

## 清水寺境内における実効雨量に基づく湧水発生条件の検討

立命館大学理工学研究科 ○疋田桜士郎 鹿島翔太 青木陽音  
立命館大学理工学部 藤本将光 永田葉子 里深好文 深川良一  
日特建設 宇次原雅之 藤田哲

### 1.はじめに

近年、日本では1時間降水量が50mm以上、または総降水量が100mm以上となる集中豪雨が増加している。今後もこの傾向は続くと考えられ、降雨特性の変化に伴い、土砂災害の発生件数が増加するリスクも高まっている。重要文化財である清水寺では、過去約100年間に6件の斜面崩壊が発生しており、2013年の豪雨で発生した斜面崩壊では、崩壊面からの湧水の発生が確認されている。そのため、斜面崩壊の発生を予測するためには、湧水の挙動を把握することが重要であると考えられる。そこで本研究では、雨量データおよび湧水の画像データを用いて、湧水の発生条件を明らかにすることを目的とする。

### 2.研究方法

#### 2.1 湧水の観測

湧水の観測は、計5地点（地点1、2-0、2-1、2-2、2-3）で行った。各観測地点の位置を図2-1に示す。これらの観測地点はいずれもリニアメント西側に位置しており、湧水が多く、平常時には流水がみられないものの降雨時には一時的に溪流が形成される。また、降雨量の増大に伴い、溪流の始点は下流側から上流側へと移動する特徴を有しており、降雨に伴う湧水発生を把握する観測地点として選定した<sup>1)</sup>。計測期間は2025年6月17日から2025年11月10日で、タイムラプスカメラにより10分間隔で湧水地点の撮影を行った。

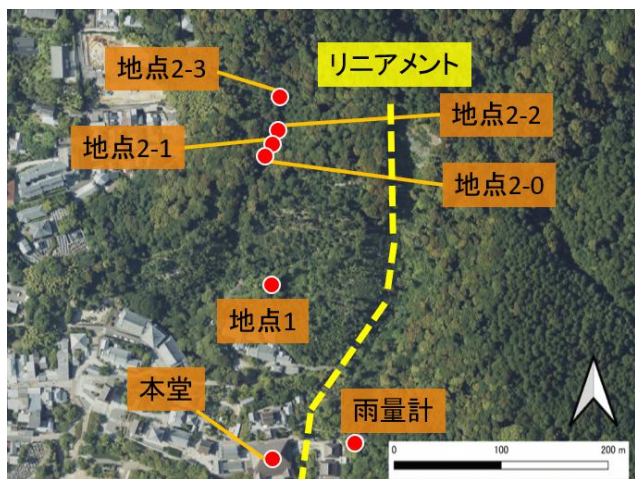


図 2-1 観測地点の位置図

(国土地理院撮影(2022年)の空中写真に追記)

#### 2.2 湧水発生の判定条件

湧水発生・非発生の判定については、撮影された画像を目視で確認することで、発生・非発生の2区分に分類した。湧水発生時は、図2-2では赤丸で示した箇所にお

いて新たに黒色の部分が確認される。この黒色部分の出現をもって湧水の発生とし、黒色部分が最大になった時点を湧水のピークと定義した。本研究では観測期間内に湧水の発生が明確に確認できたのは地点2-1のみであるため、以降の解析は地点2-1に限定して行う。



図 2-2 湧水発生ピーク

#### 2.3 分析方法

先行降雨の影響を考慮する指標として半減期を導入した実効雨量を用いる。実効雨量 $R_h$ の算出に用いた式を式(1)および式(2)に示す。ここで $R_h$ は時刻 $h$ における実効雨量(mm)、 $R_i$ は時刻 $h$ から $i$ 時間前の時間雨量(mm)、 $T$ は半減期(時間)、 $\alpha_i$ は $i$ 時間前の低減係数である。

$$R_h = \sum_{i=0}^n R_i \cdot \alpha_i \quad (1)$$

$$\alpha_i = 0.5^{(i/T)} \quad (2)$$

降雨イベント時の短期間の影響から数日程度にわたる長期的な影響までを幅広く評価するため、半減期を1.5時間から168時間まで10段階で設定を行った。それぞれの半減期で算出した実効雨量と湧水発生との対応関係を比較することで、清水寺境内の斜面において湧水発生を最も適切に説明できる実効雨量を検討する。

### 3.結果と考察

#### 3.1 解析対象降雨イベントとその概要

降雨と湧水発生の関係を把握するため、連続雨量データを基に降雨イベントを定義し、イベントごとに区分して解析を行った。降雨イベントは、降雨の前後に12時間以上の無降雨期間が継続した降雨区間を1イベントとして定義した。その結果、8つの降雨イベントにおいて湧水の発生が確認された。このうち、湧水発生までの積算雨量が最も少なかったイベントは19.4mm(イベント2)であった。以上を踏まえ、本研究では総雨量が19.4mm以上の降雨イベントを解析対象とした。なお、

当該期間においてこの条件を満たす降雨イベントは 11 イベント確認できた。しかし、2025 年 8 月 8 日のイベントでは湧水のデータが収集できなかったため、それを除く 10 イベントを研究対象とする。対象降雨イベントの概要をそれぞれ表 3-1 に示す。

表 3-1 解析対象イベント概要

降雨イベント	降雨期間	総雨量 (mm)	最大1時間雨量 (mm)	最大10分間雨量 (mm)	湧水発生までの積算雨量 (mm)
1	2025/6/23-6/25	53.8	11.2	4.6	29.0
2	2025/7/16-7/17	107.8	20.8	4.6	19.4
3	2025/8/10-8/12	75.8	12.2	2.8	29.2
4	2025/9/4-9/5	62.6	11.4	5.2	42.0
5	2025/9/11	22.0	6.0	2.5	20.0
6	2025/10/3-10/4	41.5	6.0	2.5	25.5
7	2025/10/14-10/15	38.0	25.4	11.4	35.8
8	2025/10/31-11/1	30.2	8.0	3.6	-----
9	2025/10/31-11/1	42.4	8.6	2.2	28.2
10	2025/11/9	29.2	6.0	2.2	-----

### 3.2 湧水発生・非発生に対する最適な実効雨量の半減期の検討

実効雨量に用いた半減期が湧水発生をどの程度適切に捉えているかを比較するため、適中率を用いて評価を行った。適中率( $P_n$ )は、実効雨量が閾値を超えたイベント数( $C_h$ )に対し、実際に湧水が発生したイベント数( $C_0$ )の割合と定義し、式(3)で算出する。

$$\text{適中率 } P_n(\%) = \frac{C_h}{C_0} \times 100 \quad (3)$$

本研究において、閾値は湧水が発生した 8 イベントのうち、湧水発生時の実効雨量が最も小さかった値とする。算出した各半減期 (1.5、6、12、24、48、60、72、96、168 時間) における適中率を表 3-2 に示す。これらの結果から、半減期 48 時間において適中率が最も高く、湧水発生を最も適切に捉えていることわかる。半減期 48 時間の際に、湧水発生イベントにおける実効雨量の閾値は 26.1mm であった。雨量が 26.1mm を超えるような降雨イベントで、湧水が発生する可能性が高いと考えられる。

表 3-2 実効雨量に用いた半減期における適中率

半減期(時間)	1.5	6	12	24	36	48	60	72	96	168
適中率	50%	62%	73%	67%	67%	80%	73%	53%	67%	67%

### 3.3 半減期 48 時間における実効雨量と湧水ピークの関係

半減期 48 時間の実効雨量の妥当性を確認するため、湧水ピークと実効雨量との関係を検討する。図 3-1 に湧水ピークと実効雨量ピークに対応関係が見られなかったイベントの例を、図 3-2 に対応関係が見られたイベントの例を示す。全体としてイベント 2 を除く 7 つのイベントにおいて、図 3-2 のように、湧水ピークと実効

雨量ピークは概ね同じタイミングで生じていることが確認された。しかし、イベント 2 は他のイベントと比較して大規模かつ高強度な降雨であったため、図 3-1 に示すように湧水はピーク到達後も一定時間持続するピーク帯として現れた。そのため、実効雨量ピークと湧水ピークの時刻にずれが生じたが、実効雨量ピークはそのピーク帯の期間内に含まれていたと考えられる。

この結果から降雨特性によって一定のばらつきを示すものの、湧水発生条件として、前節で示した半減期 48 時間における実効雨量 26.1mm を閾値とすることが適切であると考えられる。

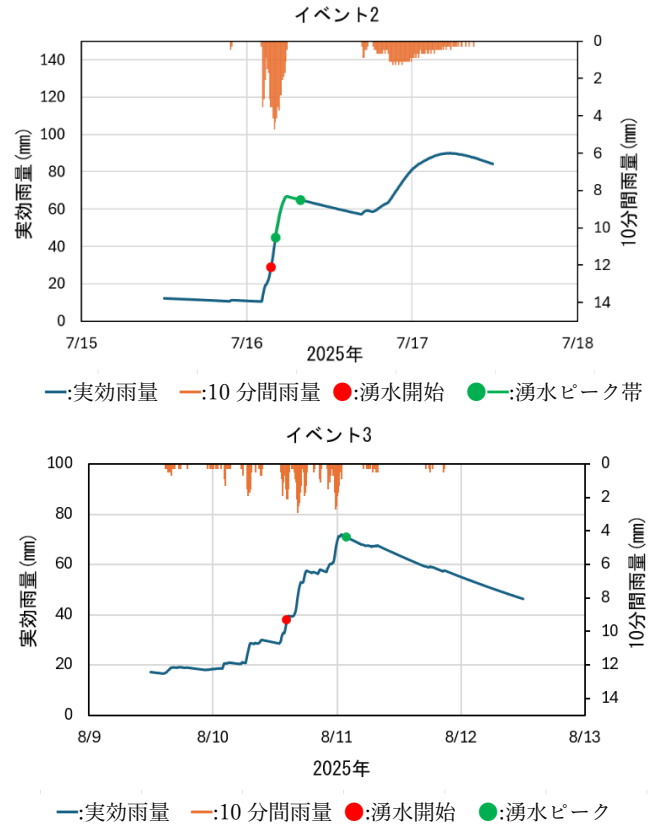


図 3-2 湧水ピークとの対応が見られたイベント例

### 4. おわりに

本研究では、清水寺境内の斜面 (地点 2-1) における湧水発生条件を明らかにするため、雨量データとタイムラプス画像による湧水観測データを用いて解析を行った。先行降雨の影響を考慮する指標として半減期を導入した実効雨量を用い、1.5~168 時間の範囲で比較した結果、半減期 48 時間において最も高い適中率が得られた。また、実効雨量ピークと湧水ピークは多くのイベントで概ね同時刻に生じ、半減期 48 時間における 1 時間実効雨量 26.1 mm を湧水発生の閾値とすることが適切であると考えられる。今後は湧水データ数の増加とともに、発生・非発生に加え湧水量の定量的評価手法を導入し、精度の向上を図る必要がある。

### 参考文献

1) 藤本将光・壇上徹・平岡伸隆・酒匂一成・深川良一：現地モニタリングを用いた斜面崩壊監視システム, EICA, 第 26 巻第 4 号, pp.45-49, 2022.