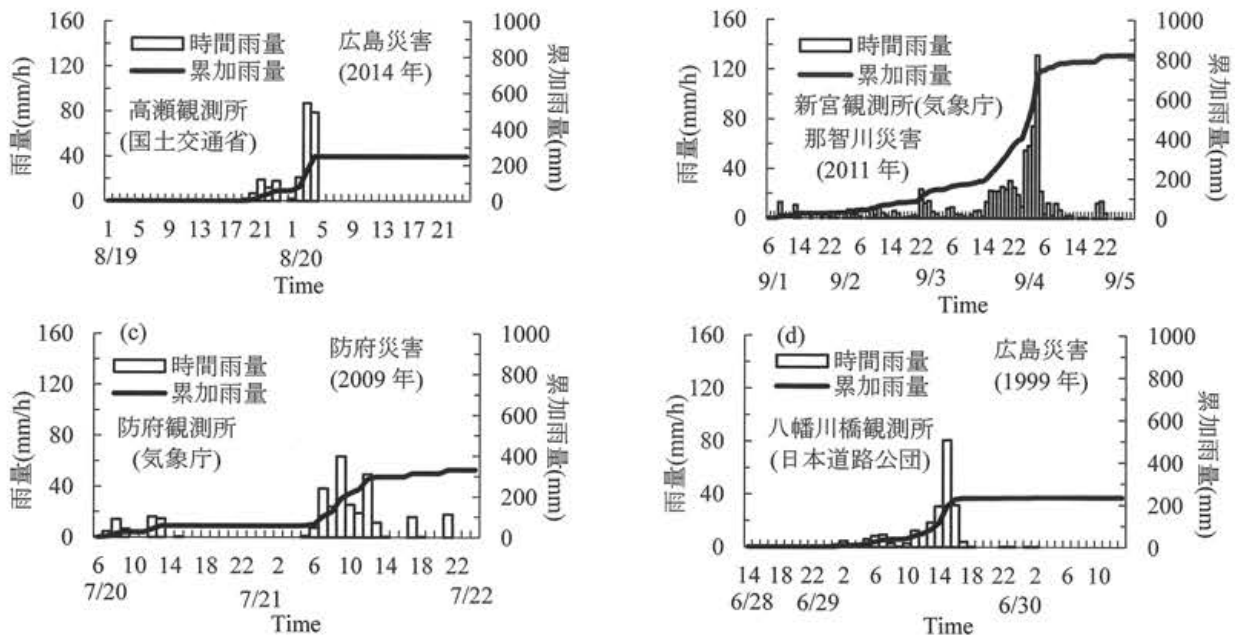


図-2 4 災害の災害時の時間雨量の変化。(a)2014年広島災害、(b)2011年那智川災害、(c)2009年防府災害、(d)1999年広島災害。

表-1 各災害発生箇所の地質及び降雨特性

災害名	広島災害(2014年)	那智川災害(2011年)	防府災害(2009年)	広島災害(1999年)
災害発生推定時刻	8月20日 3:30~4:00頃	9月4日 1:30~3:00頃	7月21日 11:30~12:00頃	6月29日 15:30~16:00頃
地質	花崗岩・泥岩	花崗斑岩・泥岩	花崗岩	花崗岩
本研究での検討対象エリア	八木・緑井地区	那智川流域	剣川流域	荒谷川流域
近隣の雨量観測所	高瀬観測所 (国土交通省)	新宮観測所 (気象庁)	防府観測所 (気象庁)	八幡川橋観測所 (日本道路公団)
総雨量(mm)	247	833	332	234
継続時間(hr)	10	88	21	23
最大1時間雨量(mm/h)	87	132	64	81
先行雨量(mm)	301	388	56	157
一連降雨前の無降雨日数(日)	3	6	2	3

表-2 各災害発生箇所の崩壊規模

災害名	広島災害 (2014年)		那智川災害 (2011年)	防府災害 (2009年)	広島災害 (1999年)
本研究での検討対象エリア	八木・緑井地区		那智川流域	剣川流域	荒谷川流域
地質	花崗岩	泥岩	花崗斑岩・泥岩	花崗岩	花崗岩
流域面積(km ²)	1.7	1.8	13.4	1.8	4.0
崩壊個数(個)	111	64	71	138	85
崩壊面積(km ²)	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05
平均崩壊面積(m ² /個)	541	938	873	362	588
崩壊密度(個/km ²)	65	35	5	77	21
崩壊面積率(%)	3.5	3.6	0.5	2.8	1.2
平均崩壊深(m)	1.1	1.2	2.1	1.0	1.1

1999年の広島災害により表層崩壊が発生した箇所
で、雨の降り方による水文過程の違いについて現地
観測結果から検証した。

2. 各災害の降雨特性と崩壊規模について

(1) 各災害の降雨特性について

図-1に4つの災害の発生箇所を示す。図-2に4
つの災害の時間雨量と累加雨量を示す。これらの降
雨の特徴をまとめると表-1のようになる。なお、総
雨量とは、災害発生時の降雨で前後に24時間以上の
無降雨時間のある一連の降雨の合計である。また、

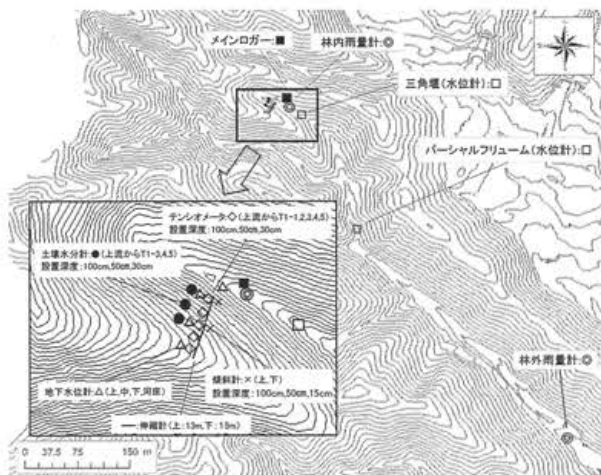


図-3 宮内地区での水文観測状況

先行雨量とは、上記の一連の降雨が始まる時点より前の30日間の雨量の合計値である。総雨量では、那智川災害が833mmと圧倒的に多い。一方、1999年の広島災害は総雨量が234mmと少ない。最大1時間雨量で見ると那智川災害が132mm/hと最も多く、防府災害が64mm/hと最も少ない。先行雨量で見ると那智川災害は388mmと圧倒的に多く、防府災害が56mmと最も小さい。時間雨量で見ると那智川災害が132mm/hと最も多く、防府災害が64mm/hと最も少ない。

(2) 各災害の崩壊面積・規模について

表-2に各災害発生箇所における崩壊規模を示す。なお、崩壊面積率とは、崩壊発生箇所を1kmメッシュで囲った場合、メッシュ内全ての崩壊面積の合計値を全てのメッシュの合計面積で除した値である。2014年の広島災害は、花崗岩・泥岩で平均崩壊面積・崩壊密度に大きな差があるのが特徴である。また、他地域の災害と比較して、崩壊面積率が大きいのが特徴である。2011年那智川災害は、総雨量・継続時間・最大1時間雨量・先行雨量とも他の災害より大きかったが、崩壊密度・崩壊面積率は最小であった。その一方で、平均崩壊深は最大であり、平均崩壊面積も大きい。2009年防府災害については、平均崩壊面積は小さいものの、崩壊密度・崩壊面積率が大きくなっている。1999年の広島災害については、いずれの指標についても中間的な値となっている。

3. 水文過程と崩壊規模の関係について

表-1の各災害の崩壊規模は、雨の降り方やそれに伴う斜面での水文過程が密接に関連していると考えられる。そこで本研究では、タンクモデルを用いた水文過程の再現計算を行った。表-1, 2の4つの災害と谷出口に設置したパーシャルフリュームによる

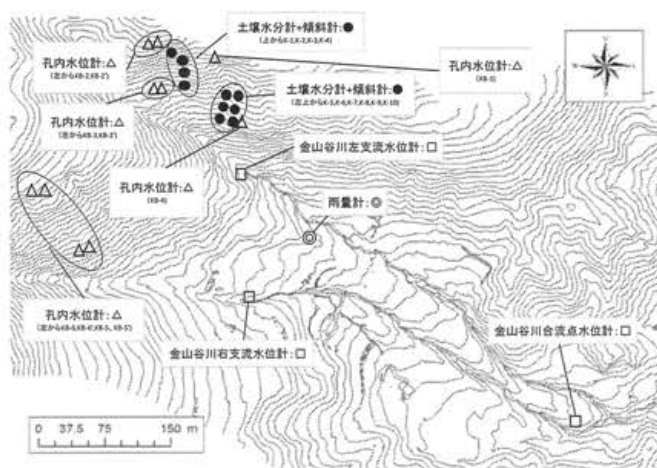


図-4 那智川流域金山谷での水文観測状況

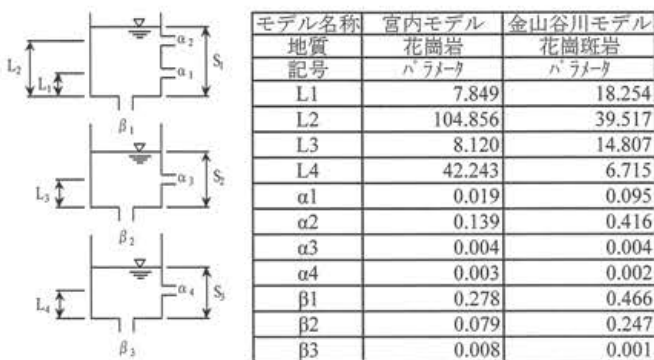


図-5 タンクモデルのパラメータ

害のうち、1999年の広島災害については、図-3に示すように2005年より災害発生箇所において雨量観測を行っている。このため、花崗岩地質の溪流における雨量・流量観測データに基づいたパラメータ設定が可能である。なお、観測点上流の流域面積は0.09km²である。また、2011年那智川災害についても、図-4に示すように、2012年より雨量観測と那智川支川の金山谷流域の3箇所水位観測（本研究では金山谷川左支川のデータを使用）を行っており、同様にパラメータ設定が可能である。なお、観測点上流の流域面積は0.62km²である。本研究では、パラメータ同定について、大域的探索手法としてその有効性が示されている最適化手法の一つであるShuffled Complex Evolution Method developed at the University of Arizona（以下、SCE-UA法^{12)・13)}を用いてタンクモデルを構築した。図-5にタンクモデルのパラメータを示す。これらのパラメータを用いて、それぞれ花崗岩のパラメータについては、2014年広島災害(花崗岩エリアのみ)・2009年防府災害・1999年の広島災害の再現計算を、花崗斑岩・泥岩のパラメータについては、2011年の那智川災害の再現計算を行った。

図-6に計算結果を示す。2014年広島災害について降雨強度の急激な上昇により1段目タンクの貯留高

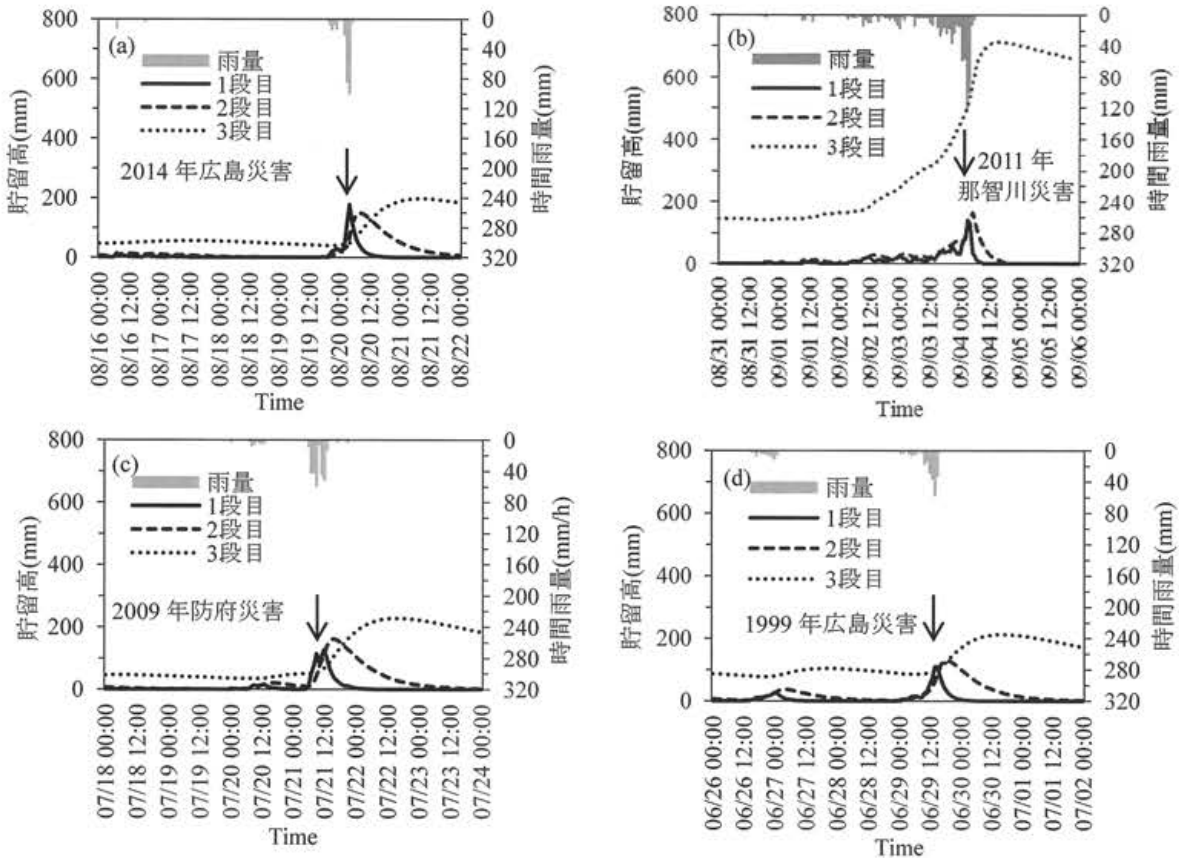


図-6 タンクモデルによる水文過程の再現計算結果。(a)2014年広島災害、(b)2011年那智川災害、(c)2009年防府災害、(d)1999年広島災害。図中矢印はおよその災害発生時刻を示す。

が急激に上昇している。2011年那智川災害について、3段目タンクの貯留高が災害発生前から高く、降雨によってさらに高くなっていることが分かる。2009年防府災害について、降雨強度の上昇に伴い1段目タンクとともに2段目タンクの貯留高の上昇が見られる。1999年広島災害について、3段目タンクの貯留高が災害発生前から高く、降雨によってさらに高くなっていることが分かる。これらの結果を表-2の崩壊規模の結果と合わせて考察すると、2014年広島災害、2009年防府災害の特徴としては、崩壊密度・崩壊面積率が高いことが挙げられる。1・2段目タンクは、表面流に寄与すると考えられることから、崩壊密度・崩壊面積率が高くなったと考えられる。2011年の那智川災害は、崩壊密度・崩壊面積率は小さかったものの、平均崩壊深・平均崩壊面積が大きかったことが挙げられる。3段目タンクは地下浸透に寄与すると考えられることから、地下水位の上昇が崩壊深や崩壊面積の大きな崩壊につながったと考えられる。1999年広島災害は、平均崩壊面積が大きいものの崩壊密度・崩壊面積率が低いことが挙げられる。降雨前から3段目タンクの貯留高すなわち地下水位が高かったことが考えられ、全体の崩壊個数や崩壊面積率は小さかったものの、1個の崩壊の大きさは大きかったと考えられる。以上から、1・2段目タン

クの貯留高が大きいと表面流により崩壊密度や崩壊面積率が大きくなること、3段目タンクの貯留高が大きいと地下水位の上昇により崩壊深や崩壊面積が大きくなると考えられる。

4. 雨の降り方が水文過程に及ぼす影響の検証

短期的かつ集中的な降雨、長期的な雨が水文過程に及ぼす影響を調査する目的で、宮内地区での水文観測データを基に3章のタンクモデルの計算結果の検証を行った。本研究では、2011年の那智川災害・1999年の広島災害のような長期的な降雨の影響を調査する目的で、観測中最も総雨量の多かった2013年10月23日～25日の降雨(総雨量239mm, 最大1時間雨量17mm, 継続時間54時間)、2014年広島災害・2009年の防府災害のような短期的かつ集中的な降雨の影響を調査する目的で、最も最大1時間雨量の多かった2014年8月19～20日の降雨(総雨量106mm, 最大1時間雨量56mm, 継続時間6時間)の水文データを整理した。

図-7に2013年10月23日～25日の、図-8に2014年8月19日～20日の水文観測結果を示す。図-7(b)・(c)より、降雨により水は深さ100cmまで浸透していることが分かる。また、(b)より、テンシオメ

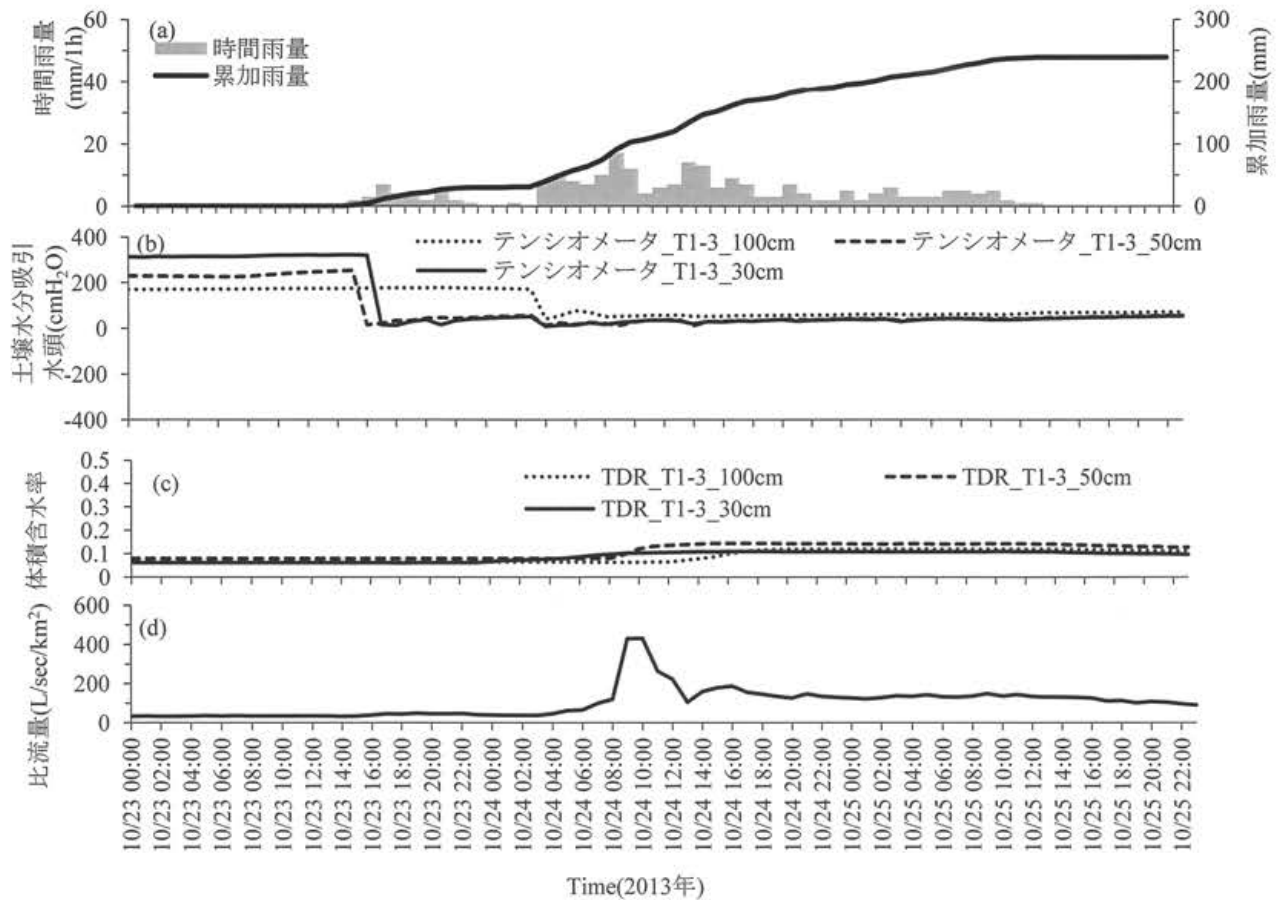


図-7 2013年10月23日～25日の室内地区での水文観測結果。(a)時間雨量(林外)の変化, (b)テンシオメータによる観測結果, (c)TDRによる観測結果, (d)パーシャルフリウムによる溪流末端での流量変化。

一タの値が定常状態となり、深さ50cm、100cmの体積含水率が上昇しながら流量が増加している。このことは地下深くまで水が十分浸透しながら谷出口に水が流出していることを示している。図-8(b)より、降雨は短時間であったため、深さ30cm付近では水が浸透しているものの、50cm、100cmと深くなるにつれて土壤水分吸引水頭の低下が小さくなっている。また、(c)から、深さ50cmでの体積含水率の上昇は深さ30cmでの上昇に比べ1時間程度遅れている。(d)から、パーシャルフリウムでの流量の増加は降雨量の増加や深さ30cmの土壤水分吸引水頭や体積含水率の増加とほぼ同時刻であり、流量のピーク時には深さ50cmにはほとんど水が浸透していなかったと考えられる。

以上から、短時間の急激な雨と長時間かつ総雨量の大きい雨では水の浸透過程に違いがあることが分かった。このことが、表-2の崩壊規模に影響していると考えられる。

5. おわりに

本研究では、近年の複数の表層崩壊による災害の降雨特性・崩壊規模を比較するとともに、タンクモ

デルによるタンクの貯留高と崩壊規模の関係性、現地での水文観測による雨の降り方の違いによる水文過程の違いについて検証した。得られた成果は以下の通りである。

- 1)4つの災害の雨の降り方や崩壊規模の結果から、雨の降り方の違いにより、崩壊面積・崩壊密度・崩壊深に違いが出ることが分かった。
- 2)タンクモデルを用いた再現計算の結果、1・2段目タンクの貯留高が大きいと表面流により崩壊密度や崩壊面積率が大きくなること、3段目タンクの貯留高が大きいと高い地下水位により、崩壊深が大きくなる、もしくは1個1個の崩壊面積が大きくなる可能性があることが分かった。
- 3)長時間の総雨量の大きい雨と短時間の急激な雨について斜面での水文過程を比較すると、長時間の雨の場合は鉛直方向に水が浸透した上で下流に流出する。一方、短時間の雨の場合は鉛直方向への水の浸透が十分進まずに表面流によって水が下流に流出することが分かった。これらのことから、雨の降り方が崩壊規模に影響を及ぼすことが示唆された。

参考文献

- 1)海堀正博, 石川芳治, 里深好文, 松村和樹, 中谷加奈,

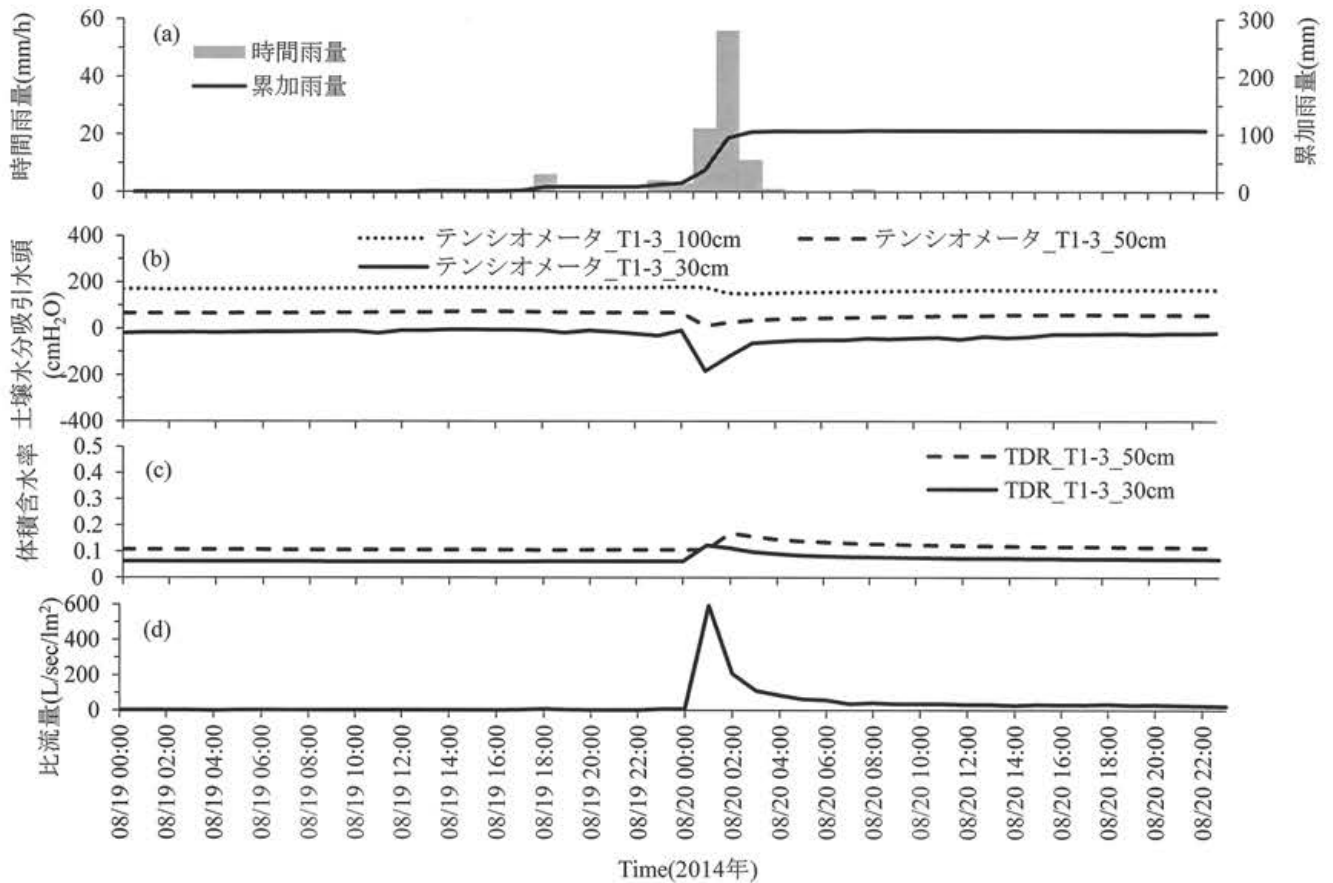


図-8 2014年8月19日～20日の宮内地区での水文観測結果。(a)時間雨量(林外)の変化。(b)テンシオメータによる観測結果。(c)TDRによる観測結果。(d)パーシャルフリウムによる斜面末端での流量変化。なお、(c)についてはTDRの100cmのデータは欠測であった。

長谷川祐治, 松本直樹, 高原晃宙, 福塚康三郎, 吉野弘祐, 長野英次, 福田真, 中野陽子, 島田徹, 堀大一郎, 西川友章: 2014年8月20日に広島市で発生した集中豪雨に伴う土砂災害, 砂防学会誌, Vol.67, No.4, pp.49-59, 2014.

2) 松村和樹, 藤田正治, 山田孝, 権田豊, 沼本晋也, 堤大三, 中谷加奈, 今泉文寿, 島田徹, 海堀正博, 鈴木浩二, 徳永博, 柏原佳明, 長野英次, 横山修, 鈴木拓郎, 武澤永純, 大野亮一, 長山孝彦, 池島剛, 土屋智: 2011年9月台風12号による紀伊半島で発生した土砂災害, 砂防学会誌, Vol.64, No.5, pp.43-53, 2012.

3) 岩田直樹, 中井真司, 片山弘憲, 柳崎剛, 笹原克夫: 平成26年8月の広島県廿日市市において観測された降雨浸透と斜面の変形, 地盤工学ジャーナル, Vol.10, No.4, pp.623-634, 2015.

4) 岩田直樹, 荒木義則, 笹原克夫: 現地計測に基づく降雨に伴うまさ土斜面のせん断変形挙動の評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.2, pp.141-151, 2014.

5) 瀧口茂隆, 内田太郎, 盛伸行, 田村圭司: 広島西部山系における斜面観測, 砂防学会誌, Vol.61, No.2, pp.52-56, 2008.

6) 平松晋也, 水山高久, 石川芳治: 山腹斜面における雨水の挙動と数値モデルによる再現性に関する研究, 新砂防,

Vol.44, No.1(174), pp.21-30, 1991.

7) 平松晋也, 水山高久, 小川滋, 石川芳治: 降雨波形の山腹表層崩壊現象に及ぼす影響, 新砂防, Vol.44, No.5(178), pp.3-13, 1992.

8) 小杉賢一朗, 水山高久, 藤田正治: 表層崩壊発生予測モデルによる地下水位の再現精度の検討, 砂防学会誌, Vol.55, No.3, pp.21-32, 2002.

9) 小杉賢一朗: 斜面における雨水の浸透・流出過程のモデル化, 砂防学会誌, Vol.57, No.3, pp.71-79, 2004.

10) 小杉賢一朗, 木下篤彦, 藤本将光, 水山高久, 三道義己: 地形に依存した雨水流動追跡に基づく表層崩壊発生予測の問題点, 砂防学会誌, Vol.65, No.1, pp.27-38, 2012.

11) 鈴木雅一, 福駕義宏, 武居有恒, 小橋澄治: 土砂災害発生の危険雨量, 砂防学会誌, Vol.31, No.3, pp.1-7, 1979.

12) 杉原成満, 福田慎哉, 倉本和正, 荒木義則, 朝位孝二, 古川浩平: SCE-UA法を用いたタンクモデルの構築とそれを用いた土砂災害発生危険基準線の設定, 土木学会論文集 F6(安全問題), Vol.67, No.1, pp.1-13, 2011.

13) 杉原成満, 朝位孝二, 倉本和正, 荒木義則, 古川浩平: SCE-UA法を用いたタンクモデルの最適構造構築に関する一考察, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.70, No.1, pp.12-17, 2014.

(2016.5.31 受付)