

清水寺観測斜面における地上雨量とレーダ雨量との 差異に関する一考察

Differences in the rainfall characteristics between observed and radar rainfall
at Kiyomizu-dera Temple

檀上徹¹・藤本将光²・石澤友浩³・有光悠紀⁴・深川良一⁵

Toru Danjo, Masamitsu Fujimoto, Tomohiro Ishizawa, Yuuki Arimitsu and Ryoichi Fukagawa

¹国立研究開発法人防災科学技術研究所 特別研究員 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

Associated Research Fellow, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

²立命館大学助教 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Assistant Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

³国立研究開発法人防災科学技術研究所 主任研究員 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

Chief Researcher, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

⁴立命館大学大学院博士課程前期課程 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Graduate Student, Ritsumeikan University, Graduate school of Science and Engineering

⁵立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

The risk of sediment disasters was examined from rainfall data obtained from rader (XRAIN with 1-km mesh size). Since the scale of slope failure is smaller than that of XRAIN with the 1-km mesh, it is necessary to evaluate the accuracy of the XRAIN output values for the target slope. We compared the observational rainfall data obtained at the site, XRAIN (1-km mesh), XRAIN (250-m mesh), and rainfall data from the Japan Meteorological Agency to evaluate the timing of the advisory or warning of sediment disaster. Our results showed a close correlation between the observed rainfall and XRAIN (250-m mesh), and indicated that the XRAIN (250-m mesh) data are suitable for assessing the risk of sediment disasters.

Keywords : Rainfall, XRAIN, Soil index

1. はじめに

文化遺産の多くは山地斜面に位置しており、土砂災害の潜在的危険性が高い場合が多い。例えば、平成23年台風12号によって南紀地方にもたらされた豪雨により、和歌山県那智勝浦町における世界遺産の那智大社が土砂災害により被災した。また、平成23年台風18号および平成25年台風11号にと伴い、京都市東山区に位置する清水寺およびその周辺で土砂災害が発生し、多大な被害を被った。いずれも降雨に起因し土砂災害が発生しており、山地斜面における文化遺産の防災を行う上で現状の雨量もしくは数時間先の雨量を予測することは極めて重要である。近年、XバンドMPレーダネットワーク (XRAIN) の開発および配置数の増加による雨量観測技術の向上に伴い、雨量観測メッシュの細分化や観測時間の短縮化が実現している。また、国土交通省では、XRAIN (1kmメッシュ) の観測記録を用いて土砂災害警戒基準を5kmメッシュで策定し日本各地で運用している¹⁾。しかしながら、山地部における地域では、地形的要因からレーダによる上空での計

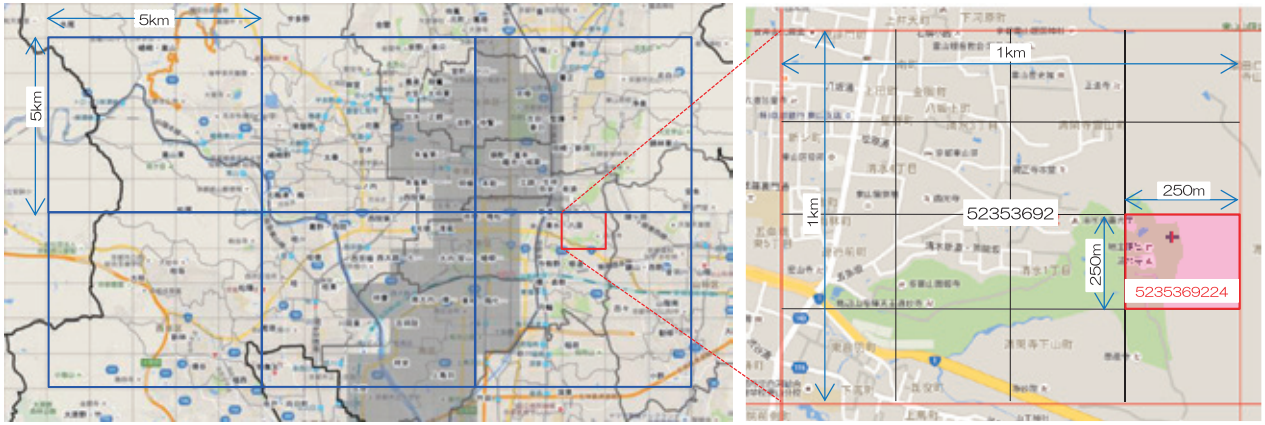


図1 XRAINのメッシュ図および降雨取得エリア（参考文献2に加筆）

測値を基にした雨量の推定値と地上での雨量計測値との誤差が生じる可能性が、平地での計測に比べて高くなると言われている²⁾。そこで本研究では、清水寺境内の奥之院後背斜面における雨量観測またはその周辺での雨量観測記録を収集し、地上雨量とレーダ雨量との比較を行うとともに、土砂災害に対する各基準値超過時刻の差異について検討することで、本対象斜面の雨量観測に関する考察を行う。

2. 研究方法

(1) 土砂災害警戒情報について

土砂災害警戒情報とは、大雨注意報が発表され、続いて大雨警報（土砂災害）が発表されている状況で、土砂災害発生の危険度がさらに高まった時（土砂災害警戒基準を超過する予測時）に、市町村長の避難勧告等の判断を支援するよう、また住民の自主避難の参考となるよう、対象となる市町村を特定して警戒を呼び掛ける情報で、都道府県と気象庁が合同で発表している。1kmメッシュごとに大雨注意報、大雨警報の土壌雨量指数の基準値が定められており、本論文の対象地である清水寺を含む地域では、大雨注意報、大雨警報の基準値が93, 116とそれぞれ決められている。また土砂災害警戒基準は、土壌雨量指数と1時間雨量の「連携案方式³⁾」を用いて過去の土砂災害発生事例を基に確率統計的に処理して基準線を策定している。XRAINによる2時間後の降雨予測値を用いて、2時間後の予想で土砂災害警戒基準値に達する場合、土砂災害警戒情報が発表される仕組みである。

(2) 雨量データ

本論文では、清水寺境内の奥之院後背斜面における現地雨量観測値、京都府建設交通部砂防課が運用するホームページ（京都府土砂災害警戒情報）上⁴⁾で公開されているXRAIN（1kmメッシュ）の観測値、国土交通省より提供されたXRAIN（250mメッシュ）の観測値、気象庁（京都府 京都）の観測値を用いた。以後、本文では4つの観測方法をそれぞれ、現地、京都府、XRAIN、気象庁と呼ぶ。清水寺境内の奥之院後背斜面における現地雨量は、上空の見通しの良い位置に設置された1転倒0.254mmの転倒ます式雨量計を用いた。計測位置の詳細については、これまでの研究⁵⁾を参照されたい。京都府雨量のXRAIN（1kmメッシュ）は、清水寺の位置する3次メッシュ（番号：52353692）の雨量を採用した（図1）。また、XRAIN（250mメッシュ）雨量は、1kmメッシュをさらに分割し、奥之院後背斜面が位置する5次メッシュ（番号：5235369224）の雨量を採用した（図1）。気象庁（京都府 京都）雨量の観測値は、対象斜面から約5.5km離れた1転倒0.5mmの転倒ます式雨量計を用いた。また、各雨量は10分間雨量データを用いている。

(3) 分析方法

京都府のXRAIN（1kmメッシュ）の雨量観測値の公開が2015年6月15日であったことから、京都府雨量データについては2015年7月1日-2015年12月31日まで（6ヵ月間）を用いた。また、現地、XRAIN、気象庁の雨量データは、2013年から取得していることから2013年1月1日-2015年12月31日までを用いた。そのため、各観測雨量を同軸で比較する場合は、京都府雨量の2015年7月1日-12月31日を分析対象期間

表1 2015年7月1日-12月31日の降雨イベント

降雨イベント 番号	開始日時	現地雨量			京都府	XRAIN	気象庁
		最大10分間雨量 (mm/10min)	最大1時間雨量 (mm/h)	総雨量 (mm)	観測データの有無		
1	7/16 2:10	3.3	16.8	234.7	○	○	○
2	7/22 7:20	6.9	15.5	58.7	○	○	○
3	7/29 14:20	8.4	19.8	21.6	○	○	○
4	7/30 9:40	7.6	11.2	11.2	○	○	○
5	8/12 22:30	4.8	17.0	27.9	○	○	○
6	8/16 15:20	6.1	16.5	62.7	○	○	○
7	8/19 20:10	3.6	16.3	62.5	○	○	○
8	8/25 8:00	7.9	14.5	32.0	○	○	○
9	8/29 11:50	10.7	23.1	35.6	○	○	○
10	8/31 11:10	7.9	23.1	35.1	○	○	○
11	9/6 8:00	1.8	3.8	15.7	○	○	○
12	9/7 21:20	1.3	4.8	40.9	○	○	○
13	9/16 10:50	2.0	8.1	18.0	-	○	○
14	9/24 7:30	1.8	5.3	18.5	-	○	○
15	10/1 12:20	2.0	6.6	14.0	○	○	○
16	11/2 0:40	1.0	3.6	11.7	-	○	○
17	11/8 2:10	4.6	9.1	45.2	-	○	○
18	11/13 17:10	1.5	4.8	31.8	-	○	○
19	11/17 13:10	3.0	12.4	56.6	-	○	○
20	11/25 16:10	0.8	2.8	15.0	-	○	○

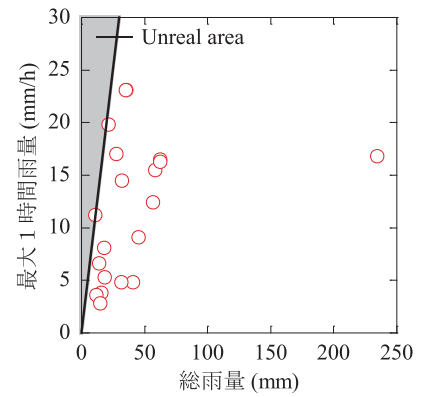


図2 2015年7月1日-12月31日の総雨量と最大1時間雨量

とした。1つの降雨イベントの定義は現地の雨量観測を基に、降雨前後に無降雨期間が12時間継続し総雨量が10.0mm以上とした。4つの観測方法で得られた雨量を比較するため、2015年7月1日-12月31日までの対象期間内で分析した20件の降雨イベントを表1、総雨量と最大1時間雨量との関係を図2にそれぞれ示す。清水寺と隣接する大谷本廟で斜面崩壊が発生した2015年の台風11号による雨量は、降雨イベント1に相当する。現地、XRAIN、気象庁の土壌雨量指数は、気象庁が公開しているタンクモデル⁶⁾を用い2013年1月1日から10分毎に計算した。京都府の土壌雨量指数については、計算値がホームページ上に記載されているためそのまま用いた。なお、京都府の公開されているデータは、降雨量が小さいまたは無降雨時のデータは1週間経過すると「-」と表示され、筆者らがデータを取得した2016年2月以降では、表1で示した降雨イベント1-12, 15以外のデータは「-」と表示されていた。本論文では、「-」と表示された雨量は「0」と定義してデータ整理を行った。

3. 結果と考察

(1) 対象期間の降雨量および土壌雨量指数の変化

図3に、対象期間における各雨量観測結果に基づく土壌雨量指数、1時間雨量、累積雨量の経時変化について示す。2015年7-9月は梅雨期・台風期であったことから、多くの降雨イベントが発生した。10月以降は大きな降雨イベントが少なかったことから、京都府のデータの多くは「-」と表示されていた。7-9月までの現地、京都府、XRAIN、気象庁の累積雨量は762.0, 1027.9, 874.9, 848.5mmであったことから、現地と京都府との累積雨量の差は約266mmであった。また、表1で示した降雨イベントにおける現地と京都府の総雨量は、604.3mmと1034.5mmであったことから、1.7倍以上の違いがあった。一方、土壌雨量指数はデータ数が少なく途切れているため判断は難しいが、他の結果と比較して高い値が示された。対象期間における現地、京都府、XRAIN、気象庁の総雨量は、1011.2, 1101.6, 1267.7, 1165.0mmであったことから、観測方法および観測位置により雨量観測値の差があることが分かった。

次に、本対象期間における降雨イベントの中で総雨量が異なる3つのイベントを抽出し、累積雨量と土壌雨量指数の違いについて個別の降雨イベントごとに比較した。ここでは便宜上、総雨量小、総雨量中、総雨量大と分け、それぞれ現地雨量が32.0mm(降雨イベント8)、62.5mm(降雨イベント7)、234.7mm(降雨イベント1)を抽出した(図4)。図4(a), (c), (e)より、総雨量に関わらず京都府の累積雨量が非常に大きいことが分かった。総雨量大における現地の累積雨量は他と比べ少なく、XRAINや気象庁の累積雨量とは差異がある一方、総雨量中、総雨量小では近い値を示した。特に現地雨量の降り始めや上昇するタイミングは、京都府と比べXRAINや気象庁の雨量の傾向が一致していた。図4(b), (d), (f)の土壌雨量指数の結果より、累積雨量と同様に現地とXRAINおよび気象庁の結果が類似していることが分かった。

(2) 現地観測に対する气象台、XRAIN、気象庁の観測雨量および土壌雨量指数の精度評価

図5, 6, 7に、現地と京都府、XRAIN、気象庁との1時間雨量、10分間雨量、土壌雨量指数値の関係について示す。現地とXRAIN、気象庁のデータについては、2013年1月1日からの雨量データを用いている。また、取

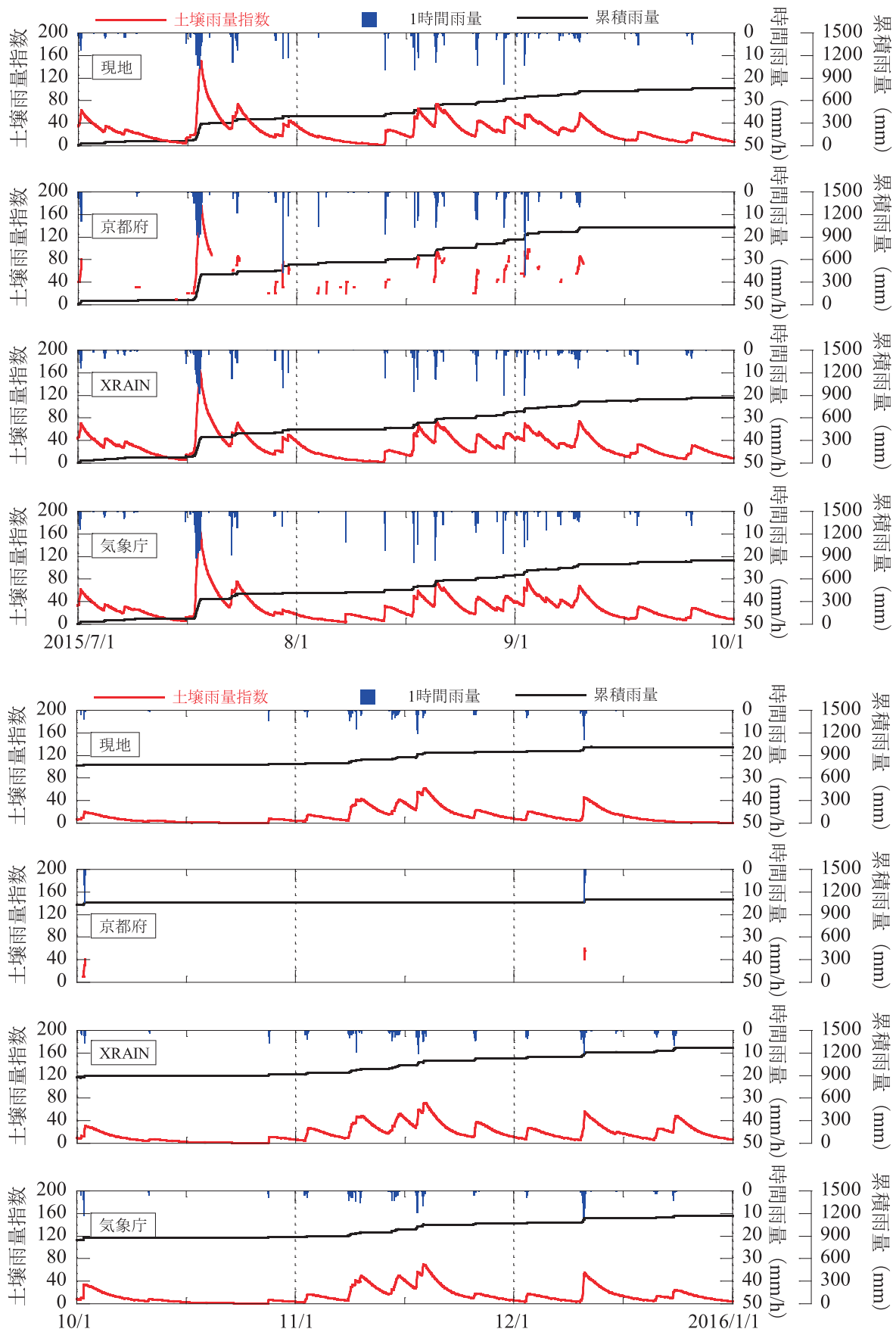


図3 対象期間における各雨量観測結果に基づく土壌雨量指数と累積雨量の経時変化

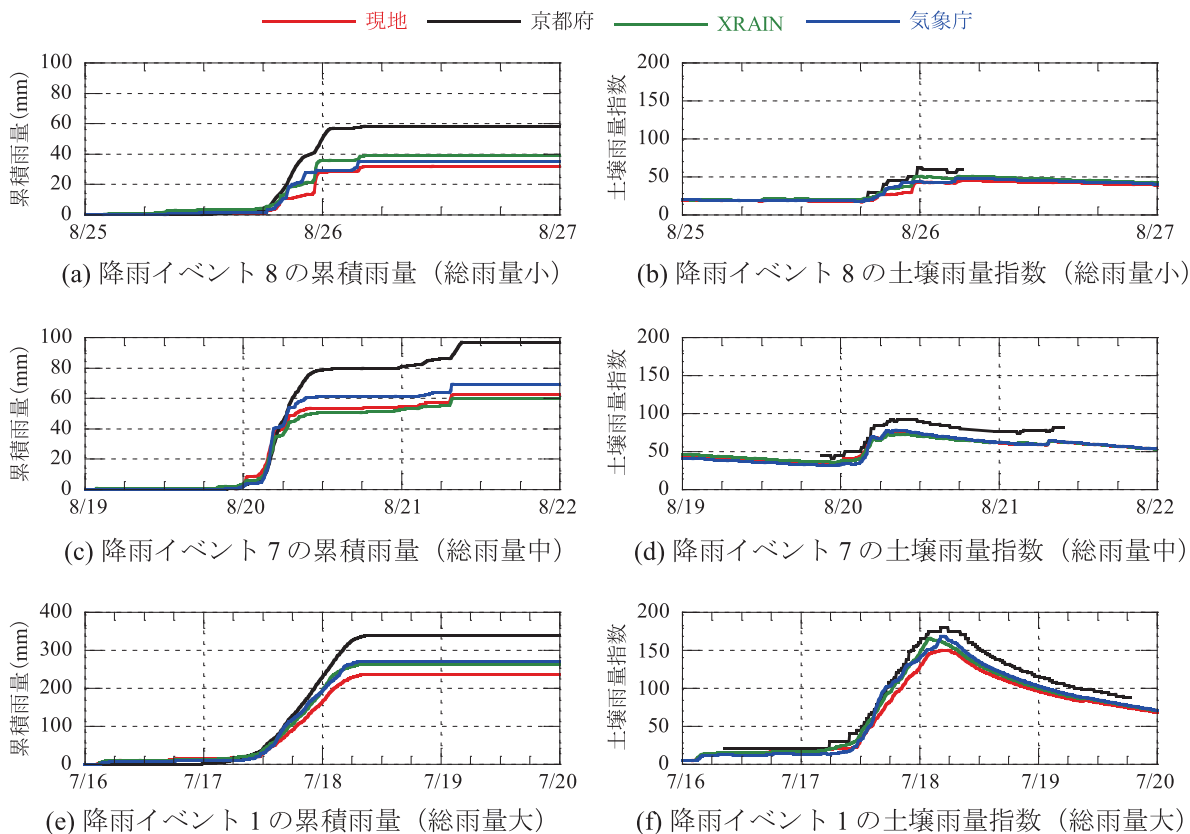


図4 総雨量が異なる降雨時における各観測雨量の累積雨量と土壌雨量指数の関係

り扱ったデータは、現地雨量が観測された時刻のデータ (> 0mm/10min.) およびXRAIN、気象庁の各々で観測された時刻のデータ (> 0mm/10min.) を用いた。京都府の雨量データについては、2015年7月1日からの雨量データを用い、現地雨量が観測された時刻のデータ (> 0mm/10min.) を使用した。また、本論文では現地雨量の計測値を正值として考察を行っている。

図5の1時間雨量の関係より相関係数が、京都府 (0.78)、XRAIN (0.91)、気象庁 (0.83) となったことから、現地雨量とXRAIN雨量との相関が非常に強いことが分かる。その一方、基準として用いられている京都府の雨量データとの相関は、XRAINおよび気象庁雨量と比較して弱いことが示された。京都府の回帰直線傾きが1を超えていることから、現地と比べ過大評価し易い結果となり、XRAIN、気象庁では過小評価する傾向があった。さらに、RMSE (平均2乗誤差) よりXRAINの1時間雨量の誤差は1.14mmに対し、気象庁、京都府はそれぞれ2.17, 5.03mmであった。そのため京都府とXRAINの雨量データはそれぞれ1kmメッシュと250mメッシュであることから、同じ1kmメッシュ内の雨量にも関わらずメッシュサイズに伴い降雨量の差異が生じることが分かった。

また、10分間雨量の (図6) 相関係数では、京都府 (0.71)、XRAIN (0.85)、気象庁 (0.61) となったことから、1時間雨量の結果と同様に現地雨量とXRAIN雨量との相関が強いことが分かる。また、気象庁の雨量データは1時間雨量の結果と比べ相関係数が大きく下がる結果となった。各回帰直線式では、XRAIN、気象庁の値が1より小さく現地と比べ過小評価する傾向があった。さらに、10分間雨量のRSME (2乗平均平方根) は、京都府、XRAIN、気象庁の順に0.90, 0.40, 0.93mmであった。そのため、短時間で変化する降雨を捉えるには、気象庁の雨量観測点までの距離が相関性を弱くする要因の一つであることが分かった。また、京都府の結果と比べXRAINの結果の相関性が強く誤差の小さいことが示された。

図7より土壌雨量指数の相関係数は、京都府 (0.97)、XRAIN (0.93)、気象庁 (0.95) となり、各観測方法とも相関が高かった。京都府の回帰直線式の傾きが1.15を示し現地と比べ過大評価する傾向が見られたが、XRAINと気象庁の回帰直線式は1:1の関係に近かった。またRMSEの結果より、京都府と比べXRAINと気象庁の誤差は小さいことが分かった。

以上のことから、現地雨量に対する京都府、XRAIN、気象庁雨量について回帰直線、相関係数、RMSE

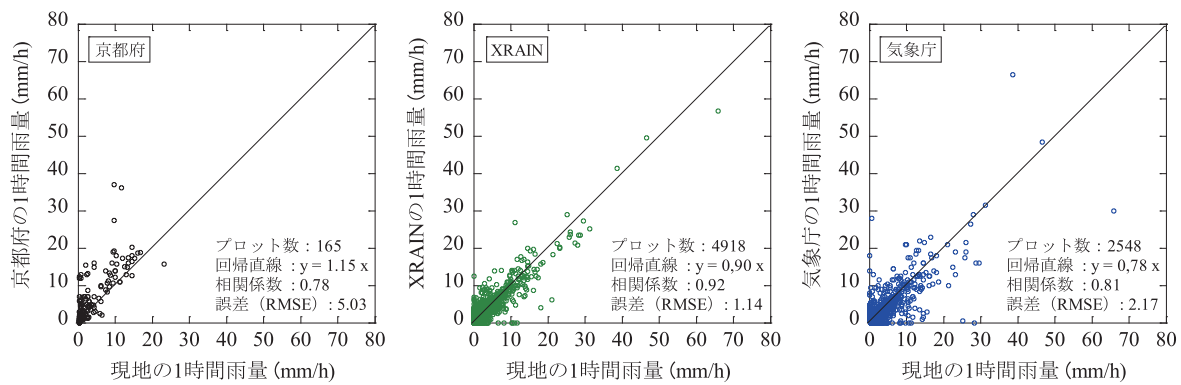


図5 現地と京都府，XRAIN，気象庁との1時間雨量の比較

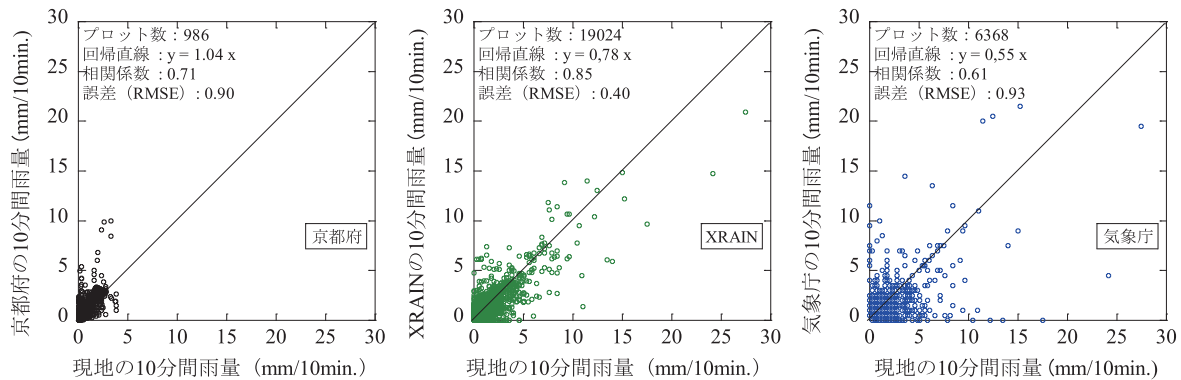


図6 現地と京都府，XRAIN，気象庁との10分間雨量の比較

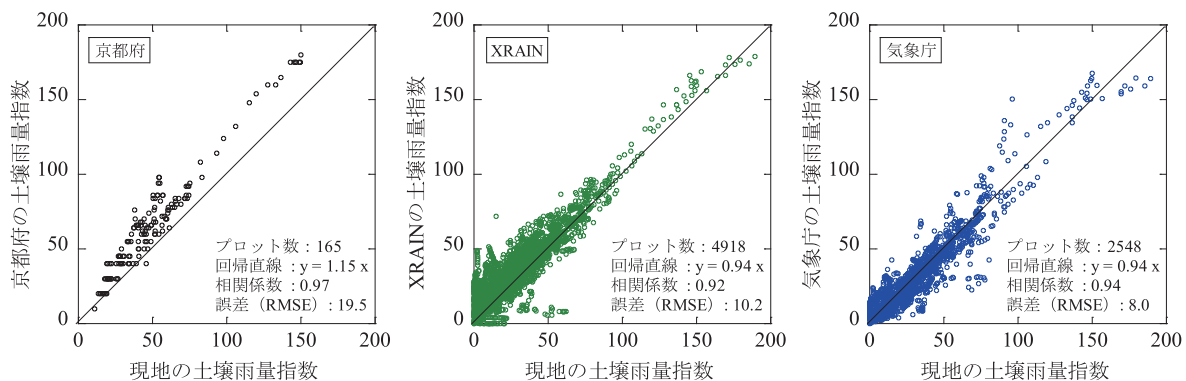


図7 現地と京都府，XRAIN，気象庁との土壌雨量指数の比較

(平均2乗誤差)の3つの精度評価指標を用いた結果、京都府雨量と比較してXRAIN雨量の精度が高いことが分かった。また、ゲリラ豪雨等で見られる短時間で変化する降雨に対して、気象庁の雨量観測点までの距離が相関性を弱くする要因の一つであることが分かった。そのため、清水寺奥之院後背斜面における雨量評価を行う場合、狭い範囲でのXRAIN雨量(250mメッシュのXRAIN)を用いることが有用であると示された。また土壌雨量指数の結果については、すべての観測方法において相関係数が高く相関性が高いものの傾きが1を超えていることから、実際に基準値として用いられている京都府の結果においては現地と比べて過大評価する傾向が見られた。

(3) 雨量観測方法に伴う基準値超過の差異

前節まで、雨量観測方法の違いに伴う雨量結果の差異について示してきた。本節では、雨量観測の差異に伴う大雨注意報値、大雨警報値、土砂災害警戒基準値超過の時刻差について述べる。

図8に2013年9月に清水寺境内で5箇所の斜面崩壊が生じた際の⁷⁾、現地、XRAIN、気象庁の土壌雨量指数

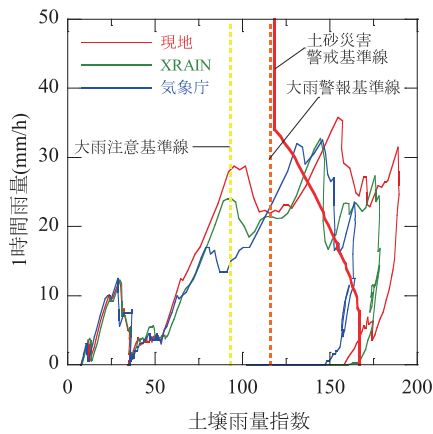


図8 2013年9月の各雨量観測によるスネーク曲線

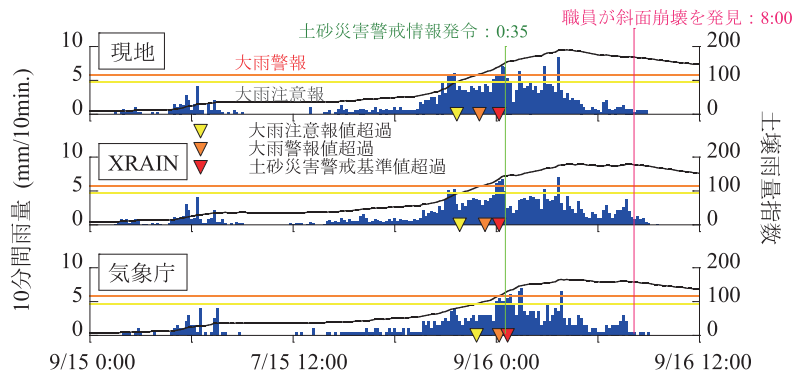


図9 2013年の降雨イベントにおける10分間雨量および土壌雨量指数の時系列変化と各基準値超過時刻

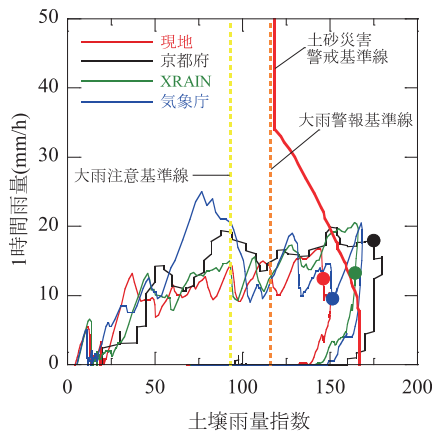


図10 2015年7月の各雨量観測によるスネーク曲線 (●: 大谷本廟での崩壊時)

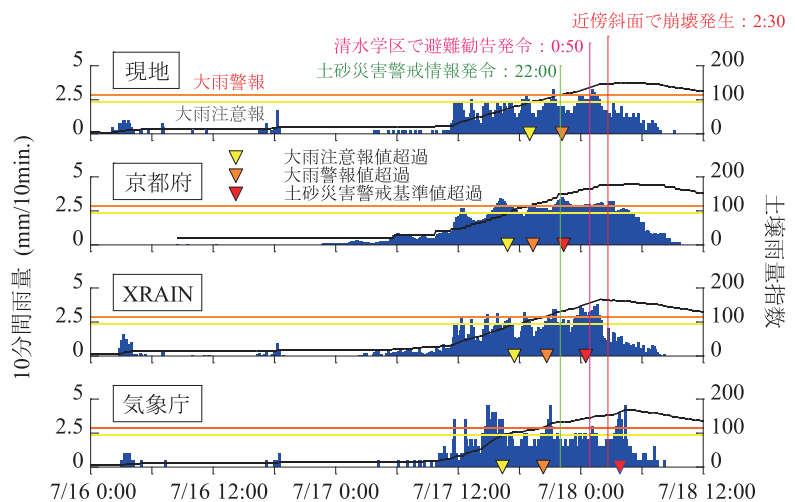


図11 降雨イベント1の10分間雨量および土壌雨量指数の時系列変化と各基準値超過時刻

と1時間雨量のスネーク曲線を示す。京都府の雨量データの公開が2015年6月15日からであったことから、この期間のデータはない。図8より、各スネーク曲線は土壌雨量指数が75に達するまで同じように推移した。その後も現地とXRAINは類似した傾向を示した。図9に2013年の降雨イベントにおける10分間雨量および土壌雨量指数の時系列変化と各基準値超過時刻について示す。現地およびXRAINの観測値が大雨注意報値、大雨警報値を超過した時刻がそれぞれ現地在が10、20分早く、土砂災害警戒基準値の超過時刻は同時刻であったことから、現地とXRAINの雨量観測に基づく各基準値超過の差異はほとんどなかった。

清水寺と隣接する大谷本廟境内で大規模な斜面崩壊が発生した降雨イベント1における土壌雨量指数と1時間雨量の各雨量観測におけるスネーク曲線を図10に示す。図4(a)で示した累積雨量の差より、図10の現地のスネーク曲線は土砂災害警戒基準線を超えないのに対し、京都府、XRAIN、気象庁は超える結果となった。図11に降雨イベント1の10分間雨量および土壌雨量指数の時系列変化と各雨量観測による大雨注意報値、大雨警報値、土砂災害警戒基準値を超えた時刻を示す。京都府、XRAIN、気象庁が大雨注意報値に達した時刻は、現地と比べて130、90、160分早かった。また、大雨警報値の超過はそれぞれ170、90、110分早い結果となった。さらに京都府、XRAIN、気象庁は土砂災害警戒基準線をそれぞれ17日22時00分、18日0時30分、18日3時50分に超過し、18日2時30分に大谷本廟境内において斜面崩壊が発生したが、清水寺境内においては斜面崩壊による大きな被害はなかった。

以上のことから、2013年9月に清水寺境内で発生した斜面崩壊については、現地、XRAIN、気象庁雨量が土砂災害警戒基準線を超過した後に崩壊し、各基準値超過時刻が類似していることから、雨量観測方法によ

る差異は見られなかった。2015年7月に大谷本廟境内で発生した斜面崩壊は、京都府雨量観測に伴う各基準値超過の時刻は他と比べ非常に早期になり、現地雨量観測による基準値超過との時刻の差異があった。

4. おわりに

現在、1kmメッシュのXRAIN雨量を用いた広域の観測がなされており、これら観測記録と土砂災害発生との関係を統計的手法を用いて分析することで、土砂災害に対する各基準値が設けられている。しかしながら、表層崩壊は1kmメッシュに比べ非常に小域であることやXRAINの精度の問題があるとされていることから、対象斜面での実測値との比較を行うことは重要である。そこで本論文では、清水寺境内の奥之院後背斜面に設置した雨量観測（現地）、京都府建設交通部砂防課が運用する1kmメッシュのXRAINの雨量観測（京都府）、1kmメッシュをさらに細分化した250mメッシュのXRAINの雨量観測（XRAIN）、気象庁京都（気象庁）の雨量観測による結果を整理するとともに、土砂災害に対する各基準値超過時刻の差異について検討することで、本対象斜面の雨量観測に関する考察を行った。以下に今回得られた知見について示す。

- 1) 2015年7月1日－12月31日の結果より、降雨イベントの総雨量の大小に関わらず京都府の累積雨量が他の観測結果と比べ最も高かった。また、現地と京都府の降雨イベント時の累積雨量の総和を比較すると、現地の1.7倍以上の雨量が京都府で観測されていることが判明した。
- 2) 京都府とXRAINの観測は双方ともXRAINを用いているが、1kmメッシュと250mメッシュとで雨量結果が異なったことから、清水寺奥之院後背斜面における雨量評価を行う場合、狭い範囲でのXRAIN雨量（250mメッシュ）を用いることが有用であることが示された。
- 3) 現地雨量に対する京都府、XRAIN、気象庁雨量について回帰直線、相関係数、RMSE（平均2乗誤差）の3つの精度評価指標を用いた結果、京都府雨量と比較してXRAIN雨量の精度が最も高いことが分かった。
- 4) 2013年9月に発生した清水寺境内における斜面崩壊に際しては、現地、XRAIN、気象庁とも各基準値超過時刻が類似していることから、雨量観測方法による差異は見られなかった。2015年7月に大谷本廟境内で発生した斜面崩壊時は、現地の累積雨量が他と比べ最も小さく、京都府と比較すると大雨注意報値、大雨警報値の超過時刻の差異がそれぞれ130, 170分あった。さらに、土砂災害警戒基準線超過の有無の差があったことから、現地と京都府の降雨量が基準値超過時刻の差に影響を及ぼすことが分かった。

以上のことから、レーダ雨量を用いた評価を清水寺で行う際は、250mメッシュのXRAINを用いると現地雨量に類似していることが確認できた。XRAINは数十分先の雨量予測が可能になり始めていることから、土砂災害に対する危険度予測に寄与できる。また、文化遺産の多くが山地斜面に位置することから、本論文同様に現地雨量とレーダ雨量を比較検証することで、文化遺産防災に大きく貢献できるものであると考える。

謝辞：利用したXRAINデータは、国土交通省より提供されたものである。利用したデータセットは、国家基幹技術「海洋地球観測探査システム」データ統合・解析システム（DIAS）の枠組みの下で収集・提供されたものである。

参考文献

- 1) 気象庁HP：<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/doshakeikai.html>（2016年6月2日アクセス現在）
- 2) 土屋修一，川崎将生，五道仁美：降雨減衰補正と合成雨量作成手法の改良によるXRAIN観測雨量の精度向上，土木学会論文集B1（水工学），Vol.71，No.4，pp.I_457-I_462，2015.
- 3) 国土交通省砂防部、気象庁予報部、国土交通省国土技術政策総合研究所：国土交通省砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法(案)，2005.
- 4) 京都府土砂災害警戒情報HP：<http://d-keikai.pref.kyoto.jp/Top.aspx>（2016年6月2日アクセス現在）
- 5) 有光悠紀，藤本将光，平岡伸隆，檀上徹，石田優子，深川良一：清水寺後背斜面における土層内の間隙水圧値の変動特性の把握，歴史都市防災論文集，Vol.9，pp.191-194，2015.
- 6) Ishihara, Y. and S. Kobatake: Runoff Model for Flood Forecasting, Bull.D.P.R.I., Kyoto Univ., 29, pp.27-43, 1979.
- 7) 檀上徹，藤本将光，木村亘，平岡伸隆，深川良一：2013年台風18号の豪雨に伴う清水寺境内の被害と地盤内水分変動に関する考察，歴史都市防災論文集，Vol.8，pp.115-122，2014.