降雨に伴う斜面崩壊形状の把握に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE CHARACTERIZATION OF RAINFALL-INDUCED SLOPE FAILURE GEOMETRY

荒木 功平[1]・原田 悠名[2]・大村 拓志[3]・坪郷 浩一[4]
Kohei ARAKI, Yuna HARADA, Takushi OMURA and Koichi TSUBOGO

[1]徳山工業高等専門学校土木建築工学科（〒745-8585 周南市学園台）
E-mail: araki@tokuyama.ac.jp
[2]株式会社シーエム・エンジニアリング（〒733-0012 広島市西区中広町三丁目 25 番 15 号）
E-mail: harada-y@tec.cmeng.co.jp
[3]復建調査設計株式会社河川砂防部（〒732-0052 広島市東区光町 2-10-11）
E-mail: t-oomura@fukken.co.jp
[4]徳山工業高等専門学校機械電気工学科（〒745-8585 周南市学園台）
E-mail: tsubogou@tokuyama.ac.jp

***Key Words**: Slope Failure, Rainfall, Soil Moisture, SfM, SLAM*

1. 研究背景と目的

近年，気候変動に伴う豪雨の増加により，全国各地で斜面崩壊や土砂災害が発生している．令和 5 年の土砂災害発生件数は 1,471 件であり，長期平均を上回る状況が続いている [1)]．また，全国の土砂災害警戒区域は約 72 万箇所指定されており，山口県は 25,725 箇所と全国でも上位に位置する（2026 年 3 月 31 日時点）[2)]．このように，本研究対象地域においても斜面防災技術の高度化が求められている．これまで，降雨時の斜面崩壊機構や土砂流出に関する研究は数多く行われているが，長期観測と三次元点群計測を組み合わせて総合的に評価した事例は少ない．そこで本研究では，実験斜面を長期観測し，降雨に伴う土砂流出量，粒径分布，土中水分量と侵食・斜面崩壊の関係を分析する．さらに，法面保護マットの侵食抑制効果を検討するとともに，SLAM および SfM による三次元計測により，斜面形状と土砂流出量を定量的に評価し，その適用可能性を検討する．

2. 実験場概要

本研究では，徳山工業高等専門学校（以下，徳山高専）北側に造成した盛土による実験斜面 [3)] を観測対象とした． 実験斜面は，全レーンとも同一のまさ土を用い，斜面勾配 1:1.8，斜面長 5.4 m，法幅 6.9 m，盛土厚 0.10 m で造成した．地山は後期白亜紀の花崗岩からなる．

写真-1 および**図-1** に実験斜面の概要を示す．実験斜面は 7 レーンに区分し，本研究では裸地 2 レーン（裸地①，②）および保護マットを設置した 2 レーン（SB，SP-45）の計 4 レーンを対象とした．

写真-2 および**写真-3** に SB と SP-45 を示す．

写真-4 および**写真-5** に各レーンへ設置したプラ船および土中水分計を示す．流出土砂量および土中水分を計測した．なお，土中水分計は法尻から 1.0 m，深さ 0.10 m に設置した．粒度試験は裸地①および裸地②で実施した．

写真-6 に示す監視カメラにより斜面状況を常時観測するとともに，1 時間ごとの画像を保存した．



写真-1　盛土斜面の分割状況

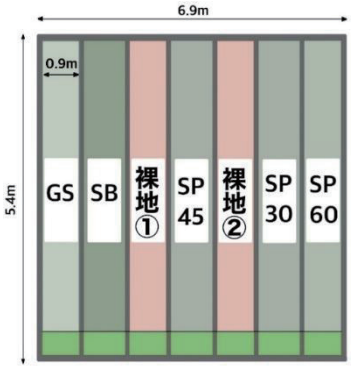


図-1　盛土斜面の各レーンの模式図

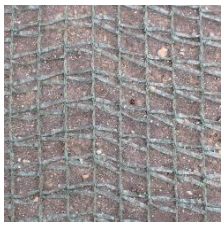


写真-2　SP-45 の拡大写真



写真-3　SB の拡大写真

3. 斜面崩壊に伴う粒径特性の変化

斜面崩壊に伴う土質特性の変化を把握するため，裸地斜面の表層土を採取し，粒度試験を実施した．長期的な影響を評価するため，崩壊前の試料には斜面形成直後（2024 年 5 月 25 日）に採取したものを用い，崩壊後の試料には斜面崩壊が確認されてから約 5 か月後（2024 年 11 月 16 日）に採取した裸地斜面の残存表層土を用いた．本評価は，降雨に伴う表層細粒分の流出による粒度変化を対象とした．

図-2 および**表-1** に粒径加積曲線，平均粒径および均等係数を示す．崩壊後の粒径加積曲線は崩壊前と比較して右側へ移動しており，平均粒径も増加していることが分かる．また，均等係数は崩壊前と比較して大きく低下している．これらの結果から，崩壊後の斜面表層は比較的大きな粒径の土粒子を主体として構成されていることが分かる．これは，降雨によって細粒分が流出し，粗粒分が斜面上に残留したためと考えられる． 先行研究[4]によれば，均等係数が小さい土は間隙比および飽和度が大きくなりやすく，安全率が低下することが報告されている．本研究においても，斜面崩壊発生後約 5 か月が経過した時点において均等係数の低下が確認された．このことから，崩壊後の斜面では土質特性の変化により，再度の降雨時に不安定化しやすい状態が継続している可能性が示唆された．



写真-4　土砂採取用プラ船



写真-5　土中水分計



写真-6　監視カメラ

4. 斜面崩壊および土砂流出の経時変化

斜面崩壊の発生状況とその後の変化を把握するため，監視カメラ画像およびプラ船で回収した流出土砂量を分析した．

(1) 監視カメラによる斜面崩壊の観察

本研究では，降雨により発生した侵食溝（リル）の形成･拡大を伴う局所的な法面崩落を「斜面崩壊」と定義した．

写真-7 に，2024 年 6 月 23 日 12 時 44 分に確認された斜面崩壊を示す．また，**写真-8** に崩壊翌日の裸地①，**写真-9** に約 5 か月後（2024 年 11 月 23 日）の裸地①を示す．

写真-8 では 3 か所の侵食箇所が確認され，**写真-9** ではその拡大が確認された．観測期間中，新たな崩壊は確認されず，既存の侵食箇所のみが拡大した．なお，SB および SP-45 では，裸地斜面でみられた侵食溝の形成や局所的な法面崩落は確認されなかった．

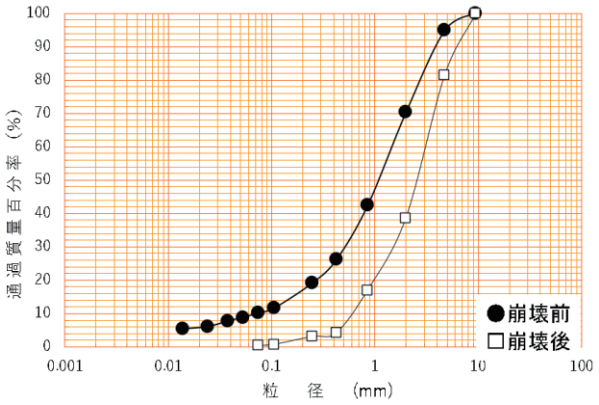


図-2　粒径加積曲線

表-1　崩壊前後の平均粒径，均等係数

	崩壊前	崩壊後
平均粒径 D_{50}(mm)	1.15	2.60
均等係数 U_c	21.57	5.17



写真-7　6 月 23 日 12:44 の斜面

(2) 回収土砂量による斜面崩壊の評価

流出土砂は 6 月 5 日以降に計 5 回回収した．回収土砂は，上澄み水および夾雑物を除去後，乾燥炉で乾燥させ，乾燥質量を測定した．

表-2 に，各回収日（6 月 23 日，7 月 3 日，7 月 17 日，9 月 4 日，10 月 9 日）を時系列順に(a)～(e)として整理した結果を示す．回収土砂量は(c)が最も多く，次いで(a)，(b)の順となった．一方，(d)および(e)の回収量は著しく少なかった．特に(d)および(e)は回収期間が長かったにもかかわらず流出土砂量が少なかった．このことから，後半の期間では顕著な侵食・斜面崩壊は発生しなかったと考えられる．

監視カメラ画像からは，6 月 23 日に確認された崩壊箇所以外で新たな崩壊は確認されなかった．しかしながら，崩壊発生後最初の回収区分である(a)よりも，その後の(b)および(c)の回収土砂量の方が多い結果となった．このことから，一度侵食・斜面崩壊が発生した箇所では，その後も土砂流出が継続しやすいことが示唆された．以上より，被害拡大を防止するためには，早期の補修・保護対策が重要と考えられる．



写真-8 裸地① 6 月 23 日　写真-9 裸地①11 月 23 日

表-2　回収土砂量（g）

区分	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
月/日	6/26	7/3	7/17	9/4	10/9
SB	70	111	446	57	51
裸地①	2,988	4,763	28,550	131	143
SP-45	5	8	20	0	0
裸地②	856	2,058	14,850	49	49

5. 降雨・土中水分と土砂流出量の関連性

回収土砂量を用いて，降雨，土中水分および土砂流出量の関係を分析した．

(1) 降雨特性

各回収区分について，前回回収日から次回回収日まで（(a)は 6 月 5 日から）の降雨データを気象庁下松観測所（AMeDAS）[5] より取得した．本研究では，土砂流出量との関係をみるため，降雨指標として最大時間降水量および時間降水量 10 mm/h 以上（「やや強い雨」[6]）の観測時間数を用いた．なお，10 mm/h 以上の回数は，時間降水量が 10 mm/h 以上を記録した時間数として集計した．

表-3 および**表-4** に，最大時間降水量および時間降水量 10 mm/h 以上の時間数を示す．**図-3** に日降水量，**図-4** に日最大時間降水量を示す．最大時間降水量は短時間の降雨強度を，時間降水量 10 mm/h 以上の観測時間数は比較的強い降雨の継続性を表す指標として整理した．これらの指標により，各回収期間における降雨特性と土砂流出量との関係を比較した．

(a)と(b) を比較すると，最大時間降水量および 10 mm/h 以上の観測時間数はいずれも(b)の方が小さいにもかかわらず，回収土砂量は(b)の方が多かった．このことから，土砂流出量は降雨強度のみでは説明できず，先行降雨や地盤内の水分状態の影響が示唆された．

表-3　最大時間降水量（mm）

(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
6/5~6/25	6/26~7/2	7/3~7/16	7/17~9/3	9/4~10/9
16	12.5	48	23	10.5

表-4　10 mm/h 以上の時間数

(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
6/5~6/25	6/26~7/2	7/3~7/16	7/17~9/3	9/4~10/9
6	1	2	3	1

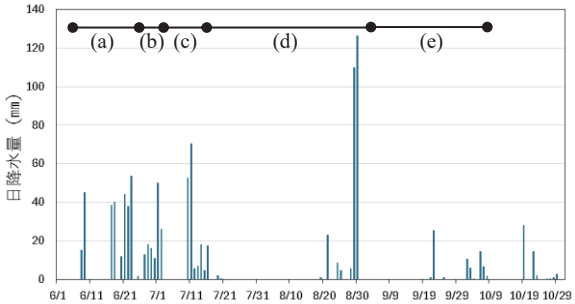


図-3　6/1～10/31 の日降水量

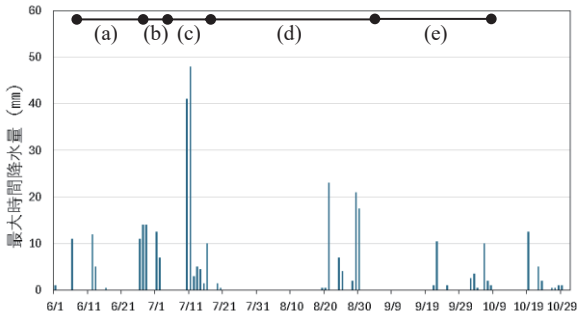


図-4　6/1～10/31 の日ごとの最大時間降水量

(2) 土中水分の変動特性

図-5 に裸地①における 2024 年 6 月 1 日から 10 月 31 日までの日ごとの体積含水率を示す．

表-5 に各区分における平均体積含水率を示す．

図-3 および**図-5** を比較すると，体積含水率は平常時には概ね 10%前後で推移し，降雨時には 15%を超えた．また，降雨後は降雨がなければ概ね 6 日で元の水準まで低下したが，断続的な降雨時には高い状態が維持される傾向がみられた．

体積含水率の最大値は概ね 20%程度であり，降雨量や降雨強度が大きく異なる場合でも著しい上昇は確認されなかった．例えば，7 月 1～2 日の 2 日間積算降水量は 76 mm，7 月 10～11 日は 123 mm，さらに 8 月には 2 日間で 236.5 mm の降雨が観測されたが，体積含水率の最大値に大きな差はみられなかった．一方，大雨後は体積含水率が平常時まで低下する時間が長くなる傾向が確認された．このことから，降雨量の増加は体積含水率の最大値よりも，高含水状態の継続時間に影響を及ぼす可能性が示唆された．

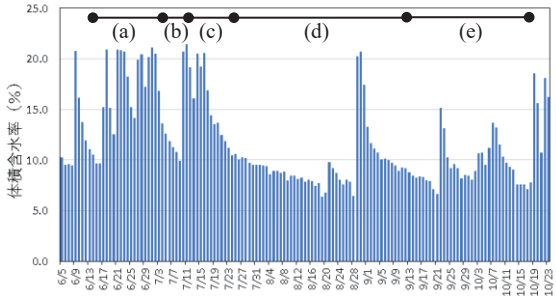


図-5　6/1～10/31 の日ごとの体積含水率（%）

表-5　平均土中水分（%）

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
	6/5~6/25	6/26~7/2	7/3~7/16	7/17~9/3	9/4~10/9
SB	19.8	23.8	21.4	17.2	16.6
裸地①	12.3	16.9	14.1	9.3	8.6
SP-45	13.4	17.5	14.8	8.5	8.2
裸地②	10.3	14.9	12.2	6.0	5.8

a) 土砂流出量と体積含水率の関係

体積含水率が 15%を連続して超えた最大継続日数は，(a)～(e)でそれぞれ 5 日，6 日，7 日，3 日，0 日となった．これを長い順に並べると(c)，(b)，(a)，(d)，(e)となり，回収土砂量の大小関係と概ね一致した．また，最大時間降水量よりも 15%以上の体積含水率が継続した期間との対応が良好であった．

このことから，土砂流出量は降雨だけでなく，地盤が高含水状態に保たれていた期間と関連する可能性が示唆された．ただし，本研究では相関関係を示したものであり，流出機構や実効雨量・土壌雨量指数との比較は今後の課題である．

b) 裸地と保護マット設置レーンの比較

裸地①と裸地②では，同じ裸地条件であるにもかかわらず回収土砂量に差がみられた．表-5 より，裸地②は裸地①と比較して平均体積含水率が低いことから，土中水分量の違いが土砂流出量の差に影響した可能性が考えられる．

一方，保護マットを設置したレーンでは裸地よりも体積含水率が高い傾向が確認された．その要因として，マットによる保水効果や蒸発抑制効果が考えられる．しかし，流出土砂量は裸地より著しく少なかった．このことから，法面保護マットは地盤内の水分を保持する一方で，降雨エネルギーを緩和し，表面侵食を抑制する効果を有することが示唆された．なお，本研究では地下への浸透特性は計測していないため，保護マットが浸透挙動に及ぼす影響については今後の検討課題である．

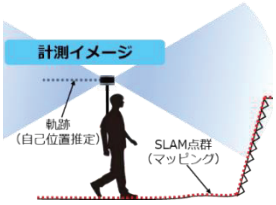


図-6 SLAM の計測イメージ



写真-10 Stencil の外形

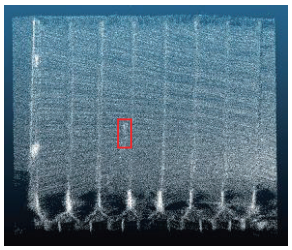


図-7(a) SLAM の点群（8 月）

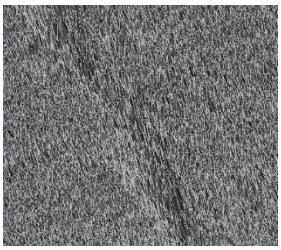


図-7(b) 侵食部の拡大図

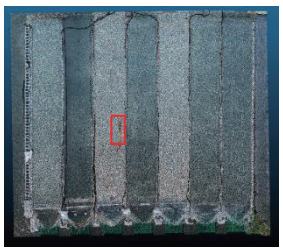


図-8(a) SfM の点群（8 月）

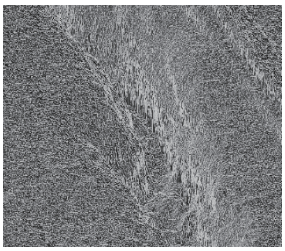


図-8(b) 侵食部の拡大図

6. 点群データを用いた斜面崩壊形状の把握

本研究では，斜面崩壊形状を把握するため，SLAM および SfM による三次元点群計測を実施した．計測は崩壊前（2024 年 6 月 4 日）および崩壊後（2024 年 8 月 21 日）に行った．SfM では 314 dpi の画像 233 枚を用い，対象斜面を 360° から撮影し，隣接画像のオーバーラップ率を 60%以上確保した．

図-6 に SLAM の計測イメージ，写真-10 に計測機器を示す．図-7(a)，(b)に SLAM，図-8(a)，(b)に SfM による点群データとサーフェス化結果を示す．

図-8(a)より，SfM は色情報（RGB）を保持していることが分かる．色情報を保持することで，侵食箇所や地表面の変状を視覚的に把握しやすい特徴を有する．一方，SLAM は短時間で広範囲の計測が可能であり，災害発生直後の状況把握に適している．図-7(b)と図-8(b)を比較すると，SfM は SLAM よりも地表面の凹凸や侵食形状を詳細に表現できており，斜面崩壊形状の把握に有効であることが確認された．なお，本研究では SLAM は斜面全体の状況把握に用い，崩壊土砂量の算出には SfM データを用いた．

(1) サーフェス差分による崩壊土砂量の算出

表-6 に，2024 年 6 月および 8 月に取得した SfM サーフェスデータの差分から算出した体積変化量

表-6 サーフェスにより算出した体積変化量

	SB	裸地①	SP-45	裸地②
体積（cm^3）	1,461	42,539	3,807	12,898

表-7 SfM による推定土砂量，回収土砂量および回収率

	SB	裸地①	SP-45	裸地②
推定土砂量（g）	2,259	65,765	5,886	19,940
回収土砂量（g）	735	36,575	33	17,812
回収率（%）	33	55	1	89

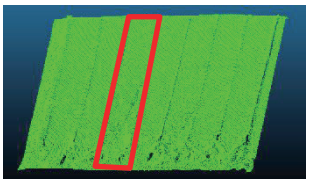


図-9（a） 縦断面（8 月）

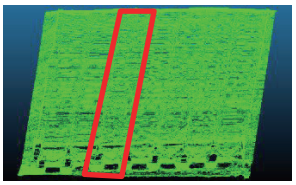


図-9（b） 横断面（8 月）

（切土量）を示す．裸地①および裸地②では大きな体積変化が確認され，降雨による侵食・崩壊が進行したことが分かる．

表-7 に，体積変化量から算出した推定土砂量，回収土砂量および回収率を示す．乾燥密度には，斜面崩壊後に採取した試料から求めた 1.546 Mg/m^3 を用いた．推定崩壊土砂量は回収土砂量より大きく，微細土砂の流出やプラ船で回収できなかった土砂が含まれているためと考えられる．また，裸地①の回収率は 55%であり，裸地②の 89%より低かったことから，一部の土砂が隣接レーンへ移動した可能性が示唆された．以上より，SfM を用いた三次元計測により，回収土砂量だけでは把握が困難な侵食・土砂移動状況を定量的に評価できることが確認された．

$$M=\rho_d V \tag{1}$$

ここに，M：質量（Mg），
V：体積（m^3），
ρ_d：乾燥密度（Mg/m^3）

(2) 断面図による崩壊形状の評価

図-9 に，裸地①の縦断面位置および横断面位置と，各断面図を示す．

表-8 に，裸地①の各断面における侵食断面積を示す．なお，断面位置は図-9 に示すとおりであり，断面 66 は侵食断面積が最大となった断面である．

図-10 に，最大断面積を示した断面 66 における 2024 年 6 月と 8 月の断面を重ね合わせた結果を示す．断面 66 では最大鉛直変位 13.07 cm，局所的に 0.10 m を超える侵食・崩壊が確認され，断面図により侵食・崩壊位置および規模を定量的に把握できることを確認した．

表-8　裸地①の各断面における侵食断面積（㎡）

断面番号	断面積	断面番号	断面積	断面番号	断面積	断面番号	断面積
1	0.0459	21	0.0699	41	0.0323	61	0.078
2	0.0444	22	0.0625	42	0.0391	62	0.0883
3	0.0462	23	0.068	43	0.0353	63	0.0898
4	0.0498	24	0.0648	44	0.0326	64	0.1009
5	0.0515	25	0.0521	45	0.0305	65	0.0914
6	0.0463	26	0.0607	46	0.0355	66	0.1092
7	0.0516	27	0.0522	47	0.0274	67	0.1019
8	0.0469	28	0.0536	48	0.0337	68	0.0981
9	0.0516	29	0.0421	49	0.0266	69	0.1047
10	0.0538	30	0.0469	50	0.0277	70	0.084
11	0.0625	31	0.0439	51	0.0398	71	0.0882
12	0.0655	32	0.0413	52	0.0436	72	0.0883
13	0.0694	33	0.0416	53	0.0483	73	0.0612
14	0.0622	34	0.0253	54	0.0595	74	0.0404
15	0.0501	35	0.0443	55	0.057	75	0.0319
16	0.0564	36	0.0436	56	0.06	76	0.0353
17	0.0632	37	0.043	57	0.0726	合計	4.2629
18	0.0561	38	0.0328	58	0.0721		
19	0.0639	39	0.0332	59	0.0734		
20	0.0652	40	0.0326	60	0.0674		

7. まとめと今後の課題

本研究では，徳山高専北側に造成した盛土による実験斜面を対象として，降雨に伴う斜面崩壊および侵食現象の把握を行った．その結果，降雨により細粒分が流出して均等係数が低下すること，高含水状態の継続が土砂流出量に影響する可能性があること，および法面保護マットの侵食抑制効果を確認した．また，SfM による三次元計測により，崩壊土砂量や侵食深さを定量的に把握できることを示した．これらの結果は，斜面の侵食・崩壊状況を定量的に把握し，補修対策の検討や効果検証を行う上で有用な知見となることが期待される．

今後は，降雨量，土中水分および土砂流出量の観測を継続し，それらの関係の定量化と斜面崩壊予測への適用を検討する．また，三次元計測を継続し，斜面崩壊形状の経時変化を把握するとともに，法面保護工の長期的な効果について検討する予定である．

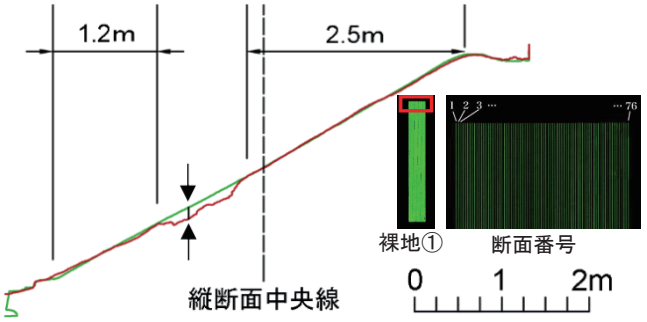


図-10　断面 66 の比較断面図（2024 年 6 月・8 月）

謝辞：本研究は復建調査設計株式会社との共同研究として実施した．中村建設株式会社には観測カメラをご提供いただいた．また，多機能フィルター株式会社には実験斜面の造成ならびに土中水分および流出土砂に関するデータをご提供いただいた．ここに記して深甚なる謝意を表する．

参考文献

1) 国土交通省：報道発表資料，https://www.mlit.go.jp/report/press/sabo02_hh_000143.html（閲覧 2026 年 7 月 12 日）
2) 国土交通省：全国における土砂災害警戒区域等の指定状況，https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/content/001982570.pdf（閲覧 2026 年 7 月 12 日）
3) 瀬戸口 慧，志賀 弘征，田原 雄一郎，河野 伸之，坪郷 浩一，荒木 功平，福田 靖，桑嶋 啓治，片山 光亮，上 俊二：不織布フィルター敷設斜面における斜面上部~下部にかけての土中水分量の観測手法の検討・構築，ジオシンセティクス論文集 39，pp.41-51，2024.
4) 浅田穂乃果：パイピング現象を考慮した新たな斜面崩壊予知手法に関する研究，令和 5 年度徳山工業高等専門学校特別研究論文集，2023.
5) 気象庁：過去の気象データ検索，国土交通省，https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/index.php（閲覧 2024 年 12 月 30 日）
6) 気象庁：雨の強さと降り方，国土交通省，https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/yougo_hp/amehyo.html（閲覧 2024 年 10 月 17 日）

（2026. 5. 29　受付）