

〈特集〉

現地モニタリングを用いた斜面崩壊監視システム

藤本 将光¹⁾, 檀上 徹²⁾, 平岡 伸隆³⁾
酒匂 一成⁴⁾, 深川 良一⁵⁾

¹⁾立命館大学 理工学部 環境都市工学科
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1 E-mail:m-fuji@fc.ritsumei.ac.jp)

²⁾(国研)防災科学技術研究所
(〒305-0006 つくば市天王台3-1 E-mail:t.danjo@bosai.go.jp)

³⁾(独)労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所
(〒204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6 E-mail:hiraoka@s.jniosh.johas.go.jp)

⁴⁾鹿児島大学 学術研究院 理工学域工学系
(〒890-0065 鹿児島市郡元1-21-40 E-mail:sako@oce.kagoshima-u.ac.jp)

⁵⁾立命館大学 理工学部
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1 E-mail:fukagawa@se.ritsumei.ac.jp)

概要

土砂災害の危険度の評価や予測には、気象情報だけでなく地盤内の水分状態を計測することが重要となる。高密度・高精度の地形データを用いた地形解析と現地水文調査を組み合わせることで斜面崩壊の潜在的な危険性を評価することができる。また、斜面において、雨量、間隙水圧を計測し、斜面崩壊の危険度を監視するシステムを運用することは土砂災害の軽減につながる。本稿では、清水寺周辺における土砂災害の危険性評価および斜面モニタリングを用いた斜面監視システムの運用事例を紹介する。

キーワード：斜面崩壊, 現地モニタリング, 間隙水圧, 降雨浸透, 監視システム

原稿受付 2022.1.11

EICA: 26(4) 45-49

1. はじめに

近年、豪雨の多発化、激化によって土砂災害のリスクの増加が懸念されている。豪雨に起因する斜面崩壊や土石流は道路や住宅地域などにおいて多大な被害を発生させる。豪雨時における土砂災害の危険度評価には、タンクモデルをベースとした土壤雨量指数やスネークカーブなどが用いられることが多い。スネークカーブを用いる場合、短時間の雨量の強さおよび長期的影響を考慮した降雨指標をグラフの縦軸・横軸にプロットし、降り始めからの降雨状況をもとに危険度を判断する。また、土砂災害に関わる大雨警報（土砂災害）や土砂災害警戒情報等は雨量や土壤雨量指数を判断基準としている。しかし、斜面は多種多様な地形、地質、地盤構造を有しており、雨量情報のみでは斜面崩壊などの土砂災害を発生させる主要因となる地盤内の水分状態を把握し、斜面安定性・斜面崩壊危険度を評価・予測することが困難である。そのため、豪雨時における斜面崩壊危険度を評価するためには、雨量情報に加えて、地盤内の水分状態や変形挙動を計測する現地モニタリングによって斜面の状況を把握することが望ましい。

京都盆地東縁に位置する清水寺では、過去に土砂災害を経験している。そこで、清水寺周辺において広域の地下水流動特性を把握し、斜面崩壊の潜在的な危険性の評価を行った。また、土砂災害が発生する可能性が高い斜面として判定された重要文化財後背斜面において、現地モニタリングによる斜面崩壊の危険度を評価し、監視を行うシステムを構築した。本稿では、清水寺周辺における土砂災害の評価や予測に関する取り組みを紹介する。

2. 清水寺における土砂災害と斜面崩壊の発生の危険性評価

2.1 清水寺周辺における土砂災害

京都は周囲を山地に囲まれた盆地であり、盆地周縁部に立地する寺社仏閣は土砂災害を受けるリスクが潜在的に高いと言える。世界遺産である清水寺は近年には境内斜面において土砂災害が発生している。1972年7月には釈迦堂の後背斜面の崩壊によって釈迦堂が全壊、1999年6月には音羽の滝横の茶店が斜面崩壊によって全壊、2013年8月には大小合わせて5か所で斜面崩壊が発生した¹⁾。Fig. 1は2013年に発生した



Fig. 1 2013年の8月における音羽の滝横の斜面崩壊の様子（発生から1日後）

音羽の滝南側の斜面崩壊の現場の様子である。1999年に崩壊した斜面の横の斜面が崩れ、崩壊土砂は茶店の屋根に到達した。また、2021年8月の豪雨において、名勝成就院庭園内の湯屋谷の斜面や音羽川沿いの斜面において複数の斜面表層崩壊が発生した。

2.2 清水寺周辺の地下水流動と斜面崩壊の危険性評価

斜面崩壊発生危険性の評価には、主として素因である地形や地質等に支配される発生場の特徴と崩壊発生の誘因となる地下水流動等の水文的要因を把握する必要がある。地形情報に関しては、近年の航空計測技術の進展により、微地形も含めた詳細な表面地形の把握が可能となった。また、崩壊の発生に関与する地下水の流動は湧水位置および湧水の電気伝導度の空間分布特性を用いて把握する方法²⁾が提示され、簡便な調査による実態把握の可能性が報告されている。そこで、高精度・高密度の地形データを用いた地形解析と湧水の空間分布特性調査に基づく水文情報を得ることで清水寺周辺の斜面崩壊の潜在的危険度を評価した。

地形解析では航空レーザ測量によって得られた1mの数値地形モデル（DEM）（中日本航空株式会社提供）を用いて微地形図を作成した。微地形図には視覚的に立体的な地形判読が可能である立体図法³⁾を用いて、CS（Curvature and Slope）立体図を作成した。CS立体図は、標高データから傾斜と曲率を計算し、異なる色調で彩色し重ねて透過処理することにより作製される。CS立体図と地質図を用いて表層崩壊跡地、浸食箇所、湧水地等の地形判読を行った後、湧水調査を行った。湧水の電気伝導度の計測は電気伝導度計（HORIBA社、ES-51）を用いて現地において行った。

清水寺周辺におけるCS立体図に土砂災害の発生位置、湧水の位置と電気伝導度の調査結果を重ねたものをFig. 2に示す。図中の数値は、湧水量が一定量あり、電気伝導度の計測が可能であった地点の湧水の電気伝導度を示す。電気伝導度の単位は $\mu\text{S}/\text{cm}$ である。清水寺本堂東側に位置するリニアメントを境に谷の開

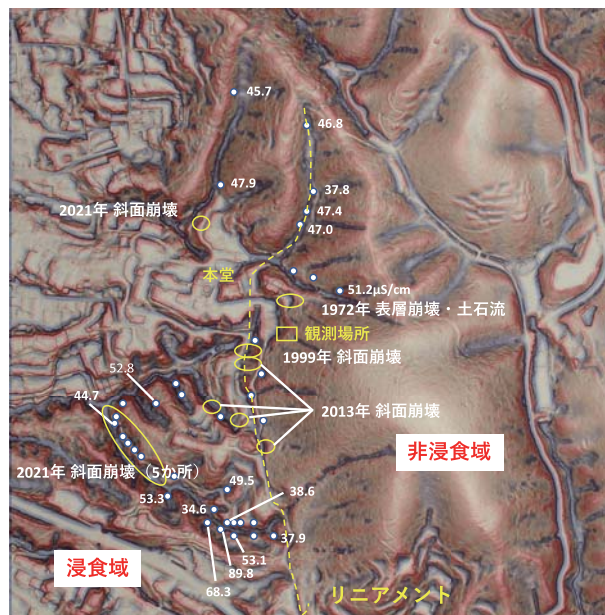


Fig. 2 清水寺周辺のCS立体図、斜面崩壊の発生位置および湧水の位置（参考文献4）に加筆）

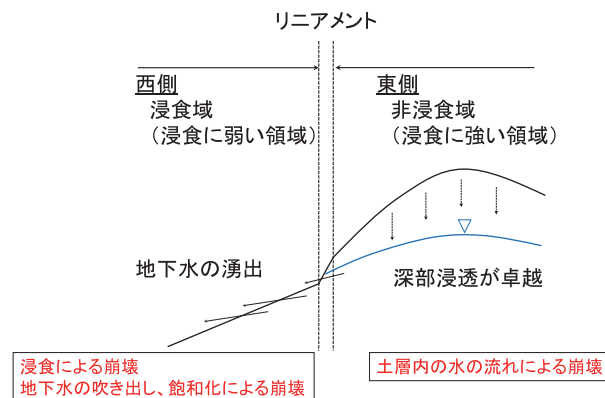


Fig. 3 清水寺周辺の地下水流動と斜面崩壊タイプの模式図

析状況が大きく異なることが明確になった。これはリニアメント東側が砂岩、頁岩、チャートからなる丹波層群であるのに対し、西側は新生代第三紀末から第四紀更新世の大阪層群から構成されていることに起因している。リニアメント東側では深部にまで地下水が浸透し、西側のシルト、砂礫から構成されるエリアまで流動し、湧出すると考えられる（Fig. 3）。リニアメント西側は湧水が多く、湧水による浸食崩壊が卓越している。また、近年の崩壊がリニアメント周辺で発生していることは東側の非浸食域（浸食抵抗が強いエリア）で深部浸透した地下水が豪雨時に稀に地質境界であるリニアメント周辺で湧出することで引き起こされると考えられる。このように詳細な地形データと現地調査を組み合わせることで潜在的な土砂災害の危険度を評価できる可能性が示され、今後の土砂災害の予測への活用が期待される。

3. 現地モニタリングを用いた斜面監視システム

3.1 現地モニタリングシステムの概要

現地モニタリング対象斜面は重要文化財である奥ノ院の後背斜面を選定した。基岩は砂岩、頁岩、チャートからなる丹波層群で構成され、表土は崩積土で覆われている。Fig. 2に示す観測場所において雨量、地盤内の間隙水圧、地温の計測を行った。間隙水圧を計測するテンシオメータの計測は2004年から開始し⁵⁻⁷⁾、2012年に計測点を増設し、現在は調査対象斜面上に14観測場を設定した⁸⁾ (Fig. 4)。テンシオメータはセラミック製のポーラスカップを土中に埋設し、パイプを介して圧力計をつなぎ、内部を脱気水で満たしたものである。セラミック製のポーラスカップ部分で、土中の間隙水圧とテンシオメータ内の脱気水の圧力が平衡することで、圧力センサによって間隙水圧を計測する仕組みである。地温は熱電対を用いて計測した。また、簡易動的コーン貫入試験の結果から土壌強度特性を把握するとともに基岩面までの土層深さを決定した。決定した土層深さを基準とし、鉛直方向に各点で2~6深度において計測点を設定し、テンシオメータを計51基設置し、計測地点M地点でデータ集約を

Table 1 間隙水圧と地温の計測深度

地点	深度 (cm)	地点	深度 (cm)
A	40, 80, 100	P3	30, 80
B	40, 80, 100, 200, 260	P4	30, 60, 100
C	40, 80, 100, 230	P5	30, 60, 100, 200
D	40, 80, 100	P6	30, 60, 100, 200, 280
M	20, 40, 80, 100, 190	P7	30, 60, 100
P1	30, 65	P8	30, 60, 100, 200
P2	30, 60, 100, 200	P9	30, 60, 110

行った。テンシオメータおよび地温の計測深度はTable 1に示す。データ収集には、ロガー (Campbell社, CR1000) を1台と計測チャンネルの増幅器であるマルチプレクサー (Campbell社, AM16/32B) を3台用いた。計測システムの概要をFig. 5に示す。

本観測では収集した雨量、間隙水圧、地温のデータは無線通信を介してインターネット上でリアルタイムで確認できるシステムを構築した。インターネットへの通信はモバイルカードを用いている。このシステムによって大学関係者と清水寺関係者の両者はリアルタイムでデータを確認することができる。また、計測された雨量データから雨量指標を逐次解析し、設定した警戒基準を超えた場合に警戒メールが配信される仕組みとなっている。警戒基準に関してFig. 6に大規模降雨イベントにおける連続雨量と1時間雨量の関係を

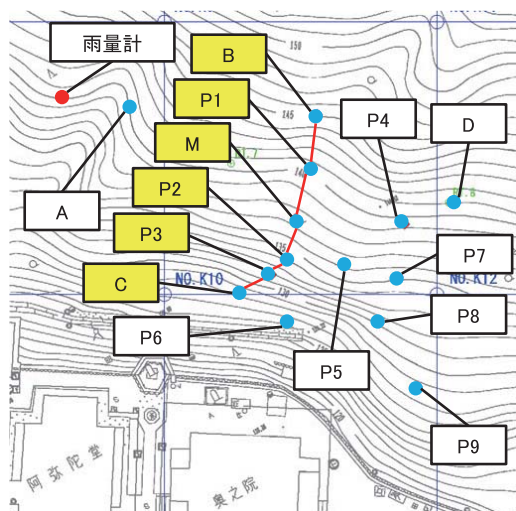


Fig. 4 奥ノ院後背斜面における計測点位置図

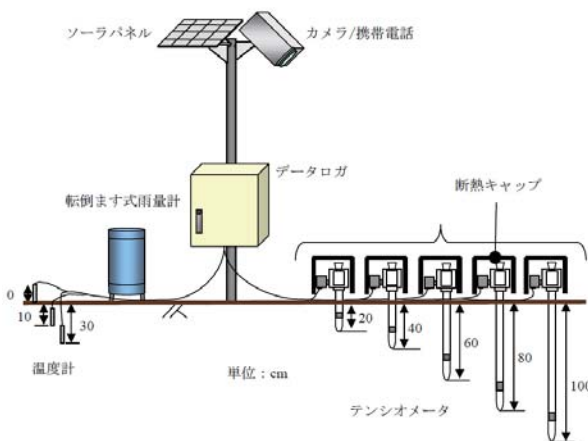


Fig. 5 計測システムの概要⁴⁾

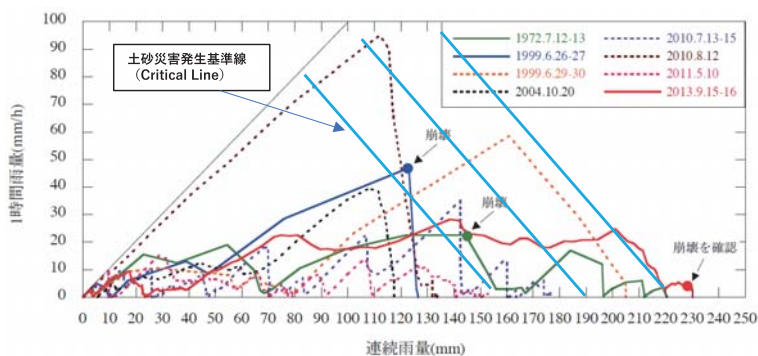


Fig. 6 大規模降雨イベントにおける連続雨量と1時間雨量の関係 (参考文献1) を改変)

示す。**Fig. 6**で示した雨量指標以外（土壌雨量指数、24時間半減期実行雨量、72時間半減期実行雨量）についても、計測結果をフィードバックさせて土砂災害の発生基準線（Critical Line）の設定を常時再検討している。このシステムを用いて、豪雨時に文化財や観光客に被害が及ばないように速やかに対応できる体制を整えている。

3.2 降雨浸透特性と斜面崩壊の発生危険度評価

間隙水圧の計測結果の一例を**Fig. 7**に示す。本研究では、間隙水圧値が0 cmH₂Oを超えると計測点が飽和したと定義した。間隙水圧が正圧（正の値）の場合、計測点付近は飽和し、地下水位が発生し、その値は地下水位に相当すると解釈できる。また、負圧（負の値）の場合、計測点は不飽和であり、値が小さいほど乾燥状態であることを意味している。**Fig. 7**の結果から、降雨時に間隙水圧は素早く応答し、正圧になり、地下水位が発生する傾向が認められた。また、降雨後には地下水帯が消失し、乾燥状態に移行するが計測深度が深いほど、湿潤状態が維持されることが示された。

上記の結果の基づき、**Fig. 4**中のB-C側線の内のB、M、P2、C地点の基盤境界面の計測深度を分析対象として、降雨の特徴の違いによる間隙水圧変動の特性を把握した。降雨イベントは無降雨状態が12時間継続した場合、異なるイベントとして扱った。2014年に観測された総雨量が10 mm以上の17イベントを分析対象とした。**Fig. 8**に各降雨イベントにおけるB、M、P2、C地点の間隙水圧の変動特性を示す。降雨開始から間隙水圧が最大値に至るまでの累積雨量（**Fig.**

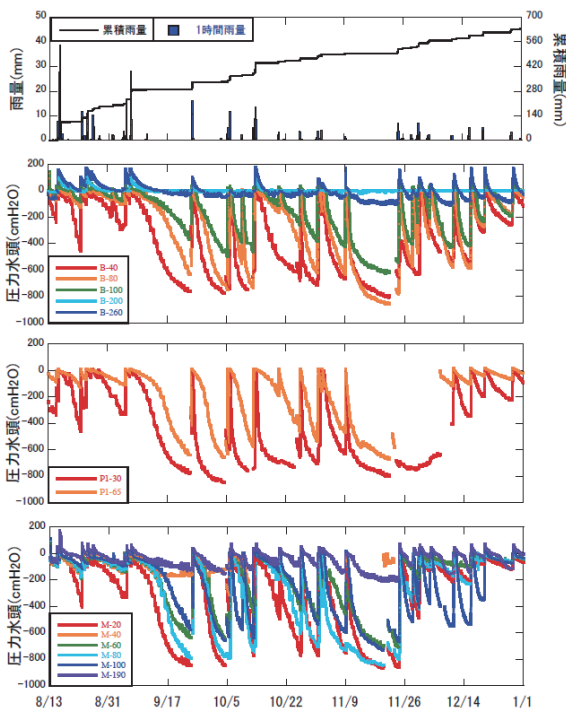


Fig. 7 間隙水圧の計測結果の一例

8 a), 降雨開始時の間隙水圧値が正圧に到達するまでの累積雨量（**Fig. 8 b)**, 間隙水圧値が正圧に到達してから最大値を計測するまでの雨量（**Fig. 8 c)**を示した。

計測地点ごとに間隙水圧の変動傾向に差がみられるが、降雨開始後の累積雨量が20 mm程度を超えると間隙水圧は最大値に達し、その後大きく変化しない傾向を示した（**Fig. 8 a)**。この間隙水圧の結果を降雨開始前の乾湿状態から土層が飽和に至るまでの累積雨量、飽和に至った後から間隙水圧が最大値となるまでの累積雨量との関係から考察した。P2地点の土層-基岩境界面は降雨前において非常に乾燥した状態であることが示された（**Fig. 8 b)**。M地点はP2地点ほどではないものの同様に乾燥状態を示した。しかし、非常に降雨前の状態が乾燥しているにもかかわらず、約10

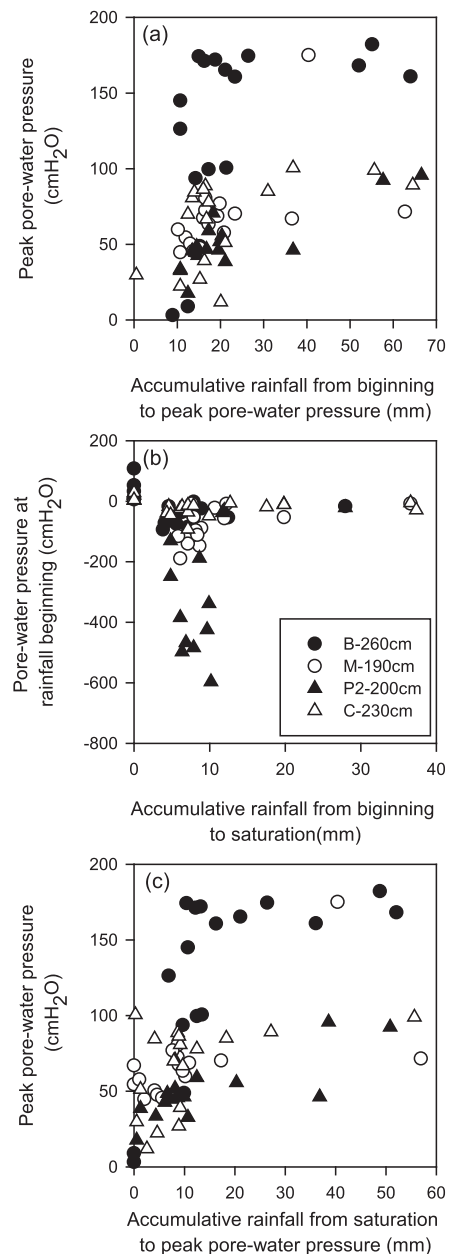


Fig. 8 間隙水圧の変動と累積雨量の関係（参考文献8）を改変

mm程度の累積雨量で飽和状態に至ることが明らかになった。飽和に至った後、累積降雨量が増加した場合において間隙水圧値が大きく上昇しないことが結果として得られた (Fig. 8c)。B地点はやや上昇傾向を示すが、それ以外の地点を合わせて見ても、計測点が飽和に至った後、わずかな累加降雨量で間隙水圧値がピークに至り、その値は頭打ちになる傾向を示した。

これらの結果から、奥ノ院後背斜面では土層内において非常に素早い水の移動によって地下水帯が形成されることが認められる。これは土層が主として砂岩やチャートが風化した礫で構成されており、礫間の空隙を水が素早く移動することに起因していることが考えられる。また、地下水帯の発生後に地下水位の上昇を抑制する要因が存在することが示唆された。地下水帯が形成され、水位が上昇する過程において、地下水が側方斜面下方向に素早く流動した可能性が考えられる。あるいは地下水は鉛直下方向（基岩方向）に流動した可能性があり、複雑な地下水流動現象を今後明らかにする必要がある。

間隙水圧の変動傾向は計測地点ごとに異なり、飽和後も累加降雨量の増加とともに間隙水圧値（地下水位）が上昇する地点（P2-200）が認められた。地下水位は斜面崩壊の発生と密接に関係しており、既往の降雨で到達した地下水位のレベルを超える降雨規模となった場合には、斜面崩壊が発生する可能性が高くなると考えられる。そのため、P2-200のように降雨に伴って地下水位の上昇がみられる計測点で水分状態をモニタリングすることは斜面崩壊の予測につながると期待される。また、檀上⁹⁾は既往の降雨指標との比較から、間隙水圧の計測地点で最初に地下水帯が形成されてからの継続時間とその間の平均強度の関係をを用いることで斜面崩壊の崩壊と非発生の関係を明確に分類することを示した。以上のように、斜面の水分状態をリアルタイムで計測することが斜面崩壊の危険性を的確に判断する材料となり得ることが明らかになった。

4. おわりに

土砂災害が多発する中、斜面崩壊を的確に予測し対策を講じることは急務である。急傾斜地崩壊危険箇所等は日本全国で33万箇所を超えること（平成15年の国土交通省の調査結果）が報告された。しかしながら、対策にかかる経済的コストや時間的コストの点で、こうした危険性の高い斜面において現実的に早急に対策を実施すること困難である。そのため、危険性が高い

と判断された斜面において対策に代わる手段として、斜面の状態をモニタリングし、危険性を評価することが望ましい。本稿で紹介した斜面監視システムが多くの場所で運用され、土砂災害の被害の軽減や防止の一助となるよう、システムの低コスト化や高度化に今後取り組んでいきたい。

謝辞

本研究を行うに当たり、清水寺法務部長森孝忍氏、執事補大西皓久氏、サンアクト小島玉緒氏、京都府教育長指導部文化財保全課の方々にご指導・ご支援いただいた。中日本航空(株)岩浪英二様には地形データの取得にご協力いただいた。また、本稿で示した成果は立命館大学理工学部都市システム工学科ジオメカニクス研究室に所属した歴代学生の多大なる努力の結果の一部です。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 檀上 徹, 藤本将光, 木村 亘, 平岡伸隆, 深川良一 (2014), 台風18号に伴う清水寺境内の被害と後背斜面の地盤水分変動及び挙動に関する一考察, 歴史都市防災論文集, 8, 115-122
- 地頭蘭隆, 下川悦郎, 寺本行芳 (2006), 深層崩壊発生場予測法の提案—鹿児島県出水市矢筈岳山体を例にして—, 砂防学会誌, 59, 2, 5-12
- 戸田堅一郎 (2014), 曲率と傾斜による立体図法 (CS立体図) を用いた地形判読, 森林立地, 56, 2, 75-79
- 藤本将光, 戸田堅一郎, 有光悠紀, 里深好文, 深川良一 (2016), 京都市東山地域における斜面崩壊の潜在的危険度評価, 歴史都市防災論文集, 10, 55-58
- 酒匂一成, 深川良一, 岩崎賢一, 里見知昭, 安川郁夫 (2006), 降雨時の斜面防災防止のための重要文化財周辺斜面における現地モニタリング, 地盤工学ジャーナル, 1, 3, 57-69
- 里見知昭, 酒匂一成, 安川郁夫, 深川良一 (2007), 京都市東山山麓周辺における現地計測データを用いた斜面安定度評価に関する研究, 歴史都市防災論文集, 1, 175-182
- 深川良一, 酒匂一成, 里見知昭, 石田優子, 仲矢順子, 安川郁夫 (2008), 降雨時斜面災害防止のための重要文化財周辺斜面における現地多点モニタリング, 歴史都市防災論文集, 2, 99-104
- Fujimoto M., Arimitsu Y., Hiraoka N., Danjo T., Kimura T., Ishida Y., and Fukagawa R. (2015), Characteristics of groundwater movement at a hillslope above Kiyomizu-dera Temple, an important cultural asset, Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2, 77, 2643-2647
- 檀上 徹, 酒匂一成, 藤本将光, 石澤友浩, 伊藤真一, 深川良一 (2021), テンシオメータの計測結果を加味した雨量指標による計測斜面での斜面崩壊予測精度向上に関する検討, 77, 1, 87-102