

清水寺周辺溪流における土石流氾濫解析

Numerical analysis of debris flow at Kiyomizu dera temple area

縄手洋介¹・梶山敦司²・藤本将光³・里深好文⁴

Yosuke Nawate, Atsushi Kajiyama, Masamitsu Fujimoto and Yoshifumi Satofuka

¹立命館大学 理工学研究科環境都市専攻 (〒525-8577滋賀県草津市野路東1-1-1)

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

²株式会社建設技術研究所 (〒541-0045大阪市中央区道修町1-6-7)

CTI Engineering Co.,Ltd

³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

⁴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

In recent years, there have been numerous episodes of torrential rains, which have led to a high risk of flood disasters in various parts of Japan, including sites of important cultural assets. Our research site, the area around Kiyomizu-dera Temple, has been damaged by floods and mass movements several times during the past two decades. To evaluate the risk of flood disaster in the area, we performed a two-dimensional numerical simulation of the debris flow using Hyper KANAKO software based on a 1-m mesh size Digital Elevation Model (DEM), and compared the output to previous results obtained from a 10-m mesh size DEM. Our results show a detailed sediment disaster risk, including the flood pathway for a heavy rainfall event in the downstream residential area around Kiyomizu-dera Temple.

Keywords : flood disaster, numerical simulation, debris flow, Hyper KANAKO, Kiyomizu-dera temple

1. はじめに

近年、短時間に大雨が降る集中豪雨が多発しており、土砂災害が発生する危険性が高まっている。土砂災害による被害は人的被害だけでなく、観光資源である有名な重要文化財に及ぶ場合がある。近年の文化財の被災状況としては2011年台風12号による熊野那智大社での土石流災害、2013年台風18号による清水寺付近の斜面崩壊などが挙げられる。熊野那智大社では、背面妙法山で土石流が発生し社殿が埋まる被害が発生した。清水寺では、この41年間で3回斜面崩壊が発生している。1972年7月には斜面崩壊で釈迦堂が全壊、1999年6月には音羽の滝付近で斜面崩壊、2013年9月には台風18号によって清水寺境内斜面において5ヶ所の斜面崩壊が発生した¹⁾。また、清水寺周辺地域は京都府により土石流による被害の恐れがある地域²⁾に指定されている。そのため近年多発している短時間集中豪雨によって、今後も重要文化財周辺では土砂災害が起これらと考えられる。重要文化財を有する観光地が被災した場合には、観光客は避難場所の確保が難しく、災害被害が拡大する恐れもある。

本研究では世界遺産に登録され、京都有数の観光地である清水寺周辺地域を対象として、近年多発する集中豪雨が発生した場合にどの程度の被害が発生するのか推定した。これまで、速水ら³⁾は10mメッシュの地形データを用いて清水寺地域における集中豪雨時の土石流氾濫解析を行い、被害範囲を検討した。本研究では、速水ら³⁾の先行研究より詳細な1mメッシュの地形データを用いて氾濫範囲の検討を行った。また、10m

メッシュでは地形が表現されず解析できなかった溪流も対象とし、より精度の高い氾濫範囲を推定することで今後の防災に役立てる情報を得ることを目的とした。

2. 対象地域の概要

(1) 対象地域の位置

清水寺は京都府京都市東山区清水にある寺院であり、境内には国宝、重要文化財を含む15の伽藍が建ちならんでいる。古都京都の文化財としてユネスコ世界遺産に登録されており、観光名所として毎年多くの観光客が参拝に訪れている。本研究では、清水寺本堂の北側に存在する溪流と溪流の下流部に存在する地域を対象とした(図1)。対象溪流をそれぞれ流域A、流域Bとし、流域Aのサブ流域をそれぞれA1、A2、流域Bのサブ流域をそれぞれB1、B2とした。流域A、流域Bの流域面積は、それぞれ0.03km²、0.05 km²である。

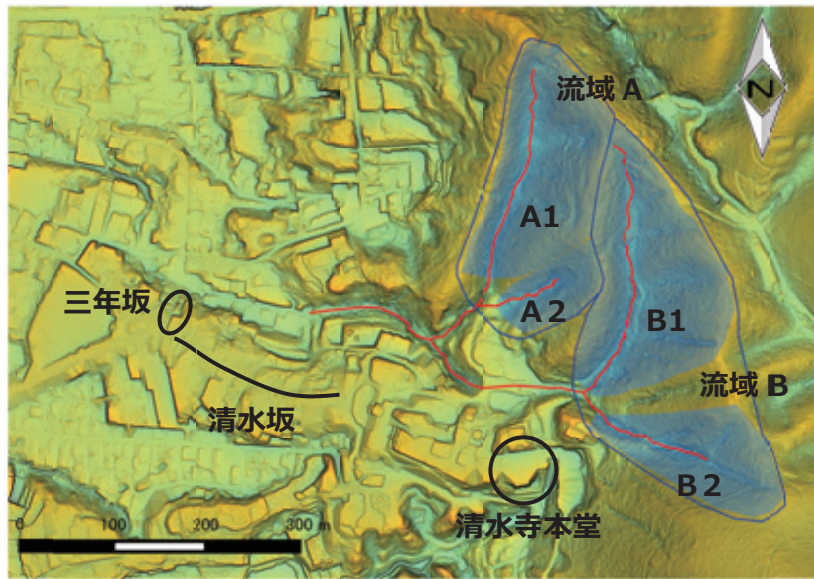


図1 清水寺対象地域(起伏量図に加筆)

(2) 対象地域の地質

図2に対象地の地質分布を示す。対象地域の基盤地質は、京都東南部地域の地質⁴⁾によると中生代中期ジュラ紀-最前期白亜紀の付加帯である丹波帯からなる。対象となる溪流では、Ic：層状チャート、Im：泥岩、及び泥岩優勢砂岩泥岩互層、Ia：砂岩優勢砂岩泥岩互層、Is：塊状-厚層理砂岩、Ix：泥質混在岩が分布する。図2の四角枠は図1の範囲を示す。

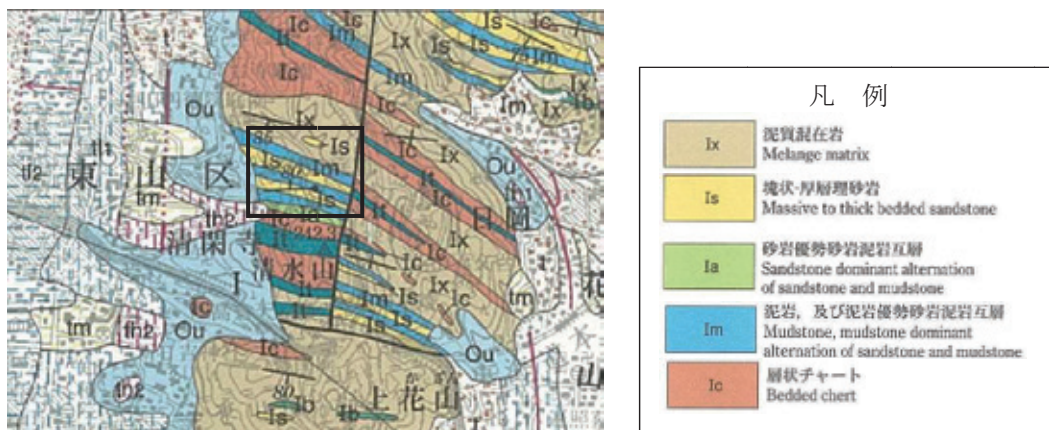


図2 対象地域の地質図(脇田ほか：2013より引用, 縮尺1:10,000)

3. 3次元地形データ(LP)による流出解析

(1) 土石流氾濫解析方法

解析は土石流数値シミュレーションシステムHyperKANAKO⁵⁾を用いて行った。HyperKANAKOは、DEM (Digital Elevation Model) 等の詳細な地形データを利用することで従来よりも正確なシミュレーションを行うことができる。また、GISとシミュレーション計算プログラムを連携させることによって計算結果等に地理的な情報を付加させ、より利用しやすい情報提供可能なシステムである。

(2) 地形情報

地形データは清水寺周辺の1mメッシュの数値標高モデル (DEM) を用いた。近年、航空レーザ測量の技術が大幅に改良され詳細な地形情報を得ることが可能となってきたので、今回はこの方法によって得られたデータを用いることとした。樹木や建物の影響を除去したレーザ測量による地形情報を用いることで、より正確な解析を行なえる。

(3) 解析氾濫範囲

HyperKANAKOでは一次元領域、二次元領域を設定する必要がある。一次元領域においては最低河床線を設定し、二次元領域としては、矩形の領域を設定した。本研究では、流域Aと流域Bの2箇所の流域を対象としており、図3および図4に設定した解析範囲を示す。

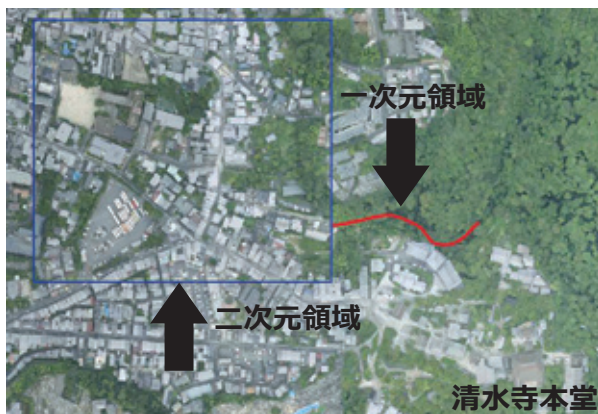


図3 流域Aの氾濫解析範囲 (オルソ画像に加筆)

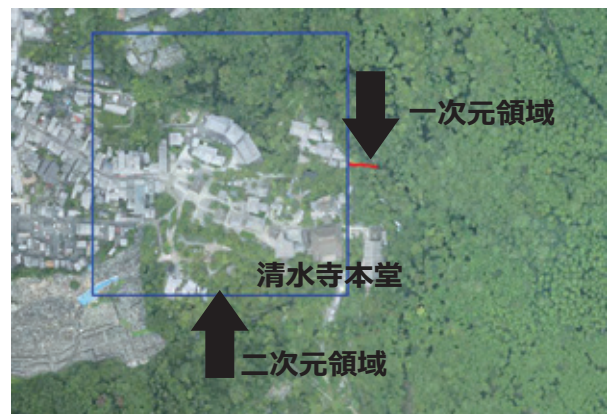


図4 流域Bの氾濫解析範囲 (オルソ画像に加筆)

(4) 解析条件

本研究では、降雨強度が異なる3つのケースについて計算を行った。ケース1は京都市のアメダス観測点で計測された最大1時間雨量88.0 mm/hrを設定した。ケース2は日本で記録した最大1時間雨量153.0 mm/hrを設定した。ケース3は近年、局地的集中豪雨が全国で多発していることを考慮し、対象地域が属している近畿地方で近年発生した未曾有の豪雨から独立行政法人土木研究所確率降雨解析の「フェア式」⁶⁾を利用して算出した京都市での確率降雨量132.8 mm/hrを設定した。

ピーク流量は合理式を用いて算出した。なお流出係数は山地流域であるため0.7と設定した。

$$\text{合理式} \quad Q = \frac{1}{3.6} \cdot f \cdot r \cdot A \quad (1)$$

ここで、 Q : 流量 (m^3/s)、 f : 流出係数 (=0.7)、 r : 降雨強度 (mm/h)、 A : 流域面積 (km^2) である。式(1)で求めたピーク流量は降雨流出による流量のピーク値であるため、土砂を含む土石流のピーク流量はより大きな値となると考えられる。そこで、式(2)を用いて土石流ピーク流量に変換した。

$$Q_{sp} = \frac{C_*}{C_* - C_d} \cdot Q_p \quad (2)$$

ここで、 Q_{sp} ：土石流ピーク流量（ m^3/s ）、 Q_p ：計画規模の年超過確率の降雨量に対する清水寺流域の対象流量（ m^3/s ）、 C_d ：土石流濃度、 C_* ：溪床堆積土砂の容積濃度（=0.65）である。

$$C_d = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (3)$$

ここで、 σ ：礫の密度（=2,650 kg/m^3 ）、 ρ ：水の密度（=1,000 kg/m^3 ）、 ϕ ：溪床堆積土砂の内部摩擦（=37°）、 θ ：溪床勾配である。

これらを対象溪流にあてはめたところ、 C_d が0.30未満となったため、通常の解析において用いられている方法に従って $C_d=0.30$ として土石流ピーク流量を求めた。また、ピーク流量および土石流ピーク流量はサブ流域単位で計算し、それぞれの計算結果を足し合わせることで最終的な結果を算出した。表1にピーク流量および土石流ピーク流量の算出結果を示す。

表1 3ケースにおけるピーク流量と土石流ピーク流量

流域	ケース	ピーク流量(m^3/s)	土石流ピーク流量(m^3/s)
A	1	0.55	1.02
	2	0.95	1.77
	3	0.83	1.53
B	1	0.79	1.47
	2	1.38	2.56
	3	1.19	2.22

ハイドログラフは、算出した土石流ピーク流量を用いて山型の線形モデルを作成した。その際、土石流流動継続時間を1200秒とし、土石流ピーク流量は600秒に表れることとした。この土石流流動継続時間については、明確な根拠があるわけではないが、既往研究では数分～数十分とされていることが多く、対象溪流が小規模であることを考慮して1200秒と仮定した。このハイドログラフの長さについては、今後詳細な検討が必要であると考えている。図5に作成した土石流ハイドログラフを示し、表2にHyper KANAKOの解析に使用した各パラメータを示す。

一次元領域においては、計算点間隔を5m、河道幅を10mとして解析を行った。また、現地調査の結果から、一次元領域内は溪流に露岩が確認されたこと、二次元領域内は市街地に位置することから移動可能土砂を見込まないこととした。

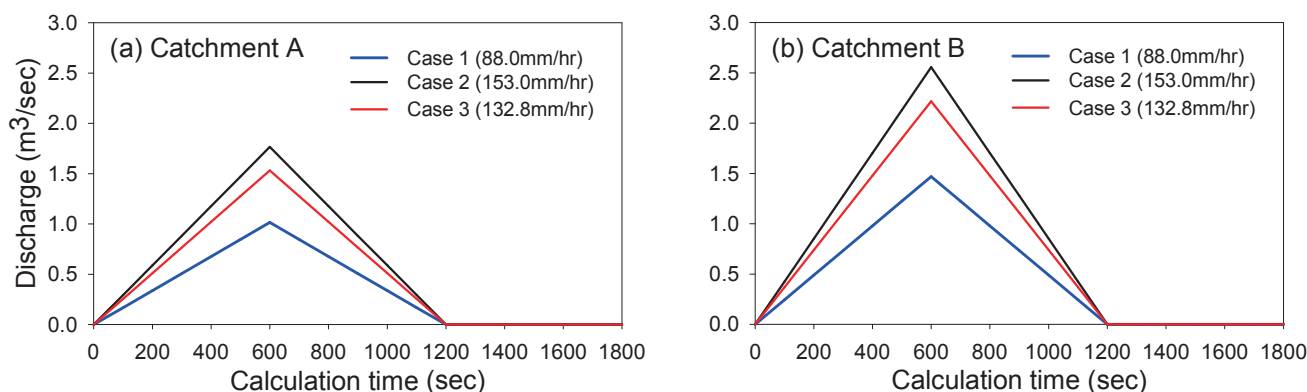


図5 土石流ハイドログラフ（左図：流域A、右図：流域B）

表 2 解析パラメータ

項目	値
計算時間(秒)	1800
計算の時間間隔(秒)	0.01
砂礫の密度 σ (kg/m ³)	2650
水の密度 ρ (kg/m ³)	1000
重力加速度(m/s ²)	9.8
水深の最小値(m)	0.01
河床の容積濃度	0.65
マンニングの粗度係数	0.03
侵食速度係数	0.0007
堆積速度係数	0.05
堆積速度における慣性力を考慮した時の係数	0.9
土砂の粒径(m)	0.2
砂の内部摩擦角(度)	37
2次元のx計算点間隔(m)	1
2次元のy計算点間隔(m)	1
2次元計算における流動の閾水深(m)	0.01
2次元平面の不安定土砂厚(m)	0
側岸侵食速度係数	1
側岸勾配(度)	37

4. 解析結果と考察

図 6 に流域Aにおける解析結果、図 7 に流域Bにおける解析結果を示す。ここでは、流域Aと流域Bを分けて解析を行う。

ケース 1 (1 時間雨量 88.0mm/hr)



ケース 2 (1 時間雨量 153.0mm/hr)



ケース 3 (1 時間雨量 132.8mm/hr)

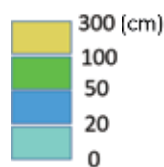
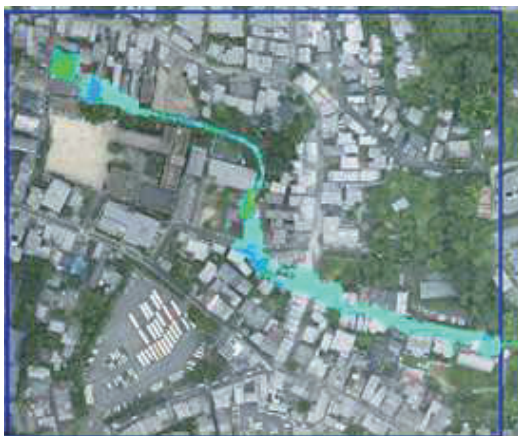


図 6 流域Aにおける解析結果 (水位の最大値)

ケース 1 (1 時間雨量 88.0mm/hr)



ケース 2 (1 時間雨量 153.0mm/hr)



ケース 3 (1 時間雨量 132.8mm/hr)



図 7 流域Bにおける解析結果 (左図 : 水位の最大値、右図 : 堆積厚、凡例は図 6 と同一)

(1) 流域Aにおける土石流氾濫

流域Aにおける氾濫解析では流出経路はすべてのケースにおいて同様の結果となった(図6)。水位の最大値は、土石流のピーク流量が大きいケースほど下流部で高くなっており、画像中央部では、土石流が民家の間を流下し、水位の最大値が100cmを超える個所も見られた。また、人通りの多い三年坂を降りた一帯は土石流の流路となり、ケース2およびケース3では一部水位が地表面から50cmの高さまで高くなる個所が見られた。急激な雨が短時間に降った際には観光客は避難を完了することが難しく、水位が50cmを超えている状態での避難も困難であるので、この一帯は危険な地域であると考えられる。また、三年坂を降りた一帯は、景観に配慮した数多くの伝統的建築があり、重要伝統的建造物群保存地区に指定されている。本研究で用いた地形データは建物の影響を除去したものであるため、実際には水位50cmを超える高さで文化財に影響を与えることが推定される。土石流による土砂の堆積厚に関しては、いずれのケースにおいても流入点付近にのみ20cm程度堆積するという結果となった。土砂が流入点付近にのみ堆積する理由として、氾濫地域の勾配が比較的緩やかであったことが考えられる。以上から、流域Aでは水位の上昇により文化財に被害を与える危険性があるが土砂の堆積により被害が発生する危険性は低いと推定される。

(2) 流域Bにおける土石流氾濫

流域Bにおける氾濫解析では流出経路はすべてのケースにおいて同様の結果となった(図7)。水位の最大値は、土石流のピーク流量が大きいケースほど流入点付近では高くなっており、ケース2およびケース3では100cmを超える個所が見られた。また、いずれのケースも人通りの多い清水坂には流出しないという結果となった。また、すべてのケースで下流部付近で土石流の水位が100cmを超える個所が見られた。この高水位箇所は、深い谷地形であり流域Aにおける氾濫解析の際に氾濫の危険性が低い地域として一次元解析を行った範囲であった。流域Bの土石流が流域Aの氾濫範囲に流入していることから流域Aの被害範囲は拡大するため、より精度の高い解析を行うためには流域Aと流域Bを同時に解析する必要があると考えられる。土石流による土砂の堆積厚に関しては、土石流のピーク流量が大きいケースほど土砂が堆積する量や範囲が大きくなった。最も流量が多いケース2では流入点付近で100cm~300cm堆積する個所が見られた。そのため、短時間集中豪雨時には流入点付近は水位も堆積厚に関しても危険な地域であり、清水寺へのメインの通りである清水坂は比較的 안전한地域であると推定される。

また、流域Bによる氾濫地域は、速水ら³⁾により10mメッシュによる解析が行われている。速水ら³⁾の解析では降雨量の条件は153mm/hrで本研究のケース2と同様であるが、溪流B2を10mメッシュでは地形が表現できなかったことから溪流B1のみの氾濫を対象としていた。解析結果は土石流の堆積厚は大きいところでも30cm程度であり、清水寺境内に被害を与える可能性が低いとされていた。しかし、1mメッシュを用いた本研究では堆積厚は大きいところでは100cm~300cmを超える個所があり、土石流が堆積する範囲も10mメッシュで解析を行った場合よりも広がっていた。したがって、氾濫解析において詳細な地形データを利用するメリットとして、粗いメッシュでは地形が表現できなかった小さな溪流を考慮した精度の良い解析を行えること、詳細な氾濫範囲および氾濫経路を示すことができることが挙げられる。このことから、メッシュの細かい詳細な地形データを利用することが氾濫解析による被害推定に有用であると考えられる。

5. 結論

本研究では、清水寺周辺の溪流について、アメダスの降雨データから算出した土石流ピーク流量を元にHyperKANAKOによる土石流氾濫シミュレーションを行った。解析結果から、人通りの多い三年坂を降りた一帯は土石流の流路となり、土石流の水位も高くなるため危険な地域であることが示された。同時に、清水寺へ向かうメインの通りである清水坂は比較的 안전한地域であると推定された。また、本研究では流域Aによる氾濫と流域Bによる氾濫を別々に解析を行ったが、同じ場所を土石流が流下している個所があったため、同時に解析を行う必要性が認められた。先行研究との比較では、細かいメッシュの地形図を利用した方が詳細な氾濫範囲を示すことができることが示された。

謝辞：本研究の実行にあたり、中日本航空株式会社岩浪英二様には地形データの提供に尽力頂きました。ここに記して、深謝致します。

参考文献

- 1) 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重要文化財後背斜面の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
- 2) 京都府建設交通部砂防課：土砂災害警戒個所点検マップ, 2004.
- 3) 速水智・大塚亮介・里深好文：清水寺地域における集中豪雨時の土石流氾濫解析, 歴史都市防災論文集, Vol.7, pp.67-72, 2013
- 4) 脇田浩二・竹内圭史・水野清秀・小松原 琢・中野聡志・竹村恵二・田口雄作：京都東南部地域の地質, 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 産総研地質調査総合センター, p.124, 2013
- 5) 堀内成郎・岩浪英二・中谷加奈・里深好文・水山高久：LPデータを活用した土石流シミュレーションシステム「Hyper KANAKO」の開発, 砂防学会誌, Vol.64, pp.25-31, 2011
- 6) 独立行政法人土木研究所：確率降雨解析プログラム利用の手引き, 2002