

土砂災害マルチハザードシミュレータの山間流域に対する適用と警戒避難手法に関する検討

A STUDY ON WARNING AND EVACUATION SYSTEM AGAINST SEDIMENT DISASTER IN A SMALL MOUNTAIN VILLAGE EMPLOYING MULTI-HAZARD SIMULATOR

山野井 一輝¹・藤田 正治²

Kazuki YAMANOI, Masaharu FUJITA

¹京都大学大学院工学研究科 (〒612-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail: yamanoi.kazuki.57n@st.kyoto-u.ac.jp

²京都大学防災研究所 (〒612-8235 京都府京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

E-mail: fujita.masaharu.5x@kyoto-u.ac.jp

Key Words: *Sediment disaster, Multi-hazard, Landslide, Flood, Flash flood*

1. はじめに

これまで我が国では、土砂災害時の避難を支援するシステムとして、土砂災害警戒情報が気象庁と都道府県で共同して運用されている。これは、タンクモデルを用いて計算される土壌雨量指数を横軸に、60分間積算雨量を縦軸にとった平面を用い、各時点の点を結んだスネークラインがCL(クリティカルライン)を超過することが見込まれた場合に発令されるものである。土砂災害警戒情報が発令されると、自治体は本情報と現場の状況等を参考に避難勧告等を発令する必要があるが、避難勧告等の発令時に既に避難が困難であった事例¹⁾や避難が困難であるとの観点から避難勧告が発令されなかった事例²⁾が存在する。このような事例が生じる一つの原因は、土砂災害時には直接被害を生じさせる大規模な現象だけでなく、比較的小規模な複数の現象(小規模ハザード群)が生じて避難を阻害することにあると考えられる。しかし、現在の土砂災害警戒情報等では、いざ避難しようとした時に小規模ハザード群の発生の有無や、これによって避難が困難な状態になっているのか等については把握できない。

そこで、災害が生じると推定される複数の降雨に

対して予めハザード群の発生パターンを予測しておけば、災害中の最適な避難手法を検討するのに非常に有用と考えられる。例えば、小規模ハザード群の危険性に応じて、屋外避難が適する状態と、屋内の比較的安全な部屋にて待機する”垂直避難”が適する状態かを見分けることで、危険な状態での屋外避難を避け、被害を最小に抑えることが可能であると考えられる。

筆者らは、小規模ハザード群を表1のように降雨関連ハザード群、崩壊関連ハザード群、および洪水関連ハザード群に分類し、それぞれのハザード群の危険性の時空間的分布を、降雨データを元に把握できるシミュレータ(SiMHIS: Storm Induced Multi Hazards Information Simulator)を構築してきた³⁾。これは、流域を図1のように単位河道・単位斜面⁴⁾・斜面要素⁵⁾に分割し、斜面要素上での斜面崩壊予測と、単位斜面における降雨流出、河道への崩壊土砂の供給、および河道内の水・土砂の輸送までの一連の過程を統合的に解析し、得られた結果から各ハザード群の発生危険度を算出する数値モデルである。斜面崩壊モデルには土中水分量を指標としたChenら⁶⁾のモデルを用いている。各ハザード群の発生危険度は表1のように「リスクレベル」として評価し、

表1 本シミュレータ(SiMHiS)が対象とするハザード群と評価基準¹⁾

分類	降雨関連ハザード群	崩壊関連ハザード群	洪水関連ハザード群
例	・視界不良 ・恐怖感 ・路面冠水	・斜面崩壊・崖崩れ ・土砂の流出 ・土石流・河道閉塞	・洪水氾濫 ・橋梁の閉塞・破壊 ・堤防の越流・決壊
評価単位	単位斜面	単位斜面	単位河道
評価指標	I : 降雨強度[mm/hour]	R_{smax}, R_{save} : 単位斜面内にある斜面要素の崩壊指標の最大値および平均値	h_{w*} : 初期河床位を基準とした水位の洪水発生限界水位(堤防位)に対する比
Level 1	$I < 20$	$R_{smax} < 0.9$	$h_{w*} < 0.8$
Level 2	$20 \leq I < 50$	$0.9 \leq R_{smax} < 1$	$0.8 \leq h_{w*} < 1.0$
Level 3	$50 \leq I < 80$	$R_{smax} \geq 1, R_{save} < 1$	$1.0 \leq h_{w*} < 1.2$
Level 4	$I > 80$	$R_{save} \geq 1$	$h_{w*} \geq 1.2$

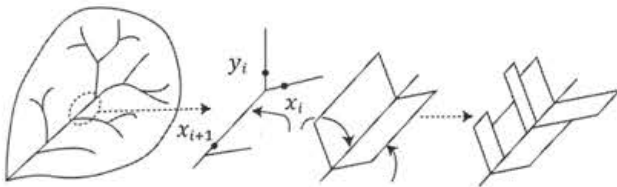


図1 単位河道・単位斜面・斜面要素

評価指標には、降雨関連ハザード群は降雨強度を、崩壊関連ハザード群は単位斜面内に含まれる斜面要素の崩壊指標(崩壊モデル⁵⁾で得られる斜面内の土中水分量と限界土中水分量の比)の最大値と平均値を、洪水関連ハザード群には初期河床位を基準とした水位と洪水発生限界水位(流路が溢れる時の水位)の比を使用している。このシミュレータを用いると降雨データをインプットとして、流域内のハザード群の発生リスクレベルをLevel 1~Level 4の4段階で、面的および時間的に求める事が可能である。なお、本シミュレータでは使用する数値モデルの不確実性を考慮し、各ハザード群の数値モデル上での発生限界をLevel 2と3の間に設定しており、Levelが高いほど該当するハザード群が発生している可能性が大きい状態である。

本研究では、下記対象流域に災害の発生が想定される2種類の降雨を用いてシミュレータを適用した。次に得られた結果から、一時避難所または流域外への避難が可能なタイミングや、屋外行動が危険なタイミングを推定し、本流域での適した避難手法について検討した。

2. 対象流域

丹後半島東部の山間部にある京都府宮津市畑地区を対象とした。当地区は急な斜面部に複数の住家が

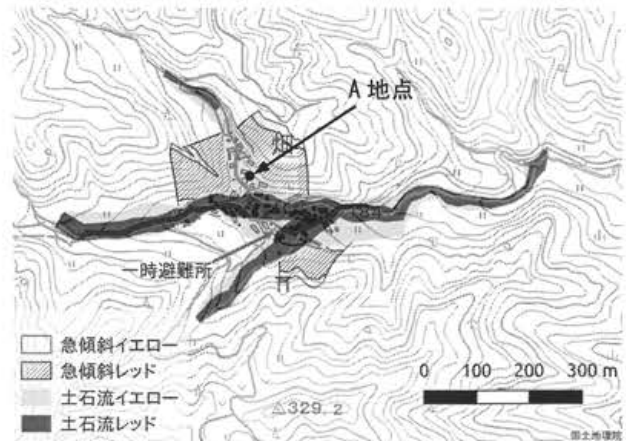


図2 畑地区の概要図(国土地理院の電子地形図および国土交通省国土政策局「国土数値情報(土砂災害警戒区域データ)」より作成)

位置しており、土砂災害の発生が見込まれる集落である。当地区の中心部の地図と、土砂災害警戒区域に指定された領域を図2に示す。集落内に一時避難所が1件指定されているが、集落全体が土砂災害警戒区域に指定されており一時避難所も土石流のイエローゾーンに位置する。このため、大規模な災害の発生が危惧される場合には、下流側の集落外にある指定避難所までの移動が必要になると想定される。しかし、指定避難所までの移動には自動車を使用しても10分程度要するため、集落内だけでなく、避難経路の安全性も検証する必要がある。

また、当地区では過去に平成16年台風23号による被災を受けており、人的被害はなかったものの、6件の床下浸水が発生し、さらに下流へ通じる道路が崩土や河岸侵食によって通行不能になり、“孤立化”したことが記録されている⁶⁾。

3. 計算条件

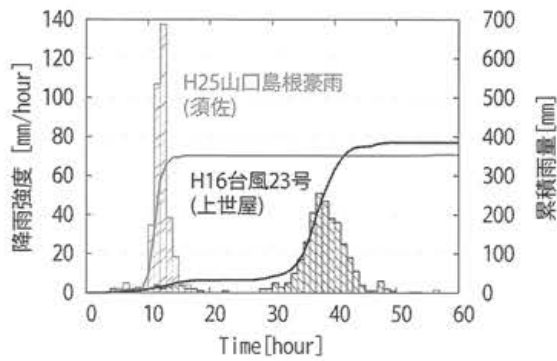


図3 与えた降雨条件

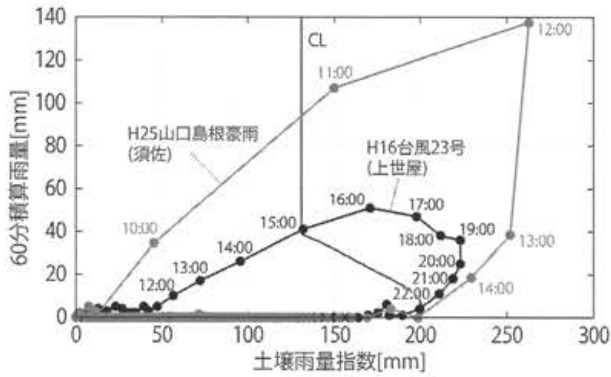


図4 スネークラインと実際の災害時の時刻

(1) 降雨条件

ここでは実際にこの地区で被害が発生した平成16年台風23号時の降雨（宮津市上世屋観測点の時間雨量データ）と、当地区と同様に日本海側で災害が発生した降雨である、平成25年山口島根豪雨時の降雨（アメダス須佐の時間雨量データ）を使用して適用する。各降雨のハイエトグラフは計算開始時点を目安として図3に示す。前者は最大降雨強度が50mm/hour程度の比較的弱い雨が40時間程度継続した降雨であり、後者は最大で137.5mm/hourの極めて強い降雨が数時間で降った降雨である。これらの降雨データを用いて、土砂災害警戒情報で用いられるスネークラインを作成したのが図4である。台風23号の降雨はCLの比較的低いところを数時間かけて通過するのに対し、山口島根豪雨の降雨はCLの上部を短時間で通過することに特徴がある。

(2) 地形条件

畑地区内を流れる畑川流域を対象として抽出した単位河道、単位斜面、斜面要素を図5に示す。これらの抽出には国土地理院の基盤地図情報数値標高モデル10mメッシュのDEMデータを使用し、GRASS-GISの機能を組み合わせて用いた。ここでは勾配

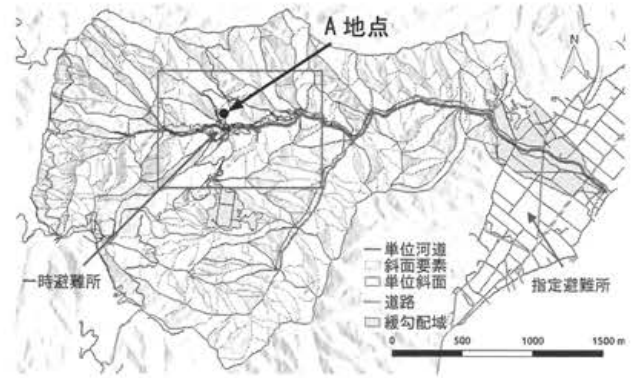


図5 対象流域図（枠は図1の領域）

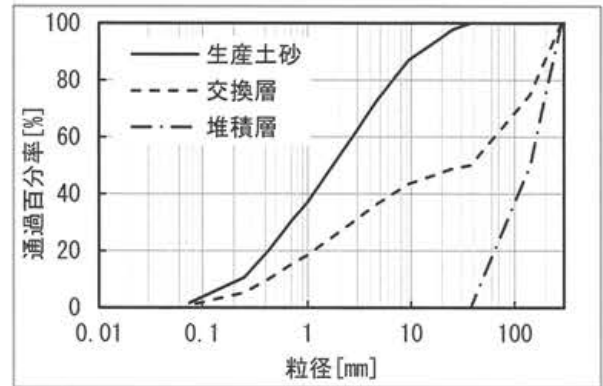
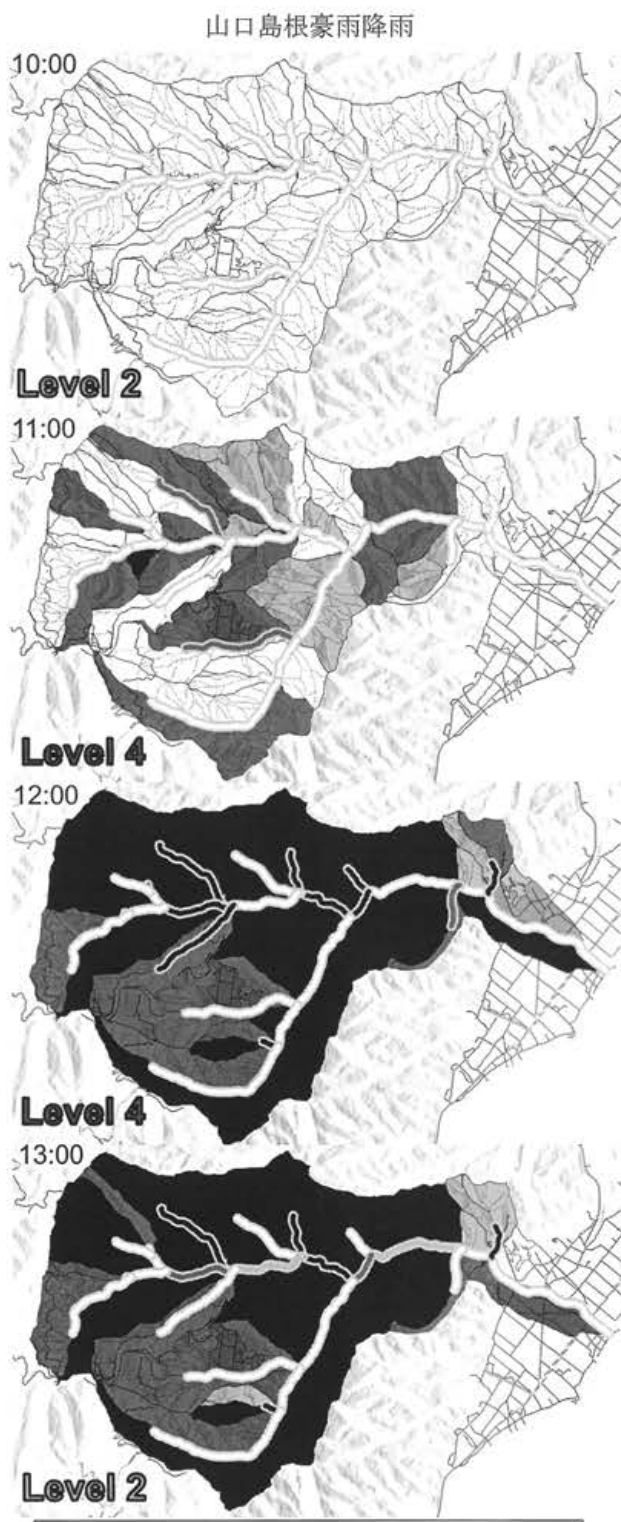
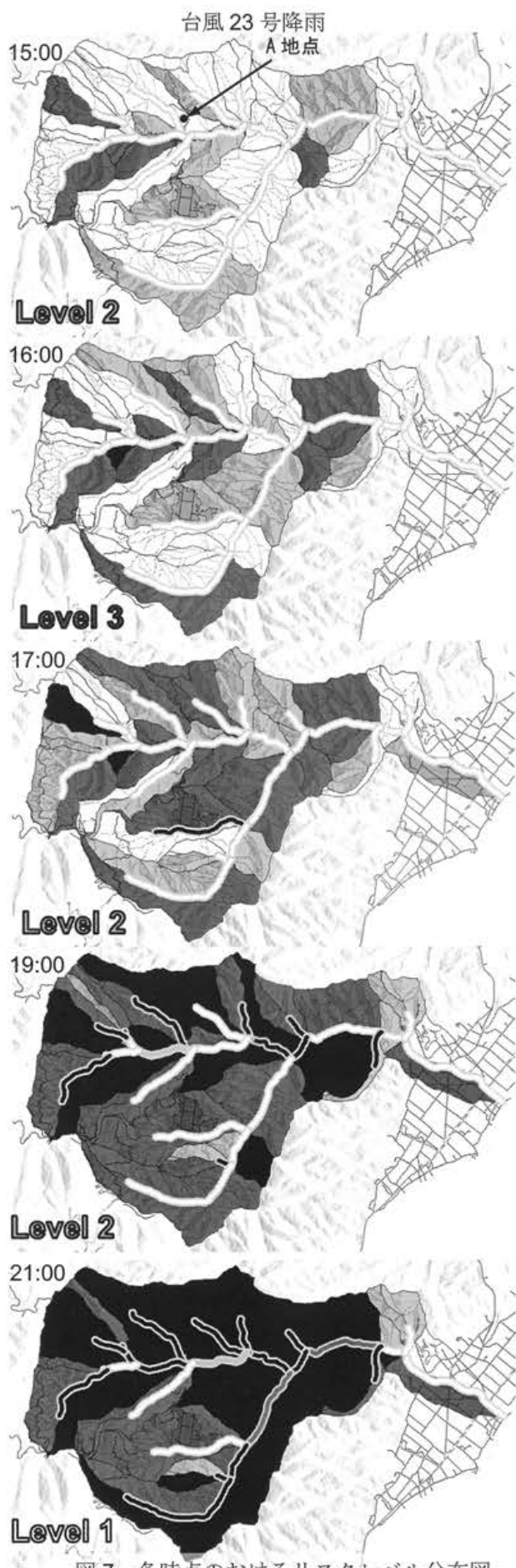


図6 生産土砂と河床材量の粒度分布

15°以下で斜面崩壊が起こらないと推定される領域は、斜面要素の抽出範囲から除外した。なお、先行研究³⁾では崩壊モデル⁵⁾に用いる斜面要素の平均勾配 α は重心の河道からの比高と水平距離の比から求めていたが、一部で異常に大きい勾配の斜面が抽出されるという問題点があった。そこで本研究では、先ずDEMデータから各地点の勾配データを作成し、斜面要素内の勾配の平均値を求めて用いるものとした。

また、生産土砂および河床材料の粒度分布は図6のようにそれぞれ与えた。ここでは現地河床から100mm以下の細粒分をサンプリングしてふるい分けて得たものを、斜面崩壊から生産される土砂の粒度分布として与えた。また、現地河川に100mm~200mm程度の粗粒分が概ね50%程度存在していたことから、河床材料の粒度分布には、交換層には細粒分と粗粒分を1:1で混合した土砂を、その下堆積層には粗粒分の堆積層には粗粒分のみを与えた。また、集落近傍の固定床となっている河道では、初期河床位より河床低下しないものとして取り扱った。河道幅と洪水発生限界水位（洪水関連ハザード群の発生指標の算出で用いる）は、集落周辺では現地測量によって、集落外ではレジーム則を用いて与えた。



発生リスク	色
Level 1	緑
Level 2	黄
Level 3	赤
Level 4	紫

降雨関連ハザード群: 文字と文字色で表示
崩壊関連ハザード群: 斜面の色で表示
洪水関連ハザード群: 河道の色で表示

図 7 各時点におけるリスクレベル分布図 (左: 台風 23 号降雨, 右: 山口島根豪雨降雨)

4. 計算結果と考察

本シミュレータで得られた結果は、図7のようなリスクレベル分布図で示す。各リスクレベルはLevel1から順に緑、黄、赤、青の色分けで示すものとし、降雨関連ハザード群は各リスクレベル分布図の左下の文字で、崩壊関連ハザード群は斜面の色で、洪水関連ハザード群は河道の色で示す。

(1)平成16年台風23号時の降雨

各時刻におけるリスクレベル分布図は図7(左)のように得られた。スネークラインがちょうどCL上にくる15:00の時点では、集落近傍の斜面で一部崩壊関連ハザード群のリスクレベルが3に到達するが、河道左岸側に位置する避難経路や集落付近でのリスクレベルは概ね1~2であり、この時点までであればどの地点でも問題なく避難が可能な状態にあると考えられる。

次にCL超過1時間後の16:00の時点で降雨関連ハザード群のリスクレベルが3に達する。したがってこの時点で視界不良等の降雨関連ハザード群が発生し、屋外での移動が困難な状態になると推定される。また、集落下流側の道路沿いの本川河道左岸側で崩壊関連ハザード群のリスクレベル最大3まで上昇するため、集落から流域外への移動は、この時点で降雨と崩壊の双方のハザード群の発生により困難になると考えられる。

17:00の時点では、若干雨が弱まり、Level2の状態になる。この時点で崩壊関連ハザード群発生リスクレベルが広い範囲で3となる。ただし、Level2の状態にある場所や周囲で崩壊が起きていない場合は、一時避難所までであれば徒歩で避難できる可能性がある。ただし、19:00~21:00になると集落付近の大半の場所で崩壊・洪水関連ハザード群がLevel4となり、この時点で屋外へ避難できない状態になり、垂直避難しか選択肢はない状態になると推定される。

なお、21:00の時点で集落付近および集落下流の道路沿いの河道の洪水関連ハザード群のリスクレベルと、集落から下流部にかけての崩壊関連ハザード群がLevel4に上昇した。これは本降雨で畑集落内にて床下浸水が6件生じ、さらに下流への道路が崩土や河岸侵食によって通行不能になったことに矛盾しない結果と考えられる。

(2)平成25年山口島根豪雨時の降雨

山口島根豪雨の降雨を与えた場合の計算結果は図7(右)のようになった。CL超過前で雨が降り始め

た10:00の段階では降雨のみLevel2でそれ以外はLevel1の状態であり、ほとんど危険性は生じていないと考えられる。しかし1時間後の11:00になると降雨が一気に強まってLevel4の状態となり、視界不良や圧迫感などから屋外への避難は困難な状態になると推定される。この時点で複数の斜面の崩壊関連ハザード群がLevel2~3に達し、さらに集落近傍の一部の河道では洪水関連ハザード群のリスクレベルが3に到達する。これが12:00になると降雨がLevel4の状態のまま、洪水と崩壊双方のリスクレベルが集落大半の箇所まで4に到達する。本降雨では、このように降り始めから1時間で一気に降雨が強くなり、そのままの状態でも崩壊・洪水関連ハザード群が発生するという特徴がみられる。

なお、降り終わり直前である台風23号降雨の21:00の状態と、山口島根豪雨の13:00の状態を比較すると、台風23号降雨の場合の方がより上流側の洪水のLevelが大きくなっている。これは台風23号降雨では降雨ピークよりも後の雨が比較的弱い状態で斜面崩壊が発生するため生産された土砂が下流へと流送されにくいのに対し、山口島根豪雨の場合では降雨のピーク中に土砂が生産されるため容易に下流へ流送されるからだと考えられる。

また、モデル上で崩壊した斜面要素数と土砂生産量は台風23号降雨が249斜面、 $3.0 \times 10^5 \text{m}^3$ に対し、山口島根豪雨では263斜面、 $2.4 \times 10^5 \text{m}^3$ と逆の相関になった。これは短時間降雨指標が崩壊発生数の増加に寄与し、長時間降雨指標が崩壊規模の大きさに寄与する可能性がある、という報告⁷⁾に一致する結果となった。

(3)避難可能なタイミングに関する検討

本節では、下流側の指定避難所への避難と一時避難所への避難が各降雨のどの時点まで可能であるかについて検討する。ここではA地点(図2および図5に記載)からの避難を対象とし、一時避難所までの避難の可否はA地点近傍の3種類のハザード群のリスクレベルの最大値から判定する。また、指定避難所への避難はA地点から下流の指定避難所に至る経路上の全ての領域における最大のリスクレベルから判定する。A地点近傍と経路上最大のリスクレベルを、ハザード群別に図8に示す。なお、崩壊・洪水関連ハザード群のリスクレベルは毎正時に出力されるものが前後30分間ずつ継続しているものとし、降雨については使用した降雨データと同様毎正時の前60分間のリスクレベルとして整理した。

ここで、3種類のハザード群の発生リスクレベル

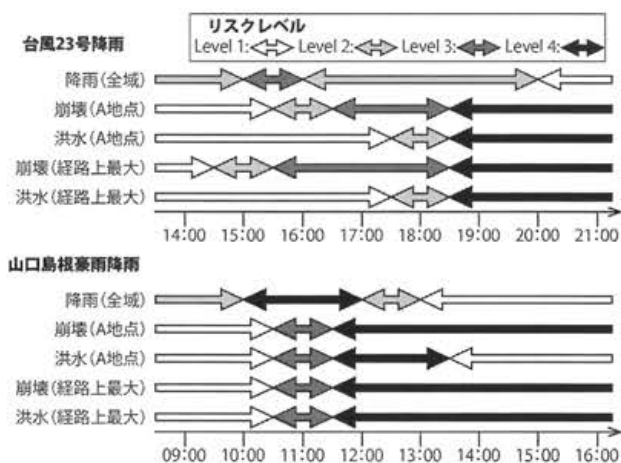


図8 地点Aと下流への避難経路における各ハザード群のリスクレベル

のうち最もレベルが高いものが1~2の状態を安全に屋外行動が可能な状態、3~4では屋外行動が危険な状態と仮定する。すると台風23号の雨の場合、A地点付近から一時避難所への避難は、スネークラインがCLを超過する15:00の時点までは安全であるが、15:00~16:00は危険と判定される。しかしその後16:00~16:30頃の間は再度一時避難所への移動が可能な状態となり、16:30以降はまた危険な状態とな

る。下流側の指定避難所へ避難する場合は、15:00以降は最大リスクレベルが3を超えるので15:00までが可能な時間帯と推定される。このように、この降雨の場合は安全に可能な避難形態が時々刻々と変化するという結果となった。

これに対し山口島根豪雨の降雨の場合スネークラインがCLを超過するより前の10:00以降、経路上だけでなくA地点においても常に最大レベルが4異常の状態が継続する。したがって、この雨の場合は一時避難所および指定避難所への避難はCL到達より前の10:00までに完了する必要がある、CL到達後は垂直避難しか選択肢はない状態になると推定される。なお、本研究では流域全体で見た災害発生過程を追跡するため、60分雨量を使用した検討を実施した。このため、10分雨量に現れるような極めて短時間の強雨については十分に反映されていない。今後、モデルの詳細な精度検証と共により時間解像度の高い検討を実施すれば、各現象の発生する時間差や、避難が可能な時間帯がより詳細に評価できるようになると期待できる。

5. 結語

本研究では土砂災害マルチハザードシミュレータSimHiSを土砂災害に対する脆弱性が認められる宮津市畑地区に対して2種類の雨を用いて適用し、各時刻のハザード群の発生状況と適した避難手法に関して検討を行なった。計算の結果、比較的弱い降雨が長期間降った台風23号降雨の場合はCL到達後も一時避難所への避難が可能な時間帯があることが示された。これに対し、極めて強い雨が短時間で降った山口島根豪雨の降雨の場合、CL到達時、既に屋外への避難が困難な状態になっており、屋外避難を実現するためにはかなり早い段階での決断が必要であることが示唆された。

参考文献

- 1) 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.4，pp.49-59，2014
- 2) 石川芳治・池田暁彦・柏原佳明・牛山素行・林真一郎・森田耕司・飛岡啓之・小野寺智久・宮田直樹・西尾陽介・小川洋・鈴木崇・岩佐直人・青木規・池田武穂：2013年10月16日台風26号による伊豆大島土砂災害，砂防学会誌，Vol.66，No.5，pp.61-72，2014
- 3) 山野井一輝・藤田正治：豪雨時の水・土砂災害に関わるハザード群の発生リスク評価，土木学会論文集B1(水工学)，土木学会，Vol.72，pp. I_1291-I_1296，2016
- 4) 江頭進治，松木敬：河道貯留土砂を対象とした流出土砂の予測法，水工学論文集，第44巻，pp.735-740，2000
- 5) Chen-Yu CHEN, Masaharu Fujita: A Method for Predicting Landslides on a Basin Scale Using Water Content Indicator, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 70, No.4, pp. I13-I18, 2014
- 6) 宮津市：台風23号に係る検証報告書，http://www.city.miyazu.kyoto.jp/open_imgs/info/0000000267.pdf，2016.5.25
- 7) 林真一郎，内田太郎，奥山悠木，丹羽諭，蒲原潤一，武蔵由育，小林真之，鈴木伴征：降雨規模と斜面崩壊・土石流の発生確率および生産土砂量の時系列的な関係分析，平成26年度砂防学会研究発表会概要集，B-47，2014

(2016.5.31 受付)