

隣接溪流から連続して発生する 土石流の影響範囲

STUDY ON INFLUENCE AREA WHEN DEBRIS FLOWS OCCUR
CONTINUOUSLY FROM ADJACENT TORRENT

中谷加奈¹・柳崎 剛²・長井 斎²・里深好文³・藤田正治⁴・水山高久⁵
Kana NAKATANI, Go YANAGISAKI, Hitoshi NAGAI, Yoshifumi SATOFUKA,
Masaharu FUJITA and Takahisa MIZUYAMA

¹ 京都大学大学院農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

E-mail: kana2151@kais.kyoto-u.ac.jp

² 株式会社建設技術研究所 (〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪 1047-27)

³ 立命館大学理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

⁴ 京都大学防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

⁵ 政策研究大学院大学 (〒106-0032 東京都港区六本木 7-22-1)

Key Words: debris flow, continuously, adjacent torrent, numerical simulation, model experiment

1. はじめに

土石流の被害軽減を検討するには、影響範囲（土石流の水・土砂が到達する範囲）を精確に把握する必要がある。通常、地方自治体が警戒区域を設定する際、勾配や過去の災害履歴や現地調査を基に各溪流を個別に検討する¹⁾。日本には十数万の土石流危険溪流が存在し、危険溪流が隣接する地域も多い。近年、局所的に発生する土石流を引き起こすような豪雨では隣接溪流からほぼ同時刻に連続的に土石流が多発する事態が想定され、2014年8月に発生した広島²⁾や兵庫県丹波市の土砂災害³⁾でも確認された。一方、既往検討で土石流の影響範囲を検討する際、隣接する溪流や同時多発（ここで、完全に同時では無く近い時間で連続的の意味）は考慮されず、単独の溪流からの土石流を想定して相互影響は無視することが殆どである。隣接溪流から連続して発生する場合に一波目による堆積等の地形変化が、二波目の氾濫・堆積範囲を変える事態も推測されるが、定量的な検討は殆ど実施されていない。

本研究では、数値シミュレーション及び実験で、

隣接溪流から連続的に土石流が発生した場合の影響範囲や堆積状況の違いを検討した。

2. 数値シミュレーションによる検討

数値シミュレーションには、高橋モデル⁴⁾及び山地溪流の一次元領域から扇状地の二次元領域を統合的に解析する結合モデル⁵⁾を採用した Hyper KANAKO システム⁶⁾を用いた。

(1) 計算条件

計算対象は、京都府亀岡市千歳町に存在する土石流危険溪流の中で隣接する二つの溪流（A、B）とした。図-1に一次元領域、二次元領域、京都府の指定した区域図から地図上に設定した土石流の警戒区域⁷⁾を合わせて示す。警戒区域は通常、単独シナリオで設定されることから、隣接溪流からの連続シナリオの影響によって範囲に差が生じないかを確認するために示している。通常は各溪流で設定する二次元領域を、二溪流からの氾濫・堆積が確認できるよう広範囲に設定した。対象地域は、溪流Bの南にも土

石流危険渓流が存在するが、本検討では隣接して警戒区域が重なる部分の多い渓流を対象とした。渓流 A, B は 1 次元領域の下流端（谷出口）が約 200m 離れた位置で、その下流の警戒区域は渓流 A では約 4 割、渓流 B では約 5 割程度重なる。渓流 A, B は谷出口付近に砂防堰堤が設置されているが堰堤は考慮しない。渓流の相対標高を図-2 に示す。

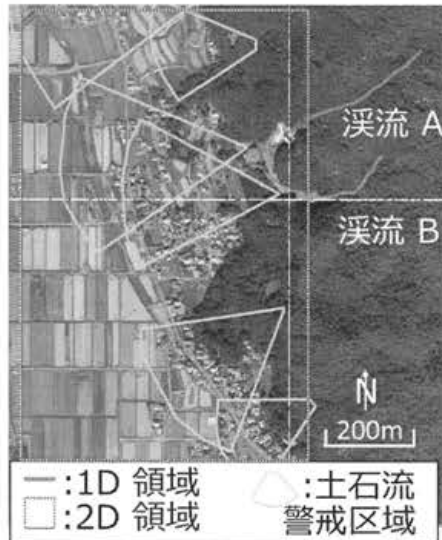


図-1 京都府亀岡市千歳町の計算対象領域（背景図は京都府より提供されたオルソ画像）。

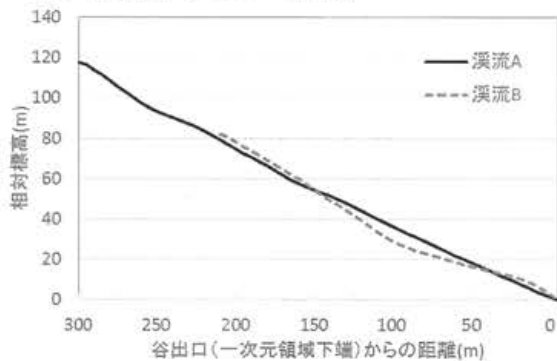


図-2 渓流 A, B の一次元領域の縦断面図。

地形データは国土地理院が公開する 10m メッシュを利用した。既往検討から、数値シミュレーションによる土石流の影響範囲の検討は家屋を考慮する手法が効果的と示されたことから⁸⁾、家屋を地盤高さから二階建て相当の 6m 上げる方法を採用した。家屋位置は国土地理院の基盤地図情報を参照した。

土砂は、2012 年の亀岡市南条の土石流事例を参考に⁹⁾、代表粒径を 10 cm、一次元領域の移動可能土砂厚を 2m 均一で設定した。一次元領域の河道幅は一律 10m とした。設定した渓流 A, B での移動可能土砂量（空隙込）は 6100m³, 4300m³ である。

図-3 に示した供給ハイドログラフは、100 年確率

時間雨量（88.9 mm/hr）と流域面積（A:0.1km², B:0.07km²）から推定⁹⁾した。上流端からは水のみを供給して、侵食により土石流が発生・発達するシナリオを想定した。

計算に用いたパラメータを表-1 に示し、計算ケースを表-2 に示す。渓流 A, B から単独で土石流が発生する Case1, 2 と B が発生した後に A が起こる Case3, A が発生した後に B が起こる Case4 である。連続シナリオの Case3, 4 では、一波目の土石流計算終了後の地形を二波目の計算での入力条件の地形として設定した。

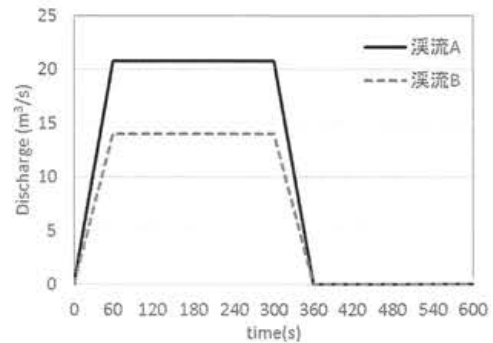


図-3 上流端から設定した供給ハイドログラフ。

表-1 数値計算に用いた各パラメータ。

パラメータ	数値
計算時間(秒)	600
計算の時間間隔(秒)	0.01
粒径(cm)	10
砂礫の密度(kg/m ³)	2650
流体相の密度(kg/m ³)	1000
河床の容積濃度	0.6
重力加速度(m/s ²)	9.8
侵食速度係数	0.0007
堆積速度係数	0.05
マニングの粗度係数(s/m ^{1/3})	0.03
一次元領域の計算点個数	A:61, B:43
一次元領域の計算点間隔 (m)	5
二次元領域の計算点個数 (流下方向×横断方向)	132×204
二次元領域の計算点間隔 (m×m)	5×5

表-2 計算ケース。

Case	1 番目に発生	2 番目に発生
1	A	-
2	B	-
3	B	A
4	A	B

(2) 計算結果

計算終了時の二次元領域の痕跡（水深+堆積厚の最大値）を図-4（単位 cm）に示す。連続シナリオの結果は、二波目のみを示す。いずれの結果も二次元領域の上流の流入部で大きな痕跡を示し、警戒区域

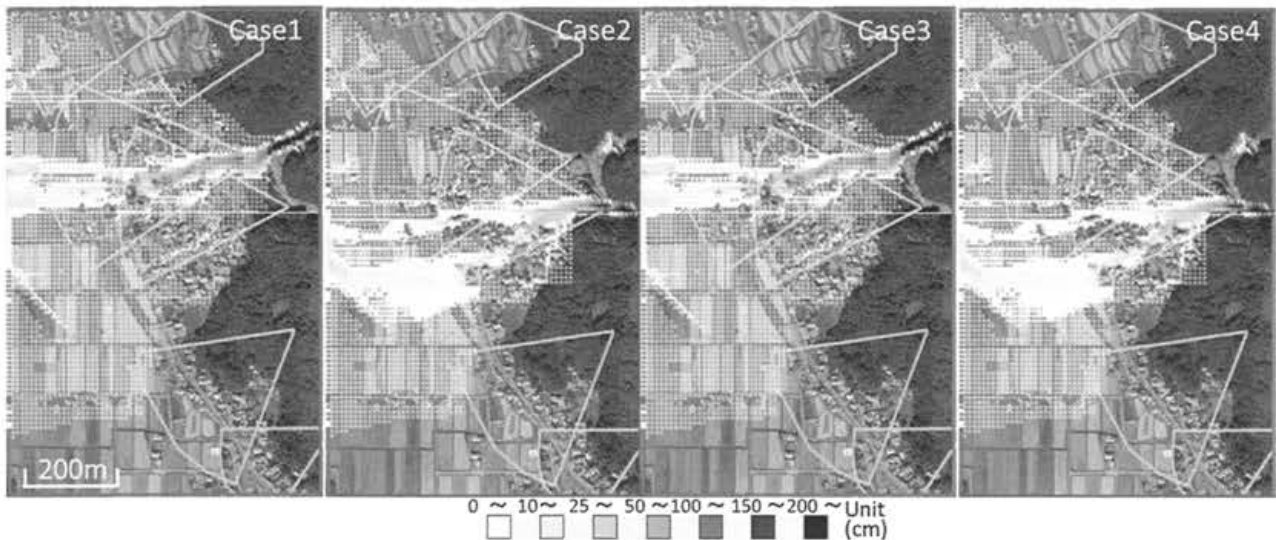


図-4 計算終了時の痕跡（水深+堆積厚の最大値）。

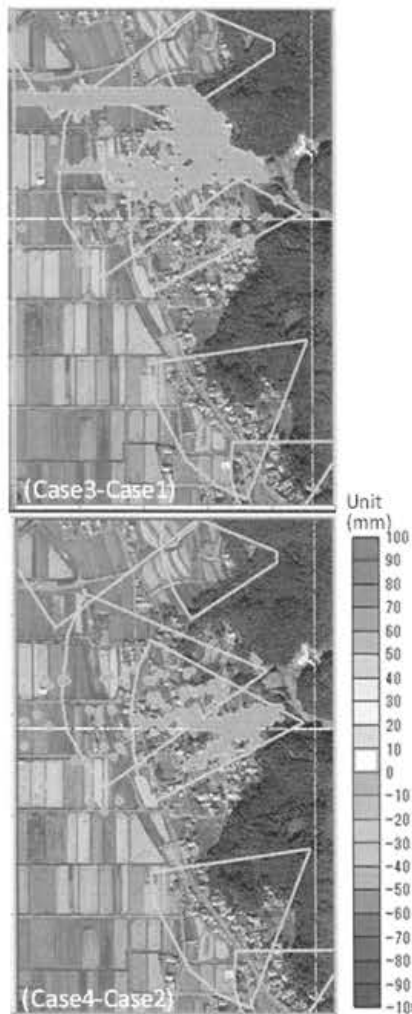


図-5 痕跡の差分（上：Case1と3、下：Case2と4）。

内ではやや南寄りに影響範囲が確認される。Case2や4では、溪流Aの警戒区域にも10-50cmの痕跡が見られる。一方で、単独シナリオのCase1, 2と連続シナリオのCase3, 4では影響範囲の違いは確認でき

なかった。

そこで、痕跡の数値をCase1と3, Case2と4を差分した結果を図-5（単位mm）に示す。Case1と3の差分からは溪流Aの警戒区域の北側に、Case2と4の差分からは溪流Bの警戒区域の南側で数値の差が確認できた。これは、連続シナリオの場合に、堆積による地形変化や流動深の変化が現れたものと推測される。一波目の土石流規模が小さいCase3の方が、Case4と比較して差が見られた範囲が広く差分値が若干大きかった。計算結果からは、単独シナリオと連続シナリオによる差が生じることは確認され、先に小規模の土石流が出た後に大きな土石流が生じるシナリオの方が、大きなものの後に小さなものが来るシナリオよりも違いが大きかった。

3. 実験による検討

(1) 実験条件

実験で連続シナリオによる影響を検討した。実験には扇状地の地形模型（図-6, 7）を用いた。扇状地は既往資料¹⁰を参考に典型的な形状とし、縦断勾配は上流から12, 9, 6, 3, 1度で横断的な変化はない。地形模型の上流に長さ5m, 幅10cm, 勾配15度の直線水路を二つ並列に設置して、水路間の距離は80cmとした。図-8に示す土砂（平均1.8mm）を用いて、溪流Dの砂のみを白色に着色して、各溪流からの堆積を判別し易くした。

直線水路に0.2m厚さに土砂82Lを敷き詰めて、扇状地地形の上流端と水路の下流端が同じ高さになるようにした。敷き詰めた土砂は飽和に近い状態としてから上流から定常的に清水を供給し、土砂を侵食させて土石流を発生させた。実験ケースを表-3に

示す。なお、全ての土砂が流出しても扇状地地形と水路に段差が生じないように、水路下端にはかさ上げ区間を75cm設けた。

ピーク流量は溪流Cで3.0L/s、溪流Dで2.0L/sで、通水時間はピーク流量を20秒間、その後に溪流Cで1.0L/s、溪流Dで0.67L/sを10秒間の計30秒と

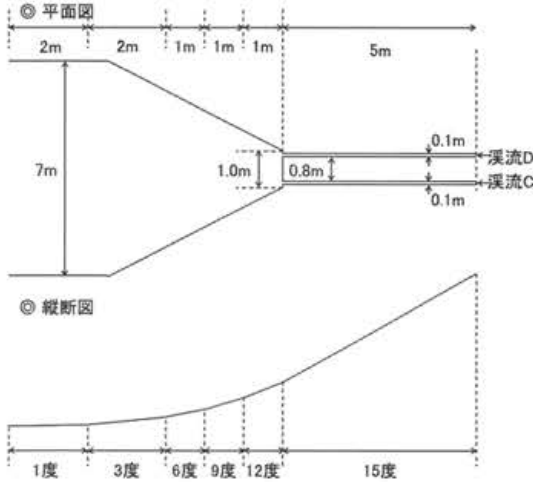


図-6 扇状地模型の概要 (上段：平面図、下段：縦断面図)。



図-7 扇状地部分の外観 (メッシュは20cm×20cm)。

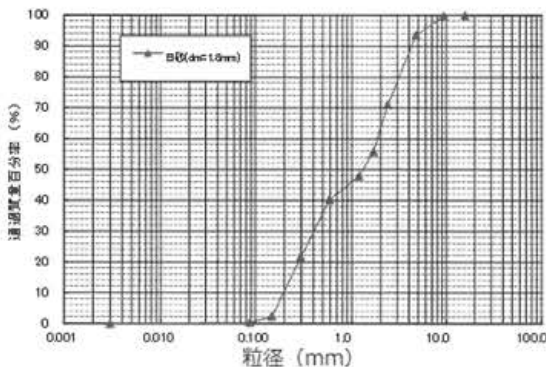


図-8 実験砂の粒度分布。

表-3 実験ケース。

Case	1 番目に発生	2 番目に発生
5	C	-
6	D	-
7	C	D
8	D	C

した。このような流量波形を設定したのは、予備実験で土砂流出の状況を確認した際に、一定流量では出水後半で扇状地に堆積した土砂の侵食が著しく生じたこと、また実際の土石流では後続の流量が段階的に小さくなることを考慮したためである。なお、扇状地まで流出した土砂量は溪流Cで74L、溪流Dで61Lだった。

(2) 実験結果

実験終了時の堆積状況を図-9に、堆積高コンターを図-10に示す。図-10には堆積範囲の外縁を合わせて示している。堆積範囲は3度までだったため、3度までの領域のみを示した。2.5mm以下の堆積高だったエリアは、コンターに示されていないため、堆積範囲の外縁とコンターの外縁が一部異なる。

実験の写真から氾濫範囲を確認すると、Case5、6ともに急勾配領域では流下範囲が狭く、緩勾配領域では流下範囲が広がる傾向にある。両者の比較から、Case5の方がCase6と比べて上流側では氾濫範囲が狭く、下流側ではほぼ同程度である。両者の違いは流量で、流量が大きい方が上流側で狭くなる。一方、Case7、8では氾濫範囲は確認し難いが、両者の堆積範囲を見ると、流量が大きい溪流Cの方が下流まで土砂が到達している。

コンター図を確認すると、Case5、6ともに6度の範囲が最も堆積する。このことから、堆積のきっかけは6度からはじまり、それが上流側に伝播、下流側には流出して最終形状が決定されたと考えられる。そのため、流量の大きい溪流C (Case5) は堆積を乗り越えて下流に流出するものと上流側に堆積遡上を引き起こすものがある。一方、流量の小さい溪流D (Case6) では初期の堆積位置から流れが小さいためそれほど堆積を乗り越えて下流に流出せず、横断的な広がり下流に土砂が流出し、その一方で上流側に堆積遡上を引き起こす土砂量が多い。そのため、上流側での堆積は流量の小さい溪流Dの方が多く、下流側での堆積は流量の大きい溪流Cの方が多くなる。堆積のピーク値は、溪流Cは240-300cm周辺で、溪流Dは200-260cm周辺で、両者ともに6度の範囲であるが、流量が大きい溪流Cの方が下流側で堆積する。

Case7、8の結果から、Case7では下流側で、Case8では上流側で連続シナリオの影響が確認される。Case7は溪流Dが上流側で堆積傾向である。これは、溪流Cが先に流出して土砂が堆積したことで二番目の溪流Dの流れが阻害されたと推測される。一方、Case8は溪流Dが先に流出して、土砂堆積が生じて、

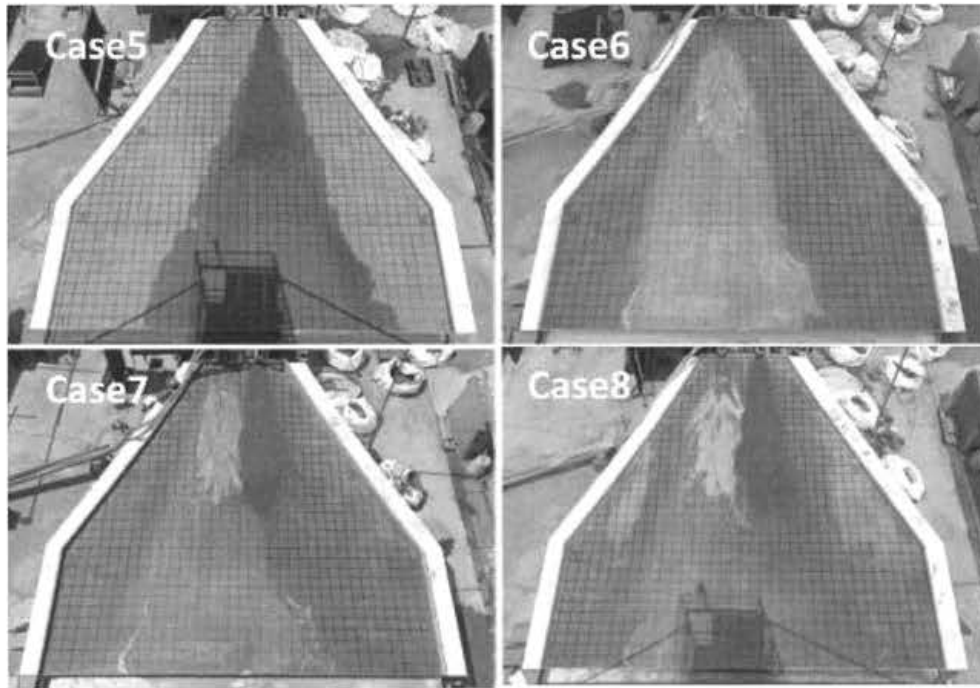


図-9 実験終了時の堆積状況.

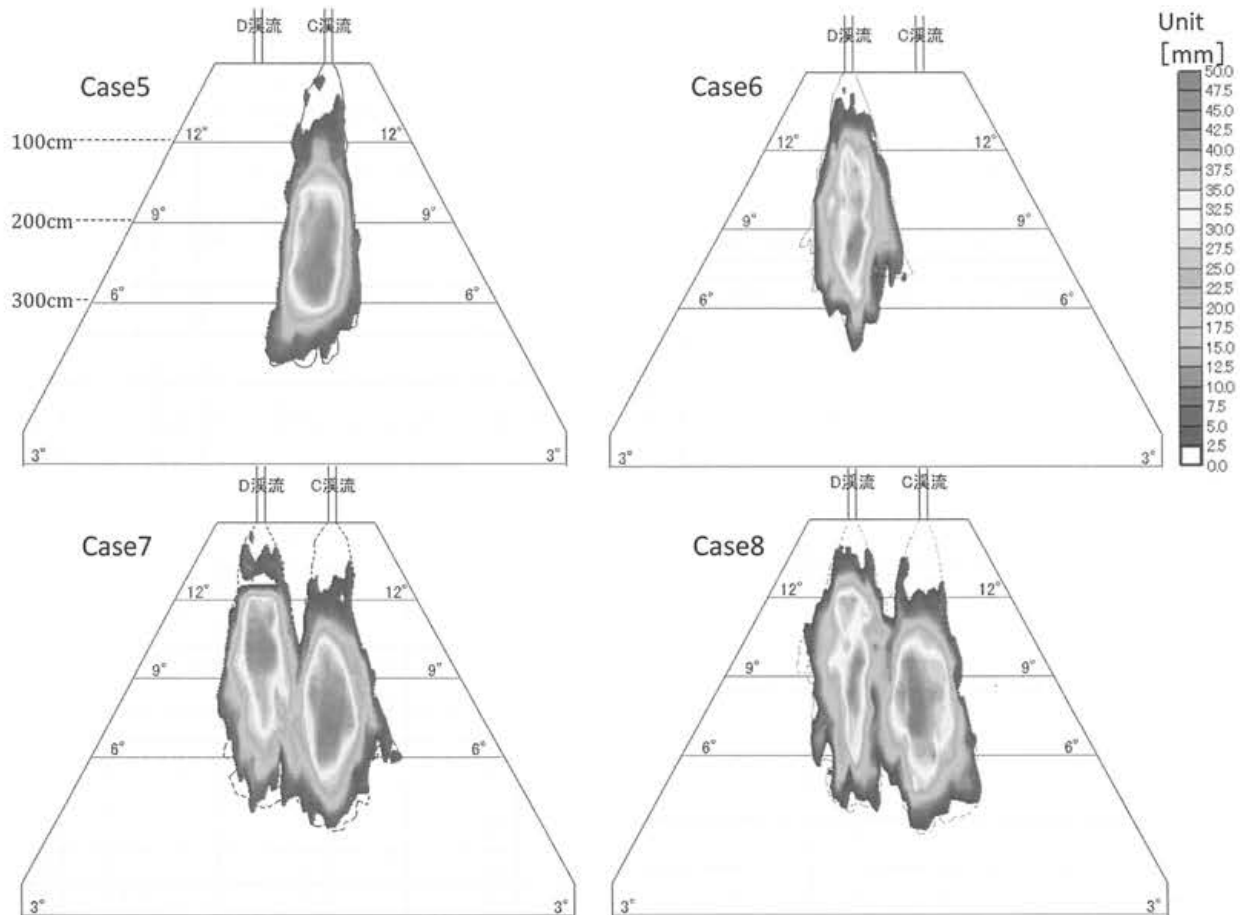


図-10 実験終了後の堆積高コンター (1メッシュは20cm×20cm) .

その後、流量が大きい溪流Cが流出するため、溪流Dの6度の範囲の堆積土砂は一部が侵食される。堆積が30mm以上を示す下端が単独シナリオのCase6と比較して280cm付近(6度)からCase8では320cm

付近(3度)と下流側に変化し、30mm以上や堆積のピーク値を示す範囲も細長く延びる。これは、溪流Cからの流出の主流部は140-300cmのエリアに広く堆積するが、その影響で流れの一部は溪流Dの方向

に移動して侵食を引き起こし、3度のエリアで再び堆積したと推測される。

堆積のピーク値は、隣接溪流から連続して流出するケースの二波目では、Case8の溪流Cは200-260cm周辺で、Case7の溪流Dは140-200cm周辺で、単独の場合と比べて明らかに上流側で堆積する。このことから、先行して流出した溪流の土砂が後続に流出した溪流の流れに影響を及ぼすことがわかる。

堆積範囲は、溪流Cでは単独のCase5よりもCase7では特に9度(100-200cm)や6度(200-300cm)の範囲で、Case8では3度(300cmより下流)で堆積が左岸側に広がる。右岸側での堆積はCase5が最も右岸側に寄りCase7や8ではそれより内側である。溪流Dでは単独のCase6と比べて特にCase8で右岸側、左岸側の両側にやや広がり、3度ではCase7や8の方が下流まで堆積が右岸側で特にみられる。このように、詳細に観察すると連続シナリオと単独シナリオでは若干堆積範囲が異なるが、その差は小さい。

4. おわりに

本報では、隣接溪流における土石流の連続シナリオを検討した。まず、土石流シミュレータHyperKANAKOを用いて隣接溪流からの単独の土石流及び連続して土石流が発生するシナリオを検討した。計算結果から、単独と連続の場合に影響範囲は変わらなかったが、痕跡の値には違いが見られ、小規模な土石流が先に起こる方が大規模な土石流が先に起こるよりも差分値が大きかった。次に、実験により連続シナリオの影響を検討した。実験結果は、計算結果と同様に影響範囲には大きな違いは見られなかったが、土砂の堆積範囲や堆積のピーク値などに違いが見られた。また、堆積状況も計算結果と同様に小規模なものが先に起こる方が違いが大きかった。すなわち、影響範囲だけに着目した場合は単独シナリオと連続シナリオで大きな差は見られないが、局所的な堆積やそれに伴う痕跡については連続シナリオが影響する場面があることが確認された。

最近の災害を鑑みると、隣接する溪流から土石流が連続的に同時多発する事例が見られるだけでなく、隣接溪流から発生した土石流による水・土砂が道路を通過して隣の集落まで移動した事例²⁾も確認されている。最初の土石流による堆積が、その後に発生する土石流の堆積状況を変化させる場合があることが本研究で確認されたが、さらに道路などの影響で、これまで予想しなかった範囲にまで水・土砂が流出する危険性も考えられる。今後は、隣接溪流の位置

関係や発生タイミング、道路や流路などの構造物を考慮した連続シナリオの影響までを明らかにしたい。

謝辞：本研究は、平成27年度京都府受託研究「土砂災害情報高度化検討」及びJSPS科研費15K16312の助成を受けたものです。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 一般社団法人 全国治水砂防協会:改訂版 土砂災害防止法令の解説—土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律—第2版, pp.73-93, 大成出版社, 2016.
- 2) 海堀正博・石川芳治・里深好文・松村和樹・中谷加奈・長谷川祐治・松本直樹・高原晃宙・福塚康三郎・吉野弘祐・長野英次・福田真・中野陽子・島田徹・堀大一郎・西川友章:2014年8月20日に広島市で発生した集中豪雨に伴う土砂災害, 砂防学会誌, Vol.67, No.3, pp. 49-59, 2014.
- 3) 松村和樹・長谷川祐治・藤本将光・中谷加奈・西川友章・笠原拓造・柳崎剛・鏡原聖史・加藤智久・岡野和行・鈴木崇・平岡伸隆:2014年8月の豪雨による兵庫県丹波市で発生した土砂災害, 砂防学会誌, Vol.68, No.1, pp.60-67, 2015.
- 4) 高橋保・中川一:豪雨時に発生する石礫型土石流の予測, 砂防学会誌, Vol.44, No.3, pp.12-19, 1991.
- 5) 和田孝志・里深好文・水山高久:土石流の1次元・2次元シミュレーションモデルの結合, 砂防学会誌, Vol.61, No.2, pp.36-40, 2008.
- 6) 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, No.6, pp.25-31, 2012.
- 7) 京都府亀岡市千歳町地区:土砂災害警戒区域等に関する区域指定箇所
<http://www.pref.kyoto.jp/dosyashitei/1274415104856.html> 2016年5月20日
- 8) 中谷加奈・小杉恵・内田太郎・里深好文・水山高久:土石流の氾濫・堆積に及ぼす家屋の影響—平成24年7月熊本県阿蘇市土井川で発生した土石流を対象として—, 第7回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.85-90, 2014.
- 9) 中谷加奈・里深好文・藤田正治・水山高久:平成24年7月に京都府亀岡市南条で発生した土石流の検討—構造物の影響を考慮して—, 自然災害科学, Vol.33, No.1, pp.17-27, 2014.
- 10) 社団法人砂防学会監修:土砂災害対策-扇状地対策・土石流対策等(1), 砂防学講座第6巻-1, 山海堂, p.27-40, 1992. (2016.5.31受付)