

【建設工学研究所論文報告集第 58 号〔報告〕2016 年 11 月】

## 表層崩壊リアルタイムハザードシステム構築について

### -朝来市域のモデル構築（その 1）-

#### The Construction of Real-time Slope Failure Prediction Model in Asago city

鏡原 聖史      沖村 孝      鳥居 宣之      中川 渉  
Satoshi Kagamihara   Takashi Okimura   Nobuyuki Torii      Wataru Nakagawa

原口 勝則      根本 信行      植田 允教  
Katsunori Haraguchi   Nobuyuki Nemoto      Mitsunori Ueda

#### 1. はじめに

著者らは、気象庁による観測雨量ならびに予測雨量を入力し、リアルタイムで表層崩壊の危険度を評価するシステムの構築・運用を兵庫県と共同で進めている。システムの構築に際して生じた課題と対策はこれまで数多く報告<sup>1)~6)</sup>されている。

本報告は、平成 21（2009）年台風 9 号の豪雨によって多くの山腹崩壊が発生した朝来市域を対象に、台風の豪雨によって崩壊した崩壊地の特徴について分析、考察を加えた。つぎに、兵庫県下で構築されている表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築手順<sup>7)</sup>に従って朝来市域に適用して、台風時をシミュレーションした結果について報告する。さらに、沖村ら<sup>8)</sup>が提案している新しい崩壊判定基準を設定した事例について報告する。

#### 2. 朝来市の地形・地質概要<sup>9)</sup>をもとに編集

##### 2. 1 地形概要

朝来市は、兵庫県のほぼ中央部に位置し、市域は南北約 32km、東西約 24km の範囲に広がり、日本海へ流れる円山川と瀬戸内海へ流れる市川の源流地域で、兵庫県の南北の分水嶺である。総面積は 403.06km<sup>2</sup>、兵庫県全体の 4.8% を占めている。

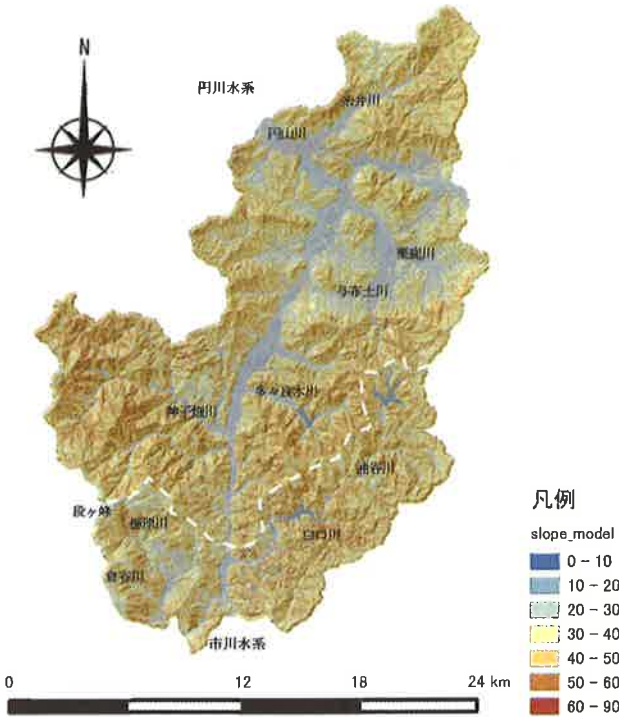
上述したように朝来市域は大きく分けて日本海へ流れる円山川と瀬戸内海へ流れる市川の 2 つの水系からなる。また、市域は山地が広い範囲を占め、段ヶ峰（1,103m）を始めとする 500~1,000m の山地が平地部を取り囲んでいる。平地部は円山川とその支川（糸井川、与布土川、栗鹿川、多々良木川、神子畑川）及び市川沿いに発達している。

兵庫県が計測した航空レーザー測量データならびに国土交通省近畿地方整備局六甲砂防事務所が計測した航空レーザー測量データの 1mDEM を用いて朝来市域の 10mDEM を作成した。図-1 に 10mDEM を用いて作成した傾斜区分図を示した。この図から傾斜角 30 度以上の斜面が市域に広く分布している状況が確認できる。

##### 2. 2 地質概要

市域の地質は、図-2 に示すように河川沿いの平地部に分布する沖積層と山地部に分布する基盤岩類などからなる。

基盤岩類は、火山性岩石（生野層群など）、深成岩類（花崗岩など）、堆積岩（超丹波帯、丹波帯など）および岩脈類からなる。市域南部には火山岩、凝灰岩、泥岩などが交互に重なる一連の地層である生野層群が広く分布している。市

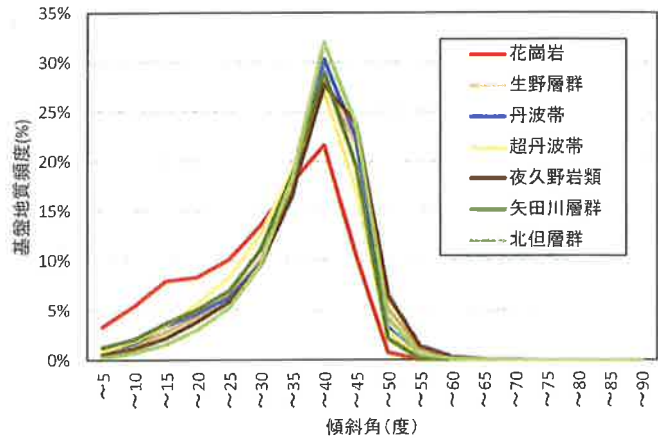


図一 朝来市域の傾斜区分図



図二 朝来市の地質図<sup>10)</sup>をもとに作成

域西部の神子畑川周辺には、変花崗岩、斑れい岩からなる夜久野岩類が分布している。市域中央から東部にかけて粘板岩、頁岩、砂岩互層、混在岩、チャート、緑色岩など複雑な地層である超丹波帯、丹波帯が分布している。市域中央部には、花崗岩、市域北部には石英安山岩、安山岩質溶岩及び火砕岩類、頁岩、凝灰岩、流紋岩からなる矢田川層群と礫岩、砂岩からなる北但層群が分布している。このように朝来市域は非常に複雑な地質構造で形成されている。朝来市域に分布する基盤地質の傾斜角の分布を図-3に示した。なお、第四紀火山岩類および沖積層は、傾斜角が緩く崩壊が発生し難いことから基盤地質の傾斜角の分布の整理から除外した。この図に示すように山地を形成する基盤地質は40~45度をピークに分布しており、非常に急峻な斜面であると言える。花崗岩は、他の基盤地質と比較して、15~30度の緩傾斜地が多い特徴を有している。



図三 基盤地質の傾斜分布

### 3. 近年の土砂災害の概要

朝来市の災害履歴について、朝来市地域防災計画<sup>9)</sup>を参照すると朝来市は、過去からたびたび台風・集中豪雨・降雪による被害が発生している(近年の風水害被害状況を表-1に示した)。代表的な風水害である昭和34(1959)年伊勢湾台風(台風第15号)、昭和40(1965)年台風第23・24号及び秋雨前線による豪雨では被害は発生しているものの、幸いにも死者ゼロ名であった。平成16(2004)年台風第23号による土砂災害では死者1名、平成21(2009)年台風第9号では、避難中に1名の方が亡くなっている。本研究では既往災害事例として、平成21(2009)年台風第9号の災害について詳しく述べる。

表-1 朝来市における近年の土砂災害<sup>9)</sup>

発生年月	災害気象	地域別	被害戸数		死者・負傷者		摘要
			浸水家屋	倒壊家屋	死者	重軽傷者	
S34.9.26	伊勢湾台風	生野	110	1	0	0	町広報から
		和田山	659	16	0	5	"
		山東	808	11	0	0	"
		朝来	557	6	0	87	"
		計	2,134	34	0	92	
S40.9.10~ S40.9.17	台風第23・24号 秋雨前線	生野	161	3	0	0	町広報から
		和田山	1,541	10	0	0	"
		山東	636	5	0	4	"
		朝来					不明
		計	2,338	18	0	4	
S51.9.8~ S51.9.13	台風第17号 秋雨前線	生野	15	0	0	0	町広報から
		和田山	135	0	0	0	"
		山東	6	0	0	0	"
		朝来					不明
		計	156	0	0	0	
S62.10.17	台風第19号	生野	2	0	0	0	地域防災計画から
		和田山	25	0	0	0	水害統計調査から
		山東	19	0	0	0	町広報から
		朝来	72	0	0	2	"
		計	118	0	0	2	
H16.10.20	台風第23号	生野	1	0	0	0	旧町資料から
		和田山	88*	6**	1	1	"
		山東	12*	2**	0	0	"
		朝来	27*	0	0	0	"
		計	127	8	1	1	
H21.8.9~ H21.8.10	台風第9号	生野	-	-	-	-	市広報から
		和田山	-	-	-	-	"
		山東	-	-	-	-	"
		朝来	273	9	1	2	"
		計	273	9	1	2	"

\*:床上+床下 \*\*:全壊のみ

## 4. 平成21(2009)年台風9号による気象ならびに土砂移動の概要

## 4.1 平成21(2009)年台風9号による気象概要

平成21(2009)年8月、熱帯低気圧が台風9号となり、九州地方から東北地方の広い範囲で大雨となった。とりわけ兵庫県佐用郡佐用町佐用では、観測記録を更新する時間降水量89mmという猛烈な降雨を記録<sup>11)</sup>した。佐用町を含む兵庫県北西部においては、洪水災害および土石流・がけ崩れなどの土砂災害が多数発生し、尊い人命が奪われるとともに一般住宅、公共諸施設等に甚大な被害をもたらした。朝来市においてこの台風9号による降雨は、図-4に示すように、8月8日までほとんど降雨がなく、9日から10日までの間に集中して233mm、特に10日1時に50mmを越える降雨を記録している。また、最大24時間降水量の分布は、兵庫県北西部を中心とする非常に狭い地域に300mmを超える降雨が集中しており、北東方向に200mm以上の降雨が分布している<sup>12)</sup>。この降雨は気象レーダ画像<sup>13)</sup>で帯状に観測された雨雲の地域とも一致している。この降雨によって兵庫県北西部地域(佐用町、宍粟市、養父市、朝来市、神河町、市川町、多可町、姫路市、福崎町)においては、道路沿い、民家裏の山腹斜面が崩壊したり、崩壊土砂が土石流となり河川まで流下したりして、主に道路不通や民家損壊等の被害を多数箇所発生させた。

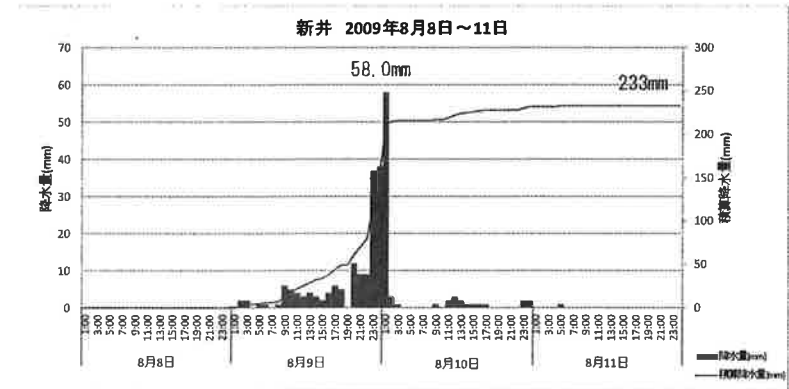


図-4 時間雨量と累積雨量の関係(新井観測所)

#### 4. 2 台風の豪雨による朝来市域の土砂移動の特徴

朝来市域で発生した代表的な土砂移動は、写真-1、2に示すような人家裏の表層崩壊や土石流が数多く確認されている。特に写真-1に示したように過去の風倒木跡地での崩壊も多く見られた。ここでは、この台風によって発生した土砂移動の特徴を明らかにするために、台風前後に撮影された空中写真を用いて崩壊地を判読、分布図を作成した。さらに判読した崩壊の発生場の条件を把握するため、基盤地質、斜面傾斜などとの関係を調べた。



写真-1 山腹崩壊の状況 (兵庫県提供)



写真-2 土石流による被災状況 (兵庫県提供)

##### 4. 2. 1 崩壊地の分布状況

崩壊地は、平成 21 (2009) 年前後 (前：平成 18 年撮影、後：平成 22 年ならびに 25 年撮影) の空中写真を収集し、空中写真判読を行い、航空レーザー測量 (1mDEM) から作成した 1m コンター図に転記した。

判読した崩壊地は、151 箇所その位置を地質図に示した (図-5)。この図に示すように市域で崩壊地は分布するも

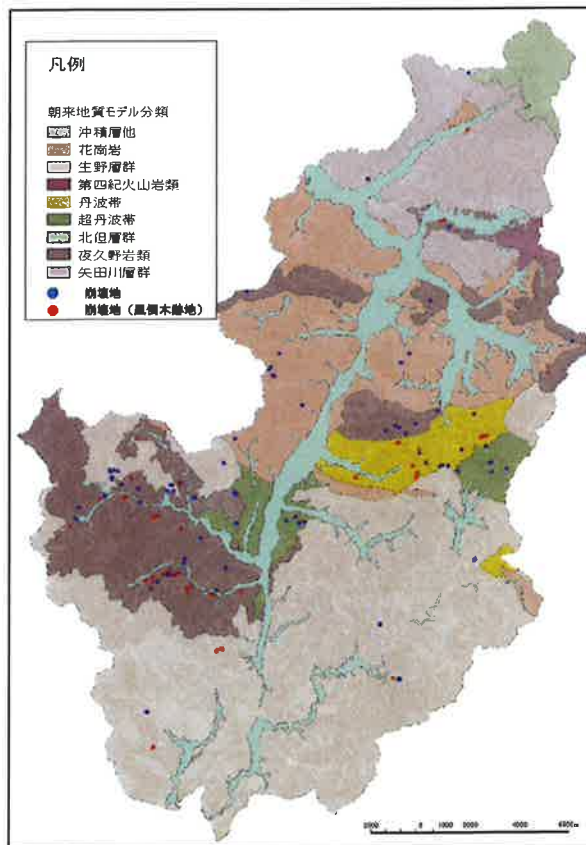


図-5 地質と崩壊地の分布状況

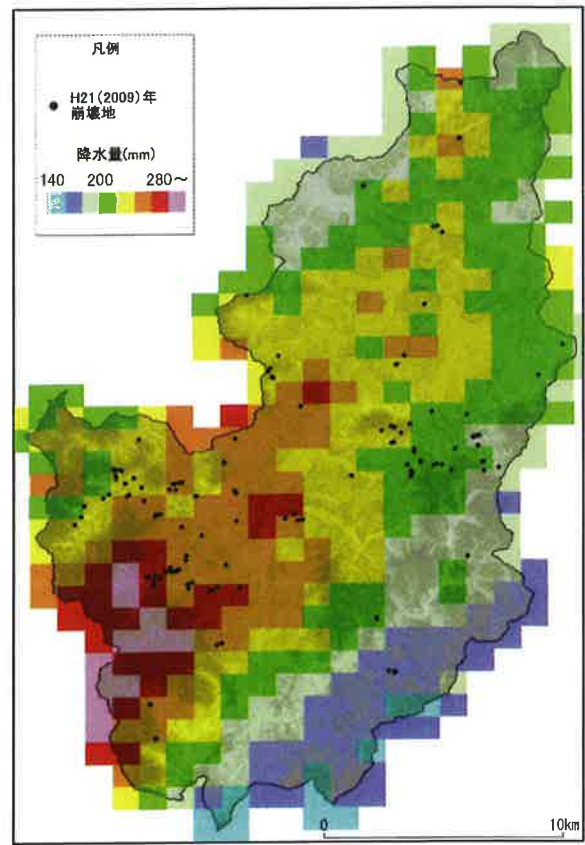


図-6 総雨量と崩壊地の分布状況 (解析雨量を整理)

の特に夜久野岩類及び丹波帯、生野層群に集中していることがわかる。つぎに崩壊地の分布と解析雨量をもとに集計した総雨量の関係を図-6に示した。この図から総雨量200mm以上の場所で崩壊が多く発生していると言える。

鏡原ら<sup>14)</sup>は、過去の風倒木跡地で表層崩壊が多いことを指摘している。当該市域でも2004(平成16)年に風倒木被害が多く発生していることから、崩壊箇所が過去(2004(平成16)年)の風倒木跡地内にあるか空中写真判読により判読し整理した。整理結果を表-2に示した。その結果全体の42%が過去の風倒木跡地で発生していることがわかった。つぎに、過去の風倒木跡地における崩壊箇所数を基盤地質ごとに整理した(図-7参照)。この図に示すように生野層群、丹波帯、夜久野岩類、矢田川層群の崩壊地は、過去の風倒木跡地で多く発生していることがわかる。

過去の風倒木跡地での崩壊は、風倒木被害が発生した際に土壌が攪乱され、降雨を遮断する樹木も無い状態にあり、降雨が地山に浸透しやすく、表層部が高飽和度状態となり、土のせん断強度が低下することによって急傾斜の斜面が崩壊したものと考えられる<sup>14)</sup>。

表-2 全体の崩壊箇所と過去の風倒木跡地箇所の崩壊箇所

崩壊箇所(箇所)	過去の風倒木跡地における崩壊箇所数(箇所)
151	64

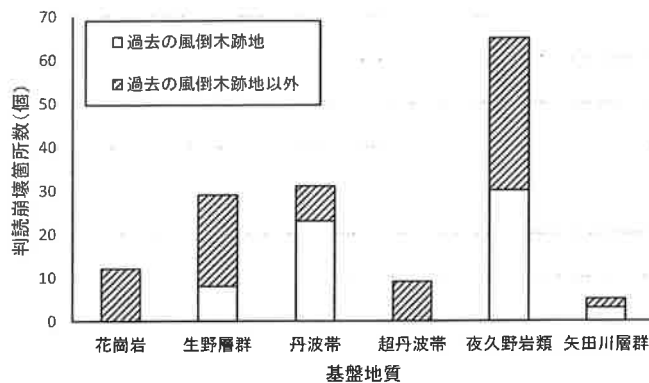


図-7 過去の風倒木跡地における崩壊箇所数

#### 4. 2. 2 崩壊発生箇所の地形・地質的特徴

崩壊発生箇所の地形・地質的特徴を把握することを目的にGISを用いて検討を行った。崩壊発生箇所の分析に当たっては、降雨による崩壊発生箇所の地形・地質的特徴を分析することを目的としたため、風倒木被害における影響を強く受けていると考えられる風倒木跡地における崩壊箇所は、分析の対象から除外した。したがって、表-2に示した151箇所のうち87箇所の崩壊箇所を対象とした。

##### 1) 谷密度の定義

谷密度は、基盤地質毎に代表的な流域を数カ所抽出し、水系網を作成して、0次谷までの溪流総延長(km)をその流域面積(km<sup>2</sup>)で除して求めた。求めた基盤地質ごとの流域の谷密度を平均し、基盤地質毎の谷密度と定義した。整理した結果を図-8に示した。図から谷密度は、9.7~14.1km/km<sup>2</sup>の範囲を示している。また、この図から生野層群、花崗岩、北但層群、夜久野岩類の谷密度が高く、超丹波帯、丹波帯、矢田川層群の谷密度が低いことがわかる。

##### 2) 起伏量の定義

起伏量は、谷密度の算定時に抽出した流域の標高地の最高と最低の差を求め、基盤地質毎で平均し、基盤地質毎の起伏量と定義した。整理した結果を図-9に示した。この図から夜久野岩類の起伏量(349m)が大きく、矢田川層群の起伏量(176m)が小さい。その他の地質は、240~280m程度の起伏量を示している。

##### 3) 斜面崩壊密度の定義

斜面崩壊密度は、基盤地質の分布面積(km<sup>2</sup>)に占める斜面崩壊個数(個)として整理した。なお、風倒木跡地で発生し

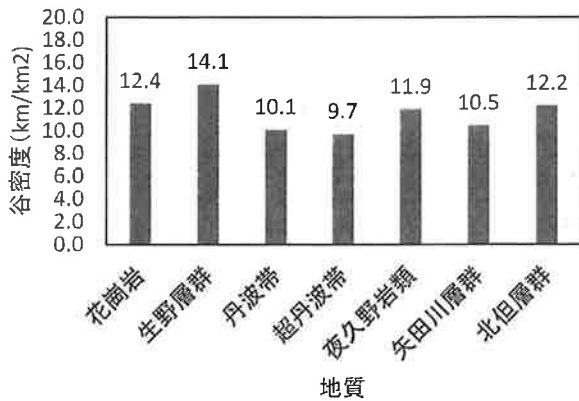


図-8 谷密度の関係

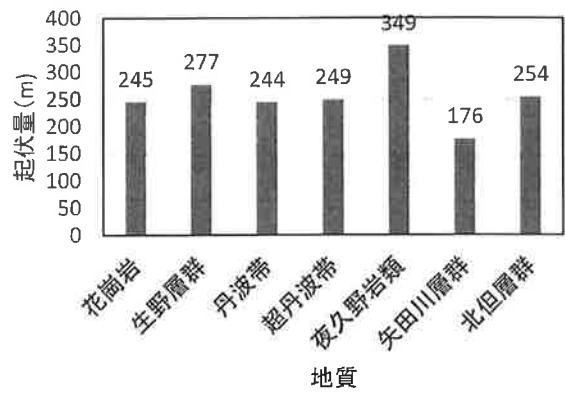


図-9 起伏量の関係

た崩壊箇所は先にも述べたように、地形、地質の影響より風倒木による影響を強く受けていると考えられるため、検討から除いている。

4) 谷密度と斜面崩壊密度

図-10 に谷密度と斜面崩壊密度の関係を示した。この図から起伏量の小さい矢田川層群を除き、谷密度が高くなるほど斜面崩壊密度が低くなる負の相関が認められる。

5) 起伏量と斜面崩壊密度

図-11 に起伏量と斜面崩壊密度の関係を示した。この図からばらつきがあるものの起伏量が多いほど斜面崩壊密度が大きくなる正の相関が認められる。

一般的に谷密度が高ければ起伏量が小さくなると考えられ、斜面長が短くなるために斜面崩壊密度が低くなると考えられる。図-10、図-11はこの傾向を大局的に示しているが、一部例外もある。

6) 降雨と斜面崩壊密度

累積雨量と斜面崩壊密度の関係を図-12 に示した。ここで、累積雨量は、崩壊箇所の解析雨量を8月9日 AM1:00~8月12日 AM1:00の期間で累積し、基盤地質毎の最大値を示している。この図から崩壊は累積雨量 230mm 以上で発生しており、丹波帯を除き累積雨量が多いほど斜面崩壊密度が高くなっている。丹波帯の累積雨量が少ないにもかかわらず斜面崩壊密度が高い理由については、崩壊箇所の特徴で考察する。

つぎに、最大時間雨量と斜面崩壊密度の関係を図-13 に示した。ここで、最大時間雨量は、

崩壊箇所の解析雨量を8月9日 AM1:00~8月12日 AM1:00の内、最大時間雨量を抽出し、基盤地質毎の最大値で示している。この図から最大時間雨量 40mm/h 以上で崩壊が発生しており、ばらつきは大きいですが最大時間雨量が多いほど

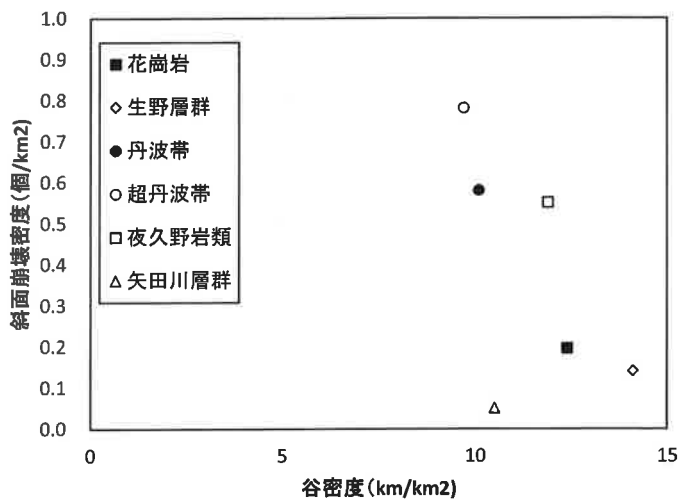


図-10 谷密度と斜面崩壊密度の関係

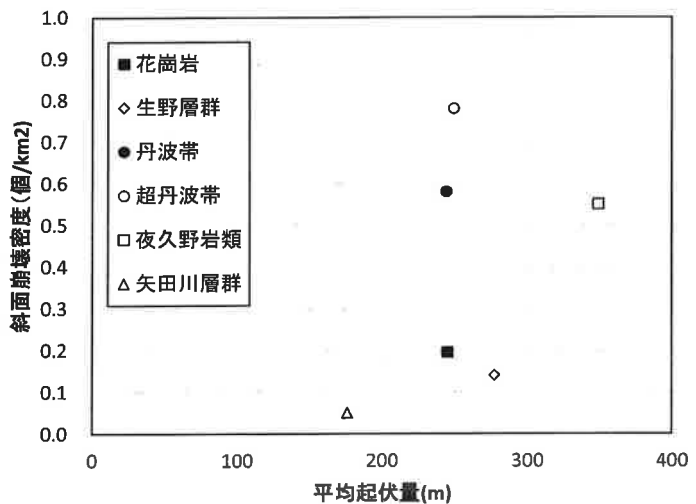


図-11 起伏量と斜面崩壊密度の関係

斜面崩壊密度が高くなっている。両図から累積雨量が 230mm 以上、短時間雨量が 50mm 以上となると斜面崩壊密度が高く、矢田川層群では、平均起伏量が小さく最大時間雨量が 40mm 程度であったため、斜面崩壊密度が他の地質と比して低い結果となったものと推察できる。

7) 斜面傾斜角と崩壊箇所数

崩壊箇所の地形条件を把握するために斜面傾斜角と崩壊個数の関係を求めた。斜面傾斜角は、沖村らの方法<sup>15)</sup>を参照して 10m 格子の 4 点の標高から 1 次傾向面に近似し求めた。地質毎の崩壊箇所数と地表面最大傾斜角の関係を図-14 に示した。

図から、花崗岩は、35~45 度、生野層群と夜久野岩類は 35~40 度、丹波帯、超丹波帯は 40~45 度、矢田川層群は 30~35 度に崩壊が集中している。この図と図-3 から矢田川層群を除き、基盤地質の傾斜分布のピークまたはそれ以上の傾斜角での崩壊が多い。一方、起伏量の小さな矢田川層群は、基盤地質の傾斜分布のピークより小さい傾斜での崩壊が見られる特徴がある。これは先に述べた最大時間雨量が 50mm/h 以上では急な傾斜での崩壊が多く、40mm/h 程度の矢田川層群ではゆるい傾斜での崩壊となっていることと関係していると推察される。最大時間雨量が大きい基盤地質の場所では、降雨は地中に浸透しきれず、表面流となって流下し、極限状態の急斜面を侵食するなどして不安定化し、崩壊が発生したものと考えられる。図-15 は、急斜面で崩壊した場所の地形状況を示している。この図に示しているように斜面上部の急な斜面の崩壊が多く発生していることが確認できる。一方、最大時間雨量が小さい矢田川層群では、降雨が地中に浸透し、集水された地下水位の上昇によって不安定化し崩壊したものと考えられる。図-16 は、矢田川層群で発生した崩壊箇所の地形状況を示している。この図に示すように緩やかな傾斜で、わずかな谷地形を呈する箇所が発生していることが確認できる。

4. 2. 3 崩壊箇所の特徴

崩壊箇所の特徴として、風倒木跡地での崩壊箇所を除いて、谷密度、起伏量、累積雨量、最大時間雨量、崩壊箇所の斜面傾斜角を整理した。その結果、斜面崩壊密度と谷密度の関係では、谷密度が高くなるほど斜面崩壊密度が低くなる負の相関が認められた。また、起伏量と斜面崩壊密度の関係では、起伏量が大きいほど斜面崩壊密度が大きくなる正の相関が認められた。さらに斜面崩壊密度と累積雨量ならびに時間雨量の関係から累積雨量が 230mm 以上、短時間雨量が 50mm 以上となると斜面崩壊密度が高くなっていた。

斜面傾斜角と崩壊個数の関係の整理の結果、矢田川層群を除き、基盤地質の傾斜分布のピークまたはそれ以上の傾斜角での崩壊が多く、矢田川層群は、基盤地質の傾斜分布のピークより小さい傾斜での崩壊が多い特徴が認められた。これは、降雨は地中に浸透しきれず、表面流となって流下し、極限状態の急斜面を侵食するなどして崩壊が発生し、逆に最大時間雨量が小さいと降雨が地中に浸透し、集水された地下水位の上昇によって不安定化し崩壊したものと考えられ

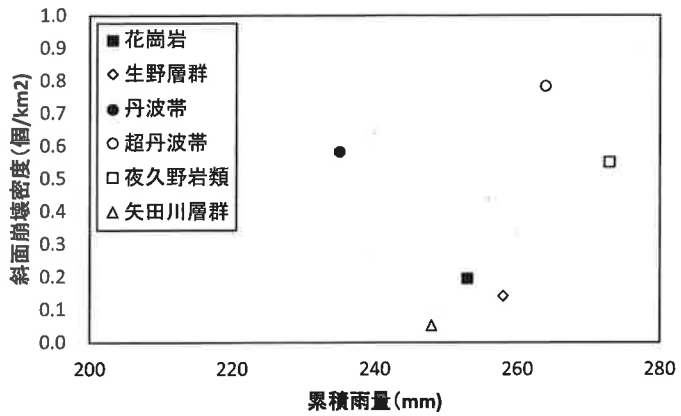


図-12 斜面崩壊密度と累積雨量の関係

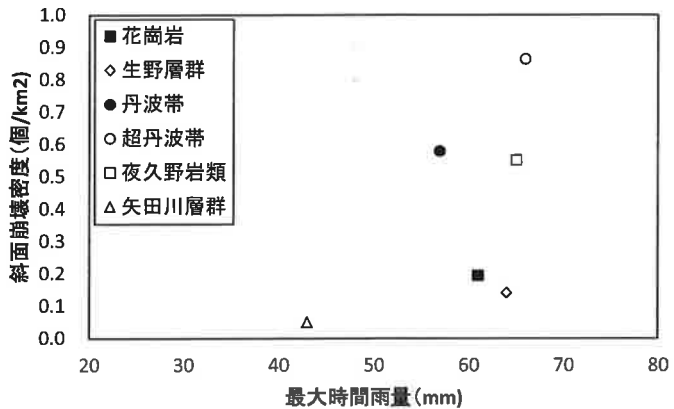


図-13 斜面崩壊密度と最大時間雨量の関係

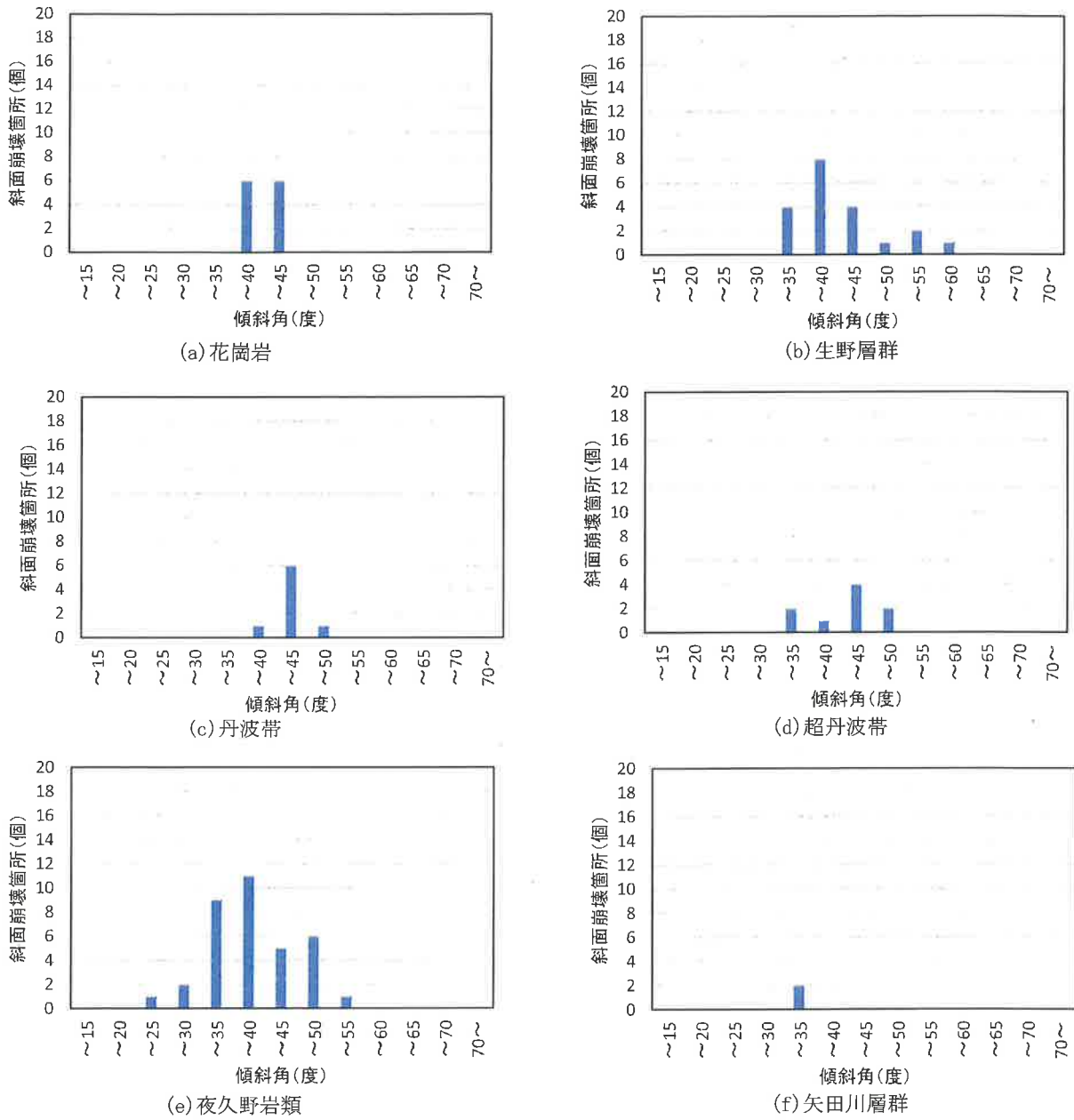


図-14 地質毎の崩壊箇所と地表傾斜角の関係

た。従って、今回の崩壊は、基盤地質の地形条件と最大時間雨量の大きさが関係していると考えられる。

そこで、これまで述べた谷密度、起伏量、降雨量を指標として、羽田野<sup>16)</sup>の提案した地形的滑動示数を参考に、ある基盤地質における流域の単位長さ当たりの奥行き、勾配、流域の見かけの谷幅に最大時間雨量を乗じて、ある強雨による見かけ上の流量(m<sup>3</sup>/s)を意味するパラメーターを定義した。ある強雨による見かけ上の流量(m<sup>3</sup>/s)は、基

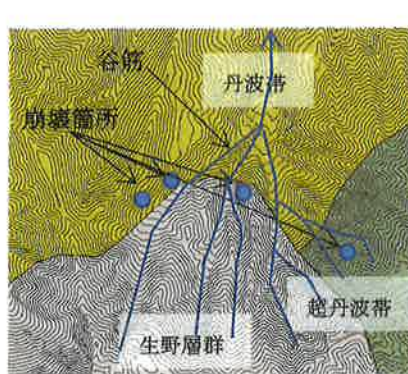


図-15 丹波帯・超丹波帯・生野層群での崩壊箇所



等高線は10m 間隔

図-16 矢田川層群での崩壊箇所



盤地質の単位幅当りの奥行き（流域面積  $A(\text{km}^2)$ /単位長さ  $(\text{km})$ ）、勾配（起伏量  $H(\text{m})$ /溪流長さ  $L(\text{m})$ ）、流域の幅（流域面積  $A(\text{km}^2)$ /溪流長さ  $L(\text{km})$ ）、最大時間雨量  $(R(\text{mm/h}))$  を乗じて求めた。図-17 は斜面崩壊面積率と 2009（平成 21）年台風 9 号の強雨による見かけ上の流量の関係である。この図から見かけ上の流量と斜面崩壊密度が正の相関にあることがわかる。これは先にも述べたように累積雨量が 200mm 程度に達するような状態で強雨（最大時間雨量）を受けると見かけ上の流量が大きくなり、その結果、降雨が土中に浸透せずに浸食による斜面崩壊が多発することを表していると考えられる。

この相関関係 ( $y=27.64x-0.5005$ 、ここで  $y$  は斜面崩壊密度、 $x$  は見かけ上の流量を示す) を用いれば、ある仮定した最大時間雨量が大きい場合に、どの基盤地質で斜面崩壊密度が高くなるかを知ることができる。ハザードシステムのモデル構築の際、この試算をもとに基盤地質毎の土質物性値を決定できると考えられる。

図-18 は、最大時間雨量をすべての基盤地質で 60mm/h 与えた場合の見かけ上の流量と斜面崩壊密度の関係を示したものである。図から超丹波帯、丹波帯、夜久野岩類、矢田川層群、花崗岩、生野層群の順番で斜面崩壊密度が高くなっている。この順番は、累積雨量が 200mm 程度に達するような状態で強雨（60mm/h）を受けた場合に見かけ上の流量が増加し、崩壊しやすい地形条件を有する基盤地質であることを意味している。この結果から、土質物性値は、超丹波帯、丹波帯、夜久野岩類、矢田川層群、花崗岩、生野層群の順序でせん断強さを小さく設定することが考えられる。

以上、崩壊箇所の特徴を整理した結果、ある程度の累積雨量に達し、強雨を受けると、基盤地質の傾斜分布のピークかそれ以上の傾斜の斜面で崩壊が発生し、斜面崩壊密度は見かけ上の流量が大きくなるほど高くなると推察された。また、見かけ上の流量を求めることで、基盤地質ごとのせん断強度の設定の基礎資料とすることができるとわかった。

ただし、今後、別の降雨イベントにおいても同様のことが説明できるか検証を加える必要がある。

## 5. モデル構築と再現計算

表層崩壊リアルハザードシステムを朝来市域に適用して、モデル構築を行い、台風時をシミュレーションした。ただし、先に述べた風倒木跡地の影響や見かけ上の流量で整理した崩壊しやすい基盤地質の特徴を考慮した地盤物性値などは考慮せず、これまでの構築の流れに従ってモデル構築を行った結果について速報的に報告する。

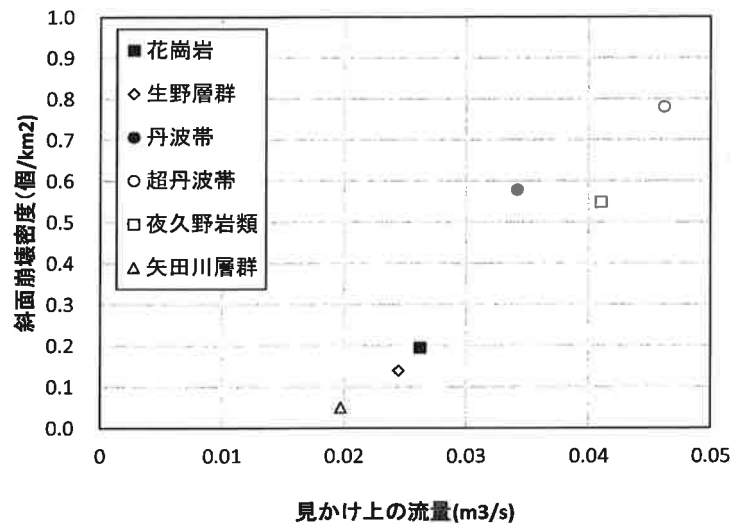


図-17 斜面崩壊密度と見かけ上の流量

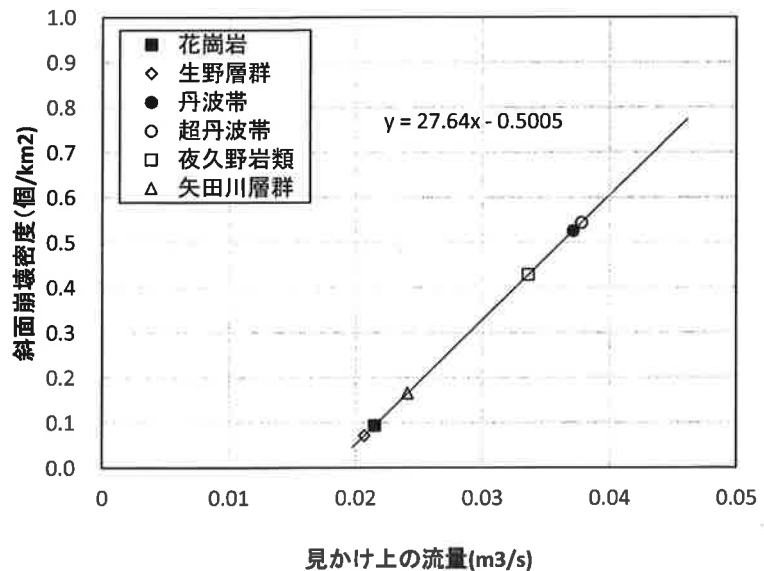


図-18 斜面崩壊密度と見かけ上の流量（最大時間雨量 60mm/h）

5. 1 モデル構築の方法と入力条件

モデル構築は、沖村ら<sup>7)</sup>の作成手順に従って実施した。具体的には、10mDEM で作成した地形モデルに、①地質区分を行い、②平地（人工改変地、水域含む）の除外、③人工改変地（山地）の除外、④水域（山地：ため池）の除外、⑤微地形区分（頂部、谷壁、谷底）、⑥低次谷区分などを行った。構築した地形モデルに、地質と微地形区分をもとにした表土層厚データならびに土質物性値を入力し、地盤モデルを構築した。入力した表土層厚データの一例を図-19 に示した。なお、この表土層厚分布は、既往モデル構築時に整理したものや図に示したように朝来市域で実施した調査結果等に基づき設定している。前章で考察した結果と内容を反映した土質物性値を用いて検証解析する必要があるが、それは次回報告に譲ることとし、土質物性値は、既往モデル構築時の値を暫定値として入力した（表-3 参照）。

表-3 土質物性値一覧（既往モデルを参考に暫定値として設定）

RTHM版 地質分類		生野層群	夜久野岩類	花崗岩	矢田川層群	丹波帯	超丹波	北但層群	第四紀火山 岩類
地質図による分類		生野層群	夜久野層群 夜久野岩類 御祿山層群 難波江層群 舞鶴層群	山陰帯花崗岩類 宮津花崗岩 和田山花崗岩 波賀複合花崗岩体	谷田川層群	丹波層群	超丹波帯地層群	北但層群 豊岡累層 八鹿累層 高柳累層	第四紀火山 岩類
1	土の単位体積重量	[kN/m <sup>3</sup> ]	16	16	17	16	16	16	16
2	土の飽和単位体積重量	[kN/m <sup>3</sup> ]	19	19	19	19	19	19	19
3	土の有効粘着力	kN/m <sup>2</sup>	5	5	5	5	5	6	5
4	土の有効内部摩擦角	[deg]	32	32	31	32	31	25	28
5	有効空隙率	-	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
6	透水係数	[cm/s]	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056

5. 2 計算方法

計算方法は、沖村ら<sup>10)</sup>が提案している方法に従った。概要を述べると、表土層の崩壊を対象として地形を 10m 格子間隔で数値モデル化し、セルの中心点に表土層厚を設定、降雨を入力し、集水モデルによりセルの地下水位を計算する。求められたセルの地下水位をもとに無限長斜面安定解析により、時間ごとに安全率を計算するものである。ここで、地下水位の集水モデルは、連続式をもとに各セルの X 方向の水の増分、Y 方向の水の増分、さらにセル内に降ってきた雨の増分を評価する手法である。つぎに、無限長斜面安定解析では、地下水位の上昇に伴う単位体積重量の増加、間隙水圧の上昇（有効応力の低下）を求め、安全率を算定するものである。求められた安全率が 1 を下回る場合を崩壊判定としている。

矢田川層群

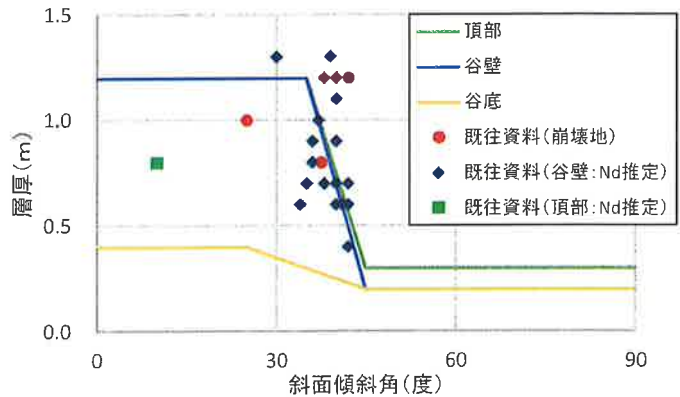


図-19 表土層厚データの一例

5. 3 モデルの検証（再現計算）

構築したモデルの妥当性の検証を行うため、先に述べた平成 21（2009）年台風 9 号による降雨を入力し、判読した崩壊地を予測できたか再現計算を行った。なお、入力降雨は、8月9日 AM1:00~8月12日 AM1:00の期間を入力している。再現計算の結果を表-5 に示した。ここで、適中率は全範囲のうち、空中写真判読の判定に合致している割合、捕捉率は空中写真判読した崩壊地の範囲のうち、計算結果で崩壊判定が出来る割合、空振率は空中写真判読で崩壊地と判定していないのに、計算結果で崩壊判定が出ている割合、見逃率は空中写真判読した崩壊地の範囲のうち、計算

結果で崩壊判定が出来ていない割合として定義している（表-4 参照）。それぞれの計算式ならびに実績と予測の事象の関係は以下のとおりである。

表-4 実績と予測の事象の関係

- 適中率  $(A+D) / (A+B+C+D)$
- 捕捉率  $A / (A+B)$
- 空振率  $C / (C+D)$
- 見逃率  $B / (A+B)$

実績	予測		
	事象	崩壊発生	崩壊非発生
	崩壊発生	A	B
崩壊非発生	C	D	

再現計算の結果、捕捉率は山地全体で 84.8%と 80%を越え、これまでのモデル構築してきた作成手順に従えば、空振率が多いが、概ね現象を再現できるモデルが構築できる結果となった。ただし、空振り率が多いことからさらなるモデルの改良が必要である。

表-5 再現計算結果（暫定モデル）

地質区分	セル数				適中率	捕捉率	空振率	見逃率
	A	B	C	D				
山地全体	1,355	242	188,291	3,153,947	94.4	84.8	5.6	15.2
生野層群	243	64	78,190	1,420,785	94.8	79.2	5.2	20.8
夜久野岩類	542	121	31,477	586,154	94.9	81.7	5.1	18.3
花崗岩	124	0	40,886	454,339	91.7	100.0	8.3	0.0
矢田川層群	18	27	18,362	357,784	95.1	40.0	4.9	60.0
丹波帯	356	6	9,559	116,022	92.4	98.3	7.6	1.7
超丹波	72	24	3,279	104,493	96.9	75.0	3.0	25.0

5. 4 新しい判定基準の適用

構築したモデルは、浸透水の流れを計算しているため予測モデルによる安全率1未満となるタイミングが崩壊多発の時刻よりも遅れる場合が確認されている。また、継続降雨の影響で地下水位が高い状態が継続するため安全率1未満の状態が長期にわたる場合も確認されている（ここで、現在のモデルの判定を現行基準と呼ぶ）。そこで、安全率に加えてその変化量  $\Delta SF$  を危険度判定の指標に加えることで適切なタイミングで崩壊を検知する方法が提案<sup>8)</sup>されている。そこで、その方法を当該市域に適用した結果について述べる。

提案されている判定基準は、安全率に加えてその変化量  $\Delta SF$  を危険度判定の指標に加え、崩壊判定のタイミングの

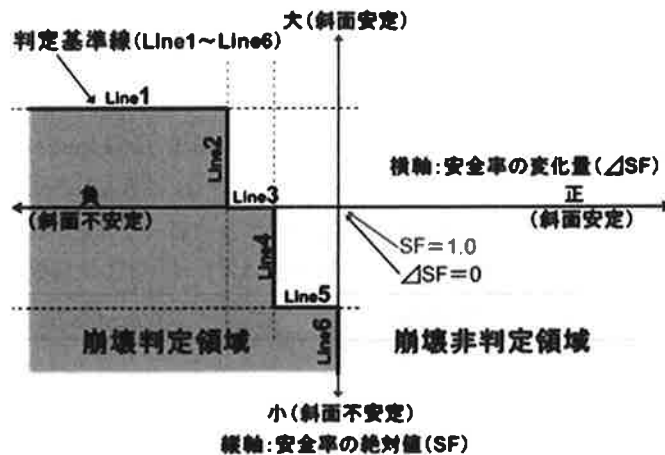


図-20 新しい崩壊判定の考え方

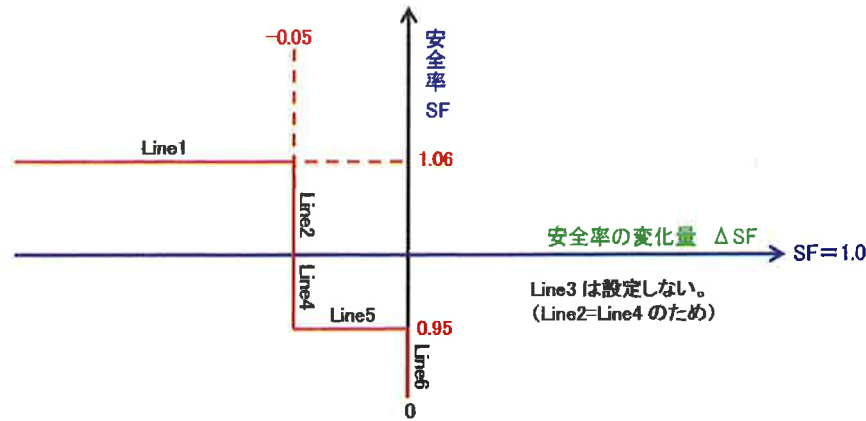


図-21 新しい崩壊判定の設定結果（朝来市域）

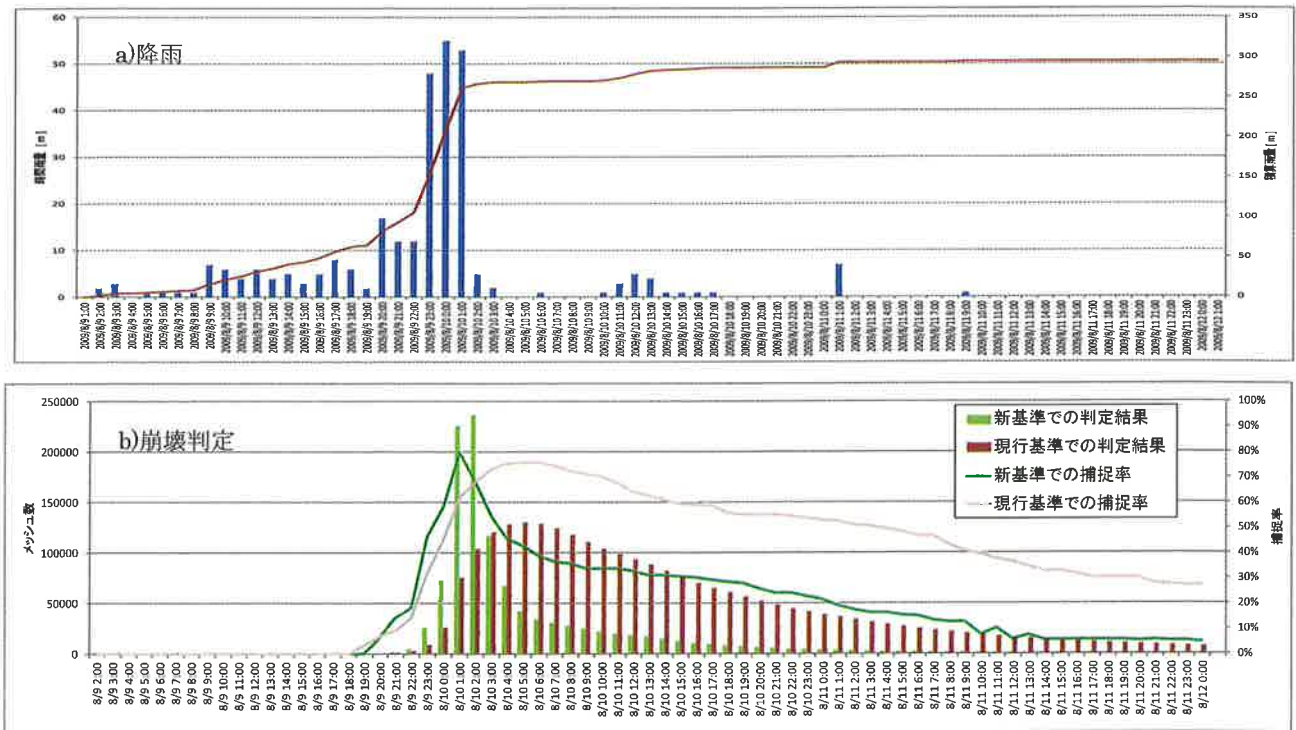


図-22 新しい基準と現行基準での崩壊判定の比較（朝来市域）

最適化ができること、さらに崩壊判定が長期化することを抑制し、土砂災害警戒情報の発表期間と整合が取れるようにできるもので図-20 に示す Line1~Line6 を地域ごとの災害事例に基づき最適な閾値を設定する方法である。ここで、判定基準の作成は、発生崩壊地の捕捉率が最大で、空振率が最小になるように Line1~Line6 を設定した。試行錯誤の結果、もっとも捕捉率が最大で、空振率が最小になる Line の値を図-21 に示した。この判定基準（ここで、新基準と呼ぶ）を用いると図-22 に示すようにピーク降雨時刻前に捕捉率 80%以上で崩壊が判定され、その後数時間で崩壊判定が半減していることがわかる。一方、現行基準では、ピーク降雨時刻の3時間後に捕捉率 75%程度の崩壊判定がされ、降雨終了後も多くの箇所が崩壊判定された状態が続いている。災害時の記録から最大時間雨量観測前後で多くの崩壊や土石流が発生している事実と比較すると、現行基準より新基準による判定の方が妥当であると考えられる。

6. まとめ

本報告では、平成 21 (2009) 年の台風による市域の崩壊箇所は、151 箇所が発生しており、基盤地質が夜久野岩類の

場所で 65 箇所（全体の 43%）と多いことがわかった。また、過去の風倒木跡地での崩壊発生箇所が全体の 42%を占めることがわかった。風倒木跡地での斜面崩壊箇所を除き斜面崩壊箇所の地形、地質的特徴を把握することを目的に GIS を用いた地形解析を行った。斜面崩壊密度と谷密度の関係や起伏量と斜面崩壊密度の関係、斜面崩壊密度と累積雨量ならびに時間雨量の関係にはばらつきがあるが相関関係が認められた。

一連の整理から斜面崩壊密度と流域、谷密度、起伏量、降雨に関する指標として見かけ上の流量を定義し、累積雨量が 200mm 程度に達するような状態で強雨（最大時間雨量）を受けるような条件であれば、見かけ上の流量と斜面崩壊密度の相関が高いことが明らかになった。今後の検証が必要であるが、強雨によって見かけ上の流量を求めることで崩壊が発生しやすい地形条件を有する基盤地質を抽出できる可能性があることがわかった。

つぎに、兵庫県下で構築されている表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築手順に従って暫定的であるがモデルを構築し、平成 21（2009）年台風 9 号の災害に適用した。その結果、80%を越える崩壊箇所を捕捉することができ、構築したモデルの捕捉精度が高いことを確認した。一方で空振り率が高いことから、精度の高いモデルとするためには、強雨による見かけ上の流量などで得られた知見を考慮して、地形、基盤地質条件に応じた改良が必要であると言える。さらに、沖村ら<sup>8)</sup>が提案している新しい判定基準を設定し、平成 21（2009）年台風 9 号豪雨時に適用した結果、ピーク降雨時刻前に捕捉率 80%以上で崩壊が判定され、その後数時間で崩壊判定が半減しており、現行より現実の斜面危険度を表現できる結果となった。

今後、土砂災害事例による捕捉率を向上させ、見逃し率を少なくできるよう検証計算に風倒木跡地の設定や基盤地質の地形的特性を考慮して地盤物性値や表土層の厚さ等の見直しを行い、朝来市域のモデルの精度を向上させ、試験運用時における気象庁の観測雨量と崩壊実績の整合性が図れるようさらにモデルの調整を行う予定である。

## 【謝辞】

本報告は、兵庫県のご支援を得て実施した業務成果の一部である。この場を借りて厚く御礼申し上げる。

## 参 考 文 献

- 1) 沖村孝・鳥居宣之・南部光広・原口勝則：表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策，建設工学研究所論文報告集，52，pp.119-137，2010.
- 2) 沖村孝・鳥居宣之・南部光広・原口勝則：表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策(2)，建設工学研究所論文報告集，53，pp.153-173，2011.
- 3) 沖村孝・鳥居宣之・南部光広・原口勝則：表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策(3)，建設工学研究所論文報告集，54，pp.159-183，2012.
- 4) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則：表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策(4)，建設工学研究所論文報告集，55，pp.91-116，2013.
- 5) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則：表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策(5)，建設工学研究所論文報告集，56，pp.45-66，2014.
- 6) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則：表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策(6)，建設工学研究所論文報告集，57，pp.17-36，2015.
- 7) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則：土砂災害のためのリアルタイムハザードシステムの作成手順，建設工学研究所論文報告集，56，pp.67-83，2014.
- 8) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則・鏡原聖史・高谷和彦：兵庫県で進めているリアルタイム表層崩壊予測モデルの構築とその過程で得られた検討結果，防災科学技術研究所研究資料 第 405 号，pp.101-106，2016.
- 9) 朝来市防災会議：朝来市地域防災計画，風水害等対策計画編，2014.
- 10) 兵庫県土木地質図編纂委員会：兵庫の地質，1996.
- 11) 牛山素行：2009/08/09-10 に降水量最大値を更新した AMeDAS 観測所(速報版)，静岡大学防災総合センター，2009.
- 12) 兵庫県災害復興室：平成 21 年台風第 9 号災害の復旧・復興計画，p.5，2009.

- 13) 神戸海洋気象台：平成 21 年 8 月 8 日から 8 月 11 日にかけての台風第 9 号による兵庫県播磨北西部を中心とした大雨について，気象速報，2009.
- 14) 鏡原聖史・澁谷啓・鳥居宣之・金兼洙・川尻峻三：兵庫県北西部地域における 2009 年台風 9 号による山腹斜面崩壊の実態と発生メカニズムについて，地盤工学ジャーナル，8(3)，pp. 489-504，2013.
- 15) 沖村孝・市川龍平：数値地形モデルを用いた表層崩壊危険度の予測方法，土木学会論文集，No. 358，pp. 69-75，1985.
- 16) 羽田野誠一：崩壊地形(その 2)，土と基礎，22-11，pp. 85-93，1974.

## 著 者

鏡原 聖史	客員研究員，株式会社ダイヤコンサルタント，博士（工学），地盤工学
沖村 孝	所員，理学博士，地盤工学
鳥居 宣之	神戸市立工業高等専門学校教授，博士（工学），山地防災工学
中川 渉	客員研究員，応用地質株式会社，博士（工学），地盤工学
原口 勝則	客員研究員，国際航業株式会社，技術士（建設部門），砂防工学
根本 信行	株式会社ダイヤコンサルタント，空間情報学
植田 允教	株式会社ダイヤコンサルタント，空間情報学