

土砂災害警戒避難に影響を及ぼすハザード群に関する研究

A Study on Multi-Hazards Which Influences Evacuation against Sediment Disaster

山野井一輝⁽¹⁾・藤田正治

Kazuki YAMANOI⁽¹⁾ and Masaharu FUJITA

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduated School of Engineering, Kyoto University, Japan

Synopsis

Multiple small-scale hazards such as road submergence, poor visibility, slope failure, flood, and inundation can obstruct evacuation from sediment disaster and may enlarge human damage caused by large-scale of sediment movement. To clarify the process of small-scale hazards during sediment disaster, a numerical simulation model integrating models of sediment production caused by landslides, sediment supply and sediment transport in a watershed has applied to the sediment disaster event caused in Sakiyama river basin located in Hyogo prefecture, Japan. Based on the calculated results, we proposed indexes of 3 groups of hazard related to the landslide occurrence, water level in the channel, and rainfall intensity. The temporal change of indexes showed different characteristics according to the property of precipitation such as total amount of rainfall and maximum intensity.

キーワード: ハザード群, 土砂災害, 警戒避難, 斜面崩壊, 土砂流出

Keywords: Multi-hazards, Sediment disaster, Evacuation, Land slide, Sediment runoff

1. はじめに

土砂災害時の人的被害を軽減するためには警戒避難が重要であり, 災害の発生が見込まれる場合には自治体からの避難勧告・避難指示が発令されている。しかし, 発令時に安全な避難ができるかどうか担当者が把握するのは困難であり, 発令された時点で既に避難できない状況にあった, または担当者が安全な避難は困難と考え避難を呼びかけられなかった事例が複数報告されている(海堀ら, 2014; 松村ら, 2015; 石川ら, 2014など)。このような事態が発生する一つの原因は, 土砂災害時には人的被害を生じさせる深層崩壊や土石流などの大規模な現象だけでなく, 早い段階から比較的小規模な現象群が発生することである。たとえば, 強い雨による視界の悪化,

道路の冠水や, 浸水, 洪水, 堤防の越流, 小規模な崩壊(崖崩れ), 土砂の流出, 倒木, 落石等の現象が該当する。本研究ではこのような現象群を小規模ハザード群と定義する。避難を決定するより先に小規模ハザード群が発生していた場合, 避難が危険または困難になる可能性がある。

近年の土砂災害で小規模ハザード群が発生した事例を挙げると, 2011年台風12号による紀伊半島で発生した土砂災害では, 長殿・宇宮原地区において, 深層崩壊が発生する9月4日より前の3日午前10:00~11:00から付近のテラ谷にて土砂流出が開始し, 避難経路になり得るテラ谷上を通過する道路が通行不能になっていたことが確認されている(奈良県, 2015)。また, 2013年台風26号によって伊豆大島で発生した土砂災害では, 深夜の時間帯に

118.5mm/hourに達した強い降雨と強風により、町職員が「視界が悪く何が起きているか分からなかった」と報告している（秋山ら，2014）．さらに，2014年8月に兵庫県丹波市の前山川流域で発生した土砂災害（Fig. 1）では，約15km²程度の狭い流域で多数の斜面崩壊が発生し，土砂流出や河床上昇，洪水などが発生していたことが確認されている（松村ら，2015）

以上のように小規模ハザード群は災害時の様々なタイミングで発生し，避難に強く影響を与えられ考えられるが，これまでの土砂災害の対策ではあまり考慮されていない．たとえば，気象庁と都道府県が運用する土砂災害警戒情報も，対象とする現象は表層崩壊による土砂災害のうち土石流や集中的に発生する急傾斜地の崩壊とされており（国土交通省河川局砂防部ら，2005），小規模ハザード群が避難にどう影響するかは考慮されていない．一つの原因は，小規模ハザード群を対象とした数値解析手法が確立されておらず，発生の見極めが困難なことであると考えられる．

以上の背景から，本研究では災害時に発生する小規模ハザード群に着目し，実際の災害イベントを対象とした土砂移動解析を実施することで，小規模ハザード群の発生プロセスを明らかにすることを目的とする．本論では丹波市の前山川流域で発生した土砂災害を対象とする．さらに，降雨特性が変化した場合に発生プロセスがどう変化するかについて考察を行う．

2. 数値解析モデル

数値モデルには，土砂の生産・供給・輸送の統合モデル（山野井，藤田，2014）を用いる．このモデルはGISによって単位河道・単位斜面に分割した地形要素上にて，土砂の流出課程を，土砂が新たに生産される課程，生産された土砂が河道に供給される課



Fig. 1 Sediment disaster in Sakiyama river watershed (after Geospatial Information Authority of Japan)

程，河道内で土砂が輸送される課程に分割して追跡するモデルである．本計算では，土砂生産課程にはChen（2014）の斜面崩壊モデルを，土砂供給課程には生産土砂のうち流域内に堆積する量を地形から評価する手法を用いる．土砂輸送課程は江頭，松木（2000）の土砂輸送モデルを用いる．

2.1 流域の表現法

本計算では流域をFig. 2に示すように，単位河道，単位斜面に分割する（江頭，松木，2000）．流域内の流路は接続点をもって単位河道に分割され，上流端以外の単位河道には，上流側に2本の単位河道が合流する．単位斜面は，各単位河道の左岸側および右岸側に接続する集水域である．さらに，本計算では斜面崩壊モデルの計算単位として，流域内の単位斜面をさらに斜面要素に分割した．分割手法は（Chen,2014）と同様の手法を用いた．この際，人が居住している平野部は斜面崩壊が発生しないと考えられることから，斜面要素の抽出範囲から除外した．以上の単位河道・単位斜面・斜面要素の抽出には国土地理院の公開している国土基盤地図情報10mメッシュDEMとGRASS-GISの機能を用いた．この際平野部の範囲は，航空写真を用いて，目視によって抽出した．丹波市の前山川流域を対象に抽出した結果をFig. 3に示す．

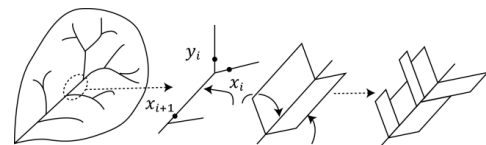


Fig. 2 Unit channels, unit slopes, and slope units (after Chen, 2014)

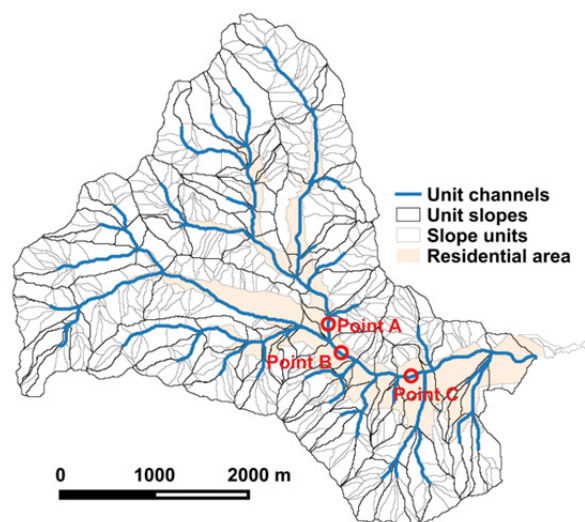


Fig.3 Extracted unit channels, unit slopes, and slope units from Sakiyama river watershed

2.2 土砂生産モデル

土砂生産モデルにはChen (2014) による重回帰分析を用いた斜面崩壊モデルを用いる。このモデルは、斜面勾配 α および斜面長 L [m]を持つ均一斜面に対して適用される、Richards式に基づく不飽和浸透解析と簡易Jambu法に基づく安定解析を組み合わせた斜面崩壊モデル（堤ら, 2007）の計算負荷を、重回帰分析を用いることで軽減したモデルである。本モデルでは、斜面の限界土中水分量 W_{cr} 、初期土中水分量 W_{ini} 、時刻 t における土中水分量 $W(t)$ を重回帰分析から得られる以下の関係式から推定する。

$$W_{cr} = (c_1 + c_2 \cdot L + c_3 \cdot \alpha + c_4 \cdot I_{60}) \cdot V \quad (1)$$

$$W_{ini} = (c_5 + c_6 \cdot L + c_7 \cdot \alpha) \cdot V \quad (2)$$

$$W(t) = (c_9 \cdot L + c_{10} \cdot \alpha + c_{11} \cdot I_t) \cdot V + c_{12} \cdot W(t-1) \quad (3)$$

ここに、 V は斜面の単位幅あたりの体積[m³]、 I_{60} は60分降水量[mm/hour]、 I_t は時刻 t における時間降雨量[mm/hour]である。このとき、時刻 t における斜面の安全率 $F_s(t)$ は下記の式で与えられる。

$$F_s(t) = \frac{W_{cr}}{W(t)} \quad (4)$$

崩壊の発生条件を $F_s(t) = 1$ とすると、崩壊発生時の単位体積あたりの崩壊体積[m³]は下記の式で与えられる。

$$V_s = (c_{13} + c_{14} \cdot L + c_{15} \cdot \alpha + c_{16} \cdot I_{60}) \cdot V \quad (5)$$

なお、以上の式における定数 $c_1 \sim c_{16}$ は、複数の代表的な α 、 L の値に対して堤らのモデルで計算を実施し、その結果から重回帰分析によって予め求めておく。

なお、今回の計算では、Chen (2014) が対象とした京都府宇治市志津川流域と、対象とする兵庫県丹波市前山川流域の地質が、いずれもジュラ紀の付加コンプレックスであり類似することから $c_1 \sim c_{16}$ はChen (2014) と同一のものをを用いた。

2.3 土砂供給モデル

斜面崩壊によって生産された土砂のうち、一部は斜面や平野部に残存し、残りは河道に供給される。河道に供給された土砂は河床上昇を引き起こし、土砂の輸送過程に大きく影響を与える。山野井、藤田 (2014) は基岩の凍結融解によって生産された土砂

の供給量を洪水時の川幅変動から評価しているが、本研究が対象とするような豪雨時に斜面崩壊によって大量の土砂が生産される場には同方法の適用は困難である。そこで、生産された土砂は、大量の雨水によっての大半が河道の近傍まで移動するとみなし、河道近傍に堆積可能な量を超えた量が直ちに河道に供給されるものと仮定する。このとき、河道近傍に堆積可能な量は、Fig.4のように土砂が常に堆積角度 β で堆積すると仮定することで得られる河道近傍の堆積可能高さ H_d の総和から算出する。各地点の河道からの距離を D_c 、河道からの比高を H_c とすると、 H_d は以下のように表される。

$$H_d = \begin{cases} D_c \tan \beta - H_c & (D_c \tan \beta > H_c) \\ 0 & (D_c \tan \beta \leq H_c) \end{cases} \quad (6)$$

なお、本研究では土石流の堆積勾配を参考に $\beta = 4^\circ$ と設定した。

2.4 土砂輸送モデルへの統合

土砂輸送モデルには、江頭、松木、(2000) の貯留土砂を対象としたモデルを用いる。本モデルは、流域を単位斜面・単位河道の集合体と捉え、降雨を入力とした流出計算と、単位河道内の水・土砂の移動を同時に解析する。降雨流出計算には、表面流・中間流統合型のKinematic wave法による解析を行い、流砂形態は掃流砂・浮遊砂・ウォッシュロードを扱うものとした。土砂供給モデルによって得られる土砂供給量は、粒径毎に各単位河道の河床変動量として与える。以上の計算により、任意の単位河道における河床変動量、水位、流砂量、河床材料の粒度分布等を得ることができる。

2.5 小規模ハザード群の発生指標の評価

災害時に発生する小規模ハザードは多様であり、現時点で個々のハザードの発生を個別に評価するのは困難である。そこで本論では小規模ハザード群の誘因毎に降雨由来のもの（降雨ハザード）、斜面崩壊由来のもの（崩壊ハザード）、河道の高い水位が由来のもの（水位ハザード）と分類した。各群に含まれる現象はTable 1に示す。ここで本研究では各群

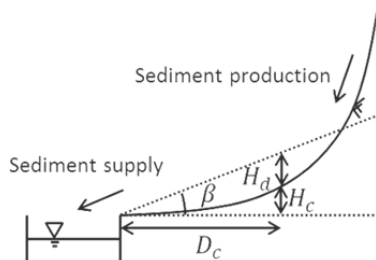


Fig.4 Definition of depositable depth

Table 1 Target hazards and its inducements

Inducement	Example of Hazards
Strong rainfall (A)	Road submergence Poor visibility
Landslides (B)	Slope failure Sediment inflow
High water level (C)	Overtopping of river dike Flood and inundation

に属するハザード群の発生指標を下記の無次元指標によって評価した。まず、降雨ハザードの発生指標 R_A は時刻 t における雨量強度を $I(t)$ 、基準雨量強度を I_{cr} として、

$$R_A = \frac{I(t)}{I_{cr}} \quad (7)$$

とした。次に、崩壊ハザードの発生指標 R_B は、時刻 t の前後1時間に発生と判定される斜面崩壊個数を $N_t(t)$ 、流域内の全斜面数を N_s として、

$$R_B = \sqrt{\alpha \frac{N_t(t)}{N_s}} \quad (8)$$

と評価した。なお、経験的に、斜面崩壊発生個数は雨量強度の2次関数で表される（内荻ら，1971）ことが知られているため、 R_A と並列に比較するために R_B は崩壊発生数の1/2乗の関数形としている。最後に水位ハザードの発生指標 R_C は、代表地点の水位を $H_w(t)$ 、基準水位を H_{wcr} として

$$R_C = \frac{H_w(t)}{H_{wcr}} \quad (9)$$

と評価した。

3. 丹波災害時の降雨データを用いた適用

3.1 解析条件

近隣の雨量観測所である国土交通省の北岡本雨量観測所にて観測された、丹波市の災害時の時間雨量と累積雨量をFig.5に示す。本降雨の特徴は、最大時間雨量が91mm、最大24時間雨量が414mmに達し、いずれも過去最大値を大きく上回っていることである（松村ら，2015）。また、災害発生時刻が深夜であったことや、災害発生時刻付近の雨量強度がきわめて強いこと、さらに斜面崩壊に伴う土砂生産の発生が広範囲で確認されており、生産土砂が河道に供給されたことに伴う河床上昇によって洪水が助長されたと推定できることを鑑みると、多様なハザードが発生し災害発生時刻付近に避難するのは困難であった可能性が高い。本章ではこの降雨データを用いた計算を行い、計算手法の適用性と妥当性の検証を行う。他の計算条件はTable 2 に、使用した粒度分布はFig.6に示す。ここでは、河床と生産土砂に別々の粒度分布を与えた。

3.2 解析結果

流域内の時刻別の斜面崩壊発生個数はFig. 7のようになった。降雨強度が40mm以下で推移した8月16日1時までは斜面崩壊の発生個数はわずかであるが、1時を過ぎて降雨強度が50mmを超えると多数の斜面崩壊が発生するという計算結果となった。また、各

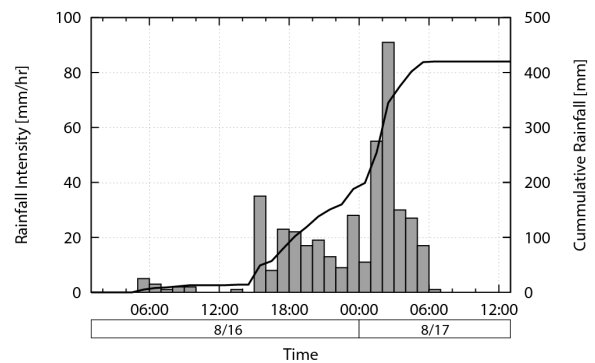


Fig.5 Rainfall data observed at Kitaokamoto station

Table 2 Various condition of calculation

Depth of A-layer [m]	0.2
Depth of B-layer [m]	0.7
Transmissibility of A-layer [m/s]	0.01
Transmissibility of B-layer [m/s]	0.0001
Manning number on channel[m ^{-1/3} s]	0.03
Manning number on slope[m ^{-1/3} s]	0.07
Time step [s]	1
Width of landslide [m]	10

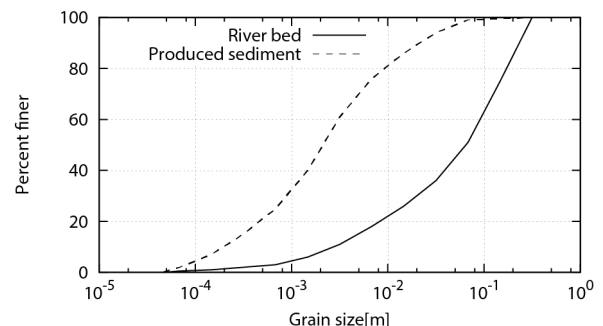


Fig.6 Grain size distribution of river bed material and produced sediment

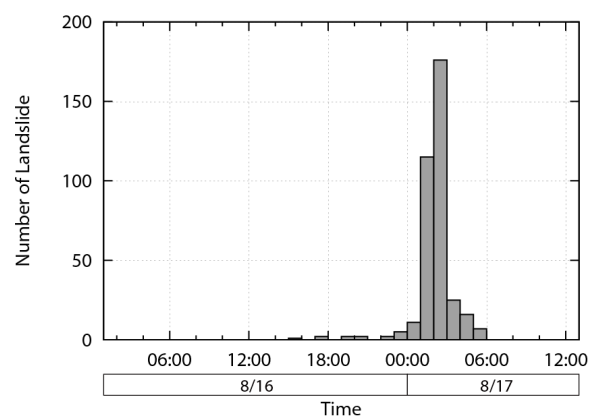


Fig.7 Occurrence number of landslide

単位斜面上の土砂生産量と土砂供給量はFig.8に示す。斜面崩壊の発生個数は364個、土砂生産量の合計は688,163m³であった。松村ら（2015）は航空レーザ測量データを用いた標高差分図とオルソ画像を用いて、斜面崩壊の発生個所を714箇所、本土砂災害による土砂生産量を1,034,889 m³と算出している。松村らの対象とする範囲は、本研究が対象としている前山川流域を内包する広い流域であり、単純に比較するのは不合理であるが、斜面崩壊の大半が前山川流域で発生していることを鑑み、本モデル計算の土砂生産量の計算結果が松村らのおよそ7割弱程度であることから、おおよそ近い値が得られていると判断できる。

また、河道に供給された土砂量の合計は525,596m³となった。平らな面積の少ない上流部では生産土砂の大半が河道に供給されたが、下流部では平野部に堆積可能な量が大きいため生産量に対して供給量は相対的に小さくなった。また、Fig.1およびFig.3に示したPoint A直上に合流する単位河道に10,964m³の土砂供給が生じており、この付近で実際に生じた土砂の河道への供給を再現できていると考えられる。

次に、Point A~Cにおける水位と河床変動量の計算結果をFig.9に示す。ここでは、初期河床の高さを基準とした水面の高さを水位として示しており、洪水中に河床が上昇した場合は河床上昇分が水位に加わっている。Point AおよびPoint Bでは、17日2時頃までは流量の増加による緩やかな水位の上昇が見られるのみであるが、17日2時~3時頃に土砂生産・供給が発生してから急激に水位が上昇しており、土砂の流入が洪水を助長されたものと考えられる。また、流域の下流にあるPoint Cでは急激な水位の上昇は見られないものの、上流から伝播した土砂によって河床が上昇し、比較的遅い時間帯まで水位の高い状態が継続していることがわかる。この地点付近には指定避難所である前山小学校が位置しており、避難経路に使用されると考えられる道路は河道に沿って位置し

ていること、および小学校が河道のすぐそばに位置していることから、水位が上昇した2時以降の避難には危険が伴うものと推定される。

最後に小規模ハザード群の各発生指標の時間変化をFig.10に示す。ここでは、雨量ハザードの基準となる雨量を、気象庁が“水しぶきであたり一面が白っぽくなり、視界が悪くなる”としている $I_{cr} = 50$ [mm]とした。崩壊ハザード指標は、実際に斜面崩壊による被害が生じた1:00~3:00の時間帯が1以上の値となるように、 $N_s = 10$ と設定した。また、水位ハザード

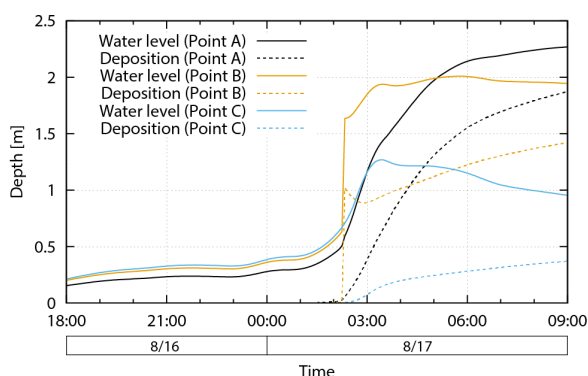


Fig.9 Water level and deposition depth at 3 points in Sakiyama river watershed

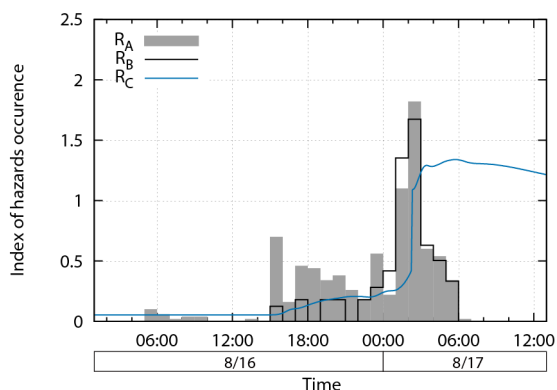


Fig.10 Temporal change of the 3 indexes

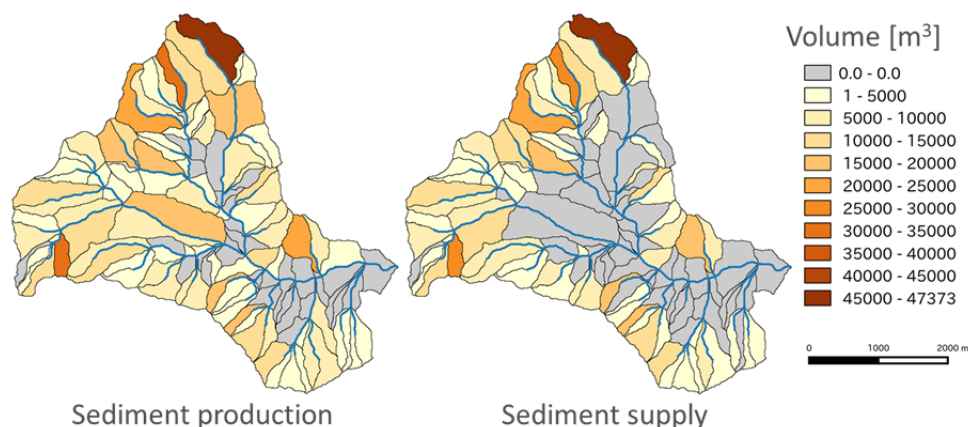


Fig.8 Calculated volume of sediment production and sediment supply

の発生指標は、流域のほぼ中心部であるPoint Bを代表地点とし、測量結果を参考に基準水位を $H_{wcr} = 1.5[m]$ と設定した。Fig.10から、8/16日深夜0:00までは各ハザード群の指標は小さく、避難の危険性は比較的小さかったものと推定される。しかし、雨量強度が増加し始める8/17日1:00を過ぎると、崩壊ハザードと雨量ハザードの発生指標が1を超えて危険な状態となり、2:00を過ぎると発生した斜面崩壊の生産土砂が河道に流入することで水位上昇が起き、水位ハザードの指標も急激に上昇する。降雨のピーク後も、生じた土砂が河床に残存することで高い水位は継続するため、1:00以降水位ハザードの指標は高い状態が長く続いたものと推定される。

4. 異なる降雨に対するハザード群発生指標の特性

災害時にハザード群の発生を考慮した警戒避難を行うには、どのような降雨に対してどのようなハザードが発生するのかを評価しておくことが有効と考えられる。そこで本章では、近年土砂災害を発生させた降雨データを用いた解析を実施し、同様の手法によって各ハザード群の発生指標を抽出した。使用した降雨データは、H25伊豆大島災害の降雨（気象庁アメダス大島；最大雨量強度119mm/hour，総降雨量824mm），H25広島災害の降雨（気象庁アメダス三入；最大雨量強度101mm/hour，総降雨量283mm），H23紀伊半島災害の降雨（気象庁アメダス上北山；最大雨量強度46mm/hour，総降雨量1814mm）である。丹波市の災害の降雨と比較すると、大島のは最大雨量強度および総降雨量が双方大きい。三入の降雨は、最大降雨強度は上回るが総降雨量は丹波市災害の6割程度である。逆に上北山の降雨は、最大雨量強度は丹波市災害の半分程度であるが、総降雨量は4倍程度と大幅に大きい。これらの雨を用いた場合の各ハザード群の発生指標の時間変化はFig.11のようになった。

大島の降雨を用いた場合は、降雨ハザード指標のピークよりも早い段階で斜面崩壊ハザードの発生指標が増加する。続いて水位ハザードの指標も雨量ピークよりも先に上昇する。本計算では河道外への水の流出を考慮していないため、土砂と水の大規模な流入があると過剰な水位上昇が生じてしまうが、これは洪水氾濫の危険性が極めて大きい状態と解釈できる。またいずれの指標も丹波市災害時の降雨と比較して大きくなる。このため、大島の降雨の場合、災害の初期段階を過ぎると各種ハザードが複合的に発生し、避難が極めて困難になると推定される。

三入の降雨の場合、降雨ハザード指標の最大値は

丹波市災害のものよりも大きい、他の指標は相対的に小さくなる。斜面崩壊の発生数は少なくそれによる河床上昇はわずかであり、水位ハザードの発生指標は小規模である。しかし、現象は他の降雨に比べて短時間で発展し、ほとんどが2時間度で完結するため、避難のタイミングを見極めるのは難しいと考えられる。

最後に上北山の降雨が生じた場合、最大降雨強度が46mm/hourであるため、降雨ハザードの指標は1を超えることなく推移する。崩壊ハザードの指標も、比較的小さい状態で長時間推移する。しかし、長時間土砂生産が発生するため、徐々に河床上昇が進展する。この結果、水位ハザードの指標は大島の降雨と同様極めて大きくなる。しかし、その上昇速度は比較的緩やかであり、大島のもものと比較すると、災害の初期段階であれば余裕をもった避難が可能であると推定される。

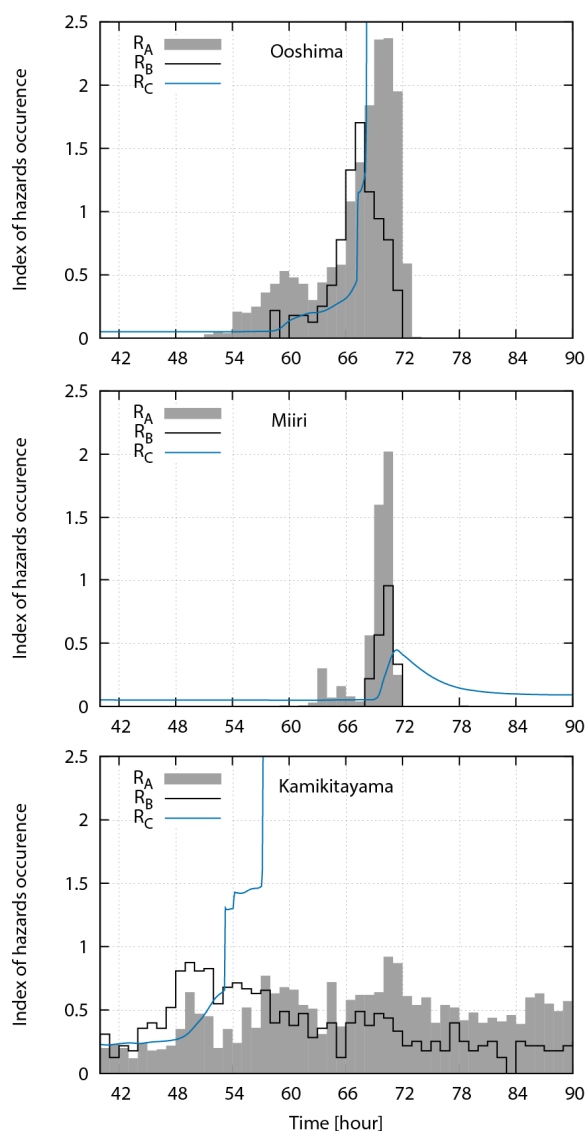


Fig.11 Temporal change of the indexes in 3 different rainfall data

5. 結論

本研究では丹波市で発生した災害に着目し、実際の降雨と過去に災害を発生させた複数の降雨データを用いて土砂流出解析を実施した上で、ハザード群発生指標の抽出を行った。土砂流出解析では、斜面崩壊モデルと土砂流出モデルを組み合わせることで、災害時に発生する現象がある程度再現可能であることを確認した。また、ハザード群の発生を無次元の指標で評価することで、複数の異なる降雨に対する発生特性の評価が可能となった。現時点では実施した解析パターン数が限られるため、一般化された議論を行うのは困難であるが、結果から下記のことが類推された。

- ・三入の降雨のように最大雨量強度は大きい、総降雨量が小さい降雨の場合、降雨ハザード以外のハザード群の発生指標は小規模である。
- ・上北山の降雨のように最大雨量強度は小さく、総降雨量が大きい降雨の場合、崩壊と水位のハザード発生指標は極めて大きくなるが、指標の上昇速度は比較的緩やかである。
- ・大島の降雨のように最大雨量強度と総降雨量が双方大きい雨の場合、いずれの指標も大規模となるため、災害の初期段階以降の避難は困難になると推定される。

参考文献

- 秋山怜子・石塚忠範・吉永子規・水谷佑・森田耕司（2014）：平成25年10月伊豆大島豪雨災害における土砂流下範囲と被害発生時刻，砂防学会誌，Vol.67，No.4，pp.3-12.
- 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（2014）：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.
- 江頭進治・松本敬（2000）：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，No.44，pp.735-740.
- 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）：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.
- 国土交通省河川局砂防部・気象庁予報部（2005）：都道府県と気象庁が共同して土砂災害警戒情報を作成・発表するための手引き，2pp.
- 堤大三・藤田正治・林雄二郎（2007）：2005年台風14号により大分県竹田市で発生した斜面崩壊に関する数値シミュレーション，水工学論文集，No.51，pp.931-936.
- 奈良県県土マネジメント部深層崩壊対策室（2015）：紀伊半島大水害における被害・避難実態聞き取り調査結果，紀伊半島大水害大規模土砂災害アーカイブ，No.2-07，35pp.
- 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（2015）：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.
- 山野井一輝・藤田正治（2014）：土砂生産・土砂供給・土砂輸送堆積統合型モデルの開発と山地流域への適用，水工学論文集，No.58，pp.1925-1930.
- Chen, Chen-Yu (2014): A Decision Support System for Warning and Evacuation against Multi Sediment Hazards, Thesis presented to Kyoto University.

（論文受理日：2015年6月11日）