

# 中山間地集落を対象とした 降雨パターンと土砂移動を考慮した 土砂災害ハザードマップの作成

DEVELOPMENT OF THE SEDIMENT DISASTER HAZARD MAPS  
FOR THE VILLAGES LOCATED IN THE MOUNTAINOUS AREA  
CONSIDERING PRECIPITATION PATTERN AND SEDIMENT MOVEMENT

河邑 真<sup>1</sup>・辻子 裕二<sup>2</sup>・辻野 和彦<sup>2</sup>・村林 雄太<sup>3</sup>

Makoto KAWAMURA, Yuji TSUJKI, Kazuhiko TSUJINO and Yuta MURABAYASHI

<sup>1</sup> 豊橋技術科学大学大学院（〒441-8580 豊橋市天伯町 1-1）

E-mail: kawamura@ace.tut.ac.jp

<sup>2</sup> 福井工業高等専門学校（〒916-8507 鯖江市下司町）

E-mail: harima@fukui-nct.ac.jp

<sup>3</sup> ジェイアール東海コンサルタンツ（株）（〒450-0002 名古屋市中村区名駅五丁目 31-10）

E-mail: murabayu531@yahoo.co.jp

*Key Words:* sediment disaster, hazard map, precipitation pattern, sediment movement, mountainous area

## 1. はじめに

土砂災害の危険度評価手法は、「対象とする領域を数市にわたる広域全体を対象としたものであるか、数平方キロの中山間地の集落を対象としたものであるか」といった対象領域の大きさや、「防災対策の対象を法的に定めるためのものであるか、地区における避難施設を計画するためのものであるか」といった目的などによって、求められる手法の具体性、精度が異なってくる。

この研究では、中央構造線近傍に位置する愛知県東部の中山間地集落において避難体制を検討することを目的とし、豪雨による斜面崩壊ならびに土石流に対するハザードマップの作成を行った。避難体制を検討するという目的から集落内の多く斜面について、地形、地質の影響、ならびに降水量を考慮したより客観的な危険度評価を行うため、崩壊危険度評価手法としては、力学モデルに基づき斜面崩壊危険度を定量的に求める手法を選択する。一方、より多くの斜面の安定性を評価するためには簡易

な方法が必要となる。そこで、この研究では危険度評価のための力学モデルとして、地下水位がある無限長斜面を考え、斜面の力学的安定性を表わす安全率  $F$  を用いて危険度を評価する。また、この研究では、降雨パターンの影響を考慮するため、不飽和層での流入水の貯留を考慮し、安全率の時間的変化について検討した。安全率を求める際の斜面の傾斜角は10m メッシュ DEM により求める。斜面内の地下水位は、時間雨量、斜面上流の集水面積と斜面の浸透能を考慮して求め、10m メッシュごとに安全率  $F$  を算定する。力学的安定性を評価する場合、解析に用いるパラメータの信頼性が解析結果に大きな影響を与える。この定量的評価に用いる力学定数などについては現地における調査及び採取試料の室内試験の結果に基づき決定した。現地調査にあたっては、中央構造線の内帶領家帯に位置し花崗岩を基岩とする S 集落の 3 地点の斜面を対象として、崩壊履歴を持つ斜面の地形測量、斜面上での簡易貫入試験、ブロックサンプリングした現地資料の室内試験など詳細な調査を行った。

さらに、この研究では避難体制を検討するために重要

となる土石流に対するハザードマップの作成を行った。土石流の危険度評価にあたっては、上流渓流斜面での表層斜面崩壊により発生した土砂の流下、堆積を考慮したシミュレーションを行った。渓流に流入する土砂量は、上述の斜面崩壊危険度評価により斜面崩壊が起きると予測される面積に基づいて算定した。

この論文では、上述のハザードマップの作成方法について説明するとともに、S集落を対象として作成されたハザードマップに基づき、避難路の選定や避難施設の適所について検討する。中央構造線および調査対象地区を図-1に示す。

## 2. 降雨パターンを考慮した斜面崩壊危険度評価手法

### (1) 評価手法

表層崩壊の危険度評価では、簡易な力学モデルとして図-2に示すような地下水位がある無限長斜面を考え、斜面の力学的安定性を次式に示す安全率  $F$  を用いて表し、崩壊の危険度を評価する。

$$F = \frac{c + (\gamma_t(h - h_s) + \gamma_{sub}h_s)\cos^2(I)\tan(\phi)}{(\gamma_t(h - h_s) + \gamma_{sat}h_s)\sin(I)\cos(I)} \quad (1)$$

ここで、 $c$ は粘着力、 $\phi$ は内部摩擦角、 $\gamma_t$ は土の湿潤単位体積重量、 $h$ は土層厚、 $h_s$ は斜面内水位、 $\gamma_{sat}$ は土の飽和単位体積重量、 $\gamma_{sub}$ は土の水中単位体積重量、 $I$ は斜面の傾斜角を示す。式(1)における斜面内水位  $h_s$  は、土木研究所より研究成果が示されている H-SLIDER 法<sup>2)</sup>を参照し、上流の集水面積と浸透能を考慮して 10m メッシュごとに算定する。

集水面積は標高データの窪地処理を行い、D-infinity Flow Direction 法<sup>3)</sup>を用いて算出する。斜面内水位、透水係数、土層厚は、現地調査結果に基づき設定する。なお、数値地形データとしては国土地理院で作成された 10m メッシュ DEM を使用する。

斜面内水位  $h_s$  は、降雨によって表層土層に流入した水が間隙に貯留する場合を考え、単位奥行き、単位時間あたりに表層土層内に流入する水量を  $q_{in}$  とするとき、 $q_{in}$  は地下水位以下の浸透流量  $V_{flow}$  と地下水位以上の表層土層内に貯留される水量  $\Delta V_w$  の和として考える。

$$q_{in} = V_{flow} + \Delta V_w \quad (2)$$

貯留される水量は間隙に貯められるために、不飽和土層の飽和度を増加させる。 $\Delta V_w$  と平均飽和度  $S_r$  の増加量  $\Delta S_r$  の関係を求める。

$$\Delta V_w = \frac{e}{1+e} \frac{\Delta S_r}{100} V \quad (3)$$



図-1 中央構造線および調査対象地  
(参考文献1に加筆)

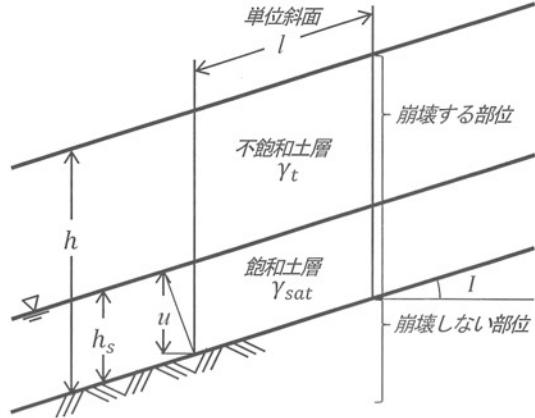


図-2 解析モデル

また、飽和度が上昇し、100%に達した部分で浸透流が発生すると考えると、単位時間における地下水位の増加量  $\Delta h_s$  と表層土層内の飽和度の増加量と  $\Delta S_r$  の間に次のような関係が成立する。

$$\Delta S_r = \frac{1}{D} \Delta h_s (100 - S_{r0}) \quad (4)$$

ここで、 $S_{r0}$  は初期の飽和度、 $D$  は土層厚さである。式(3)、(4)より

$$\Delta V_w = \frac{e}{1+e} \left(1 - \frac{S_{r0}}{100}\right) V \frac{\Delta h_s}{D} \quad (5)$$

$$\Delta h_s = \frac{1+e}{e} \frac{D}{\left(1 - \frac{S_{r0}}{100}\right)} \frac{\Delta V_w}{V} \quad (6)$$

ここで、式(2)に示す  $q_{in}$ 、 $V_{flow}$ 、 $\Delta V_w$  の関係は次式で与えられる。

$$r(t) \frac{a}{b} \eta_s = k_s \sin(I) \cos(I) h_s(t) + \Delta V_w \quad (7)$$

式(6)、(7)を用いることにより地下水位  $h_s$  の時間および  $r(t)$  の変化に伴う非定常地下水位  $h_s(t)$  が求められる。ここに、 $e$  は間隙比 (=0.7)、 $S_{r0}$  は平均飽和度 (=75%)、 $D$  は土層厚さ (=2.2m)、 $V$  はメッシュ体積である。 $e$ 、 $S_{r0}$ 、 $D$  の

値は後述する現地調査結果から決定した。 $r(t)$ は降雨強度（時間雨量）， $a$ は集水面積， $b$ は集水幅， $k_s$ は飽和透水係数である。また、 $\eta_s$ は上流の集水域に降った雨が地盤内に流入する場合の浸透能を表すパラメータである。この危険度評価では、表層崩壊の崩壊危険度は、10mメッシュごとに算定される。

## (2) 現地調査による解析パラメータの決定

愛知県東部の中山間地に位置するS集落は、中央構造線の内帯に位置し集落全体の基岩は領家花崗岩からなっている。S集落における現地調査に当たっては、地形図の特徴から過去に崩壊が起きたと推定される地点の踏査を事前に行い3地点について現地調査を行い、採集した表層土の試料について室内試験を実施した。調査、試験の内容を以下に示す。

(現地調査) レーザー距離計を用いた簡易地形測量、簡易貫入試験

(室内試験) 物理試験（密度試験、含水比試験、粒度試験）、力学試験（透水試験、三軸圧縮試験）

S集落において行った現地調査結果に基づき、表層斜面崩壊危険度評価に用いたパラメータを表-1に示す。表層土層厚については、簡易貫入試験結果 $N_d$ が2以下の表層の土層厚を考え、3つの斜面における最大深の平均値2.2mを用いた。強度定数については、換算 $N$ 値から大崎の式を用いて求めた値の平均値 $\phi = 20.7^\circ$ 、およびこの値を用いて逆解析により求めた粘着力 $c = 4.9 \text{ kN/m}^2$ を強度定数とした。なお、室内試験および原位置試験から得られた $\phi$ には差がみられたが、原位置試験結果の方が斜面崩壊を適切に反映していると判断し $\phi$ を決定した。透水係数については、室内透水試験結果およびクレーガー(Creager)の方法により20%粒径から推定された透水係数を参照して、 $k = 3.32 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$ を用いた。降雨強度としては、愛知県東三河地区で避難勧告の基準となる降雨強度、時間雨量80mmを用いた。斜面の浸透能を表すパラメータ $\eta_s$ については、降雨強度と表層地盤の飽和度の関係から0.1とした。

## (3) 降雨パターンの影響

降雨パターンとしては、次の3パターンを考える。

- A: 徐々に降雨量が増える（時間雨量が20, 40, 60, 70, 80mm/hと増加する）。
- B: 降雨のピークが2回ある（時間雨量が5, 35, 80, 50, 5, 80mm/hと変化する）。
- C: 小雨量であるが長時間に一定量の降雨が継続する（時間雨量10mm/hが27時間継続する）。

図-3は時間雨量と累積降雨量の推移を示した図である。パターンA, B, Cの場合の推移は図に示すようである。図中の限界降雨線は、過去の降雨災害事例から求められたもので、この線を越す時点で斜面崩壊が発生している。この限界降雨線は、斜面崩壊発生時期を予測し避難勧告をする

表-1 危険度評価解析に用いたパラメータ

粘着力: $c$	$4.9 \text{ kN/m}^2$	設定降雨強度: $r(t)$	80mm/h
内部摩擦角: $\phi$	20.7deg	飽和透水係数: $k_s$	$3.32 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$
土の飽和単位体積重量: $\gamma_{sat}$	$20.0 \text{ kN/m}^3$	土層厚: $h$	2.20m
土の湿潤単位体積重量: $\gamma_t$	$16.0 \text{ kN/m}^3$	水の単位体積重量: $\gamma_w$	$9.81 \text{ kN/m}^3$
集水面積: $a$	個々に算出	斜面内水位: $h_s$	個々に算出
集水幅: $b$	メッシュ幅	斜面傾斜角: $I$	ポリゴン内平均

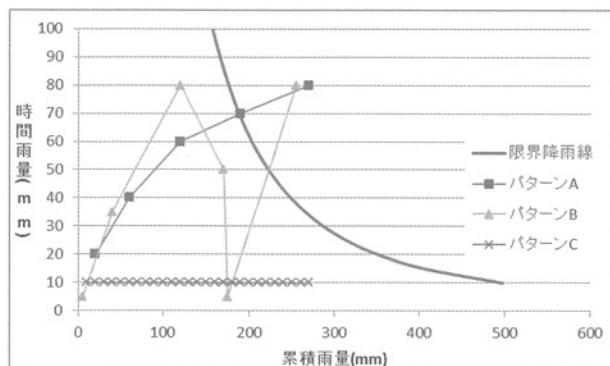


図-3 時間雨量と累積雨量

表-2 降雨パターンによる安全率の比較

パターン	A	B	C
崩壊	する	する	しない
累積降雨量	270mm	255mm	270mm
斜面内水位: $h_s$	0.83m	0.77m	0.54m
安全率: $F_s$	0.97	0.98	1.04
限界降雨線	越える	越える	超えない

際に用いられる。A, B, Cの3つの降雨パターンにより求められた安全率がどのように変化し、この限界降雨線とのような関係にあるかを検討する。

S集落において頻度の多い斜面傾斜角である25度の斜面について、安全率の変化を調べた結果を表-2に示す。Aパターンは短時間に大雨が降るため、急速に地下水位が上昇しそれに伴って安全率も急速に低下して安全率が1をきり、崩壊が生じている。この場合、雨が徐々に強くなるため避難のタイミングを判断することが難しい。Bパターンは1度目のピークでは安全率が1を切ることはないが、地下水位が増加しており、後続の雨によって安全率が低下して1を切り、崩壊が生じている。Cパターンでも、累積雨量の増加に伴い安全率の低下は見られるが、1より大きく崩壊は生じていない。この結果は、図-3に示す時間雨量と累積雨量の推移を表す曲線、いわゆるスネーク曲線がAパターン、Bパターンでは限界降雨線を越えるのに対し、Cパターンでは越えないという

関係に一致している。限界降雨線は経験に求めたものであるが、この解析によれば安全率が1を切る時点が崩壊の発生する時刻と一致しており、演繹的にも崩壊発生時刻が導かれたことになる。

Aパターンの降雨1時間後と降雨5時間後の安全率分布を図-4、図-5に示す。黒色の領域は表層崩壊に対する安全率1.00以下であり、崩壊の可能性が「高い」ことを示している（危険領域）。濃い灰色の領域は安全率1.01～2.00で、崩壊の可能性が「やや高い」ことを示し（中危険領域）、薄い灰色の領域は安全率が2.01以上であり崩壊の可能性は「低い」ことを示している（低危険領域）。

図-4、5の両図を比較すると、5時間後のハザードマップでは、山腹を中心に中危険領域が危険領域に変化しており、広範囲で崩壊の危険度が高くなっている。また、2011年9月に発生した15号台風により生じ、現地調査によって崩壊を確認した地点を図-4に白色の丸印で示した。これらの地点は危険領域に入っていることが確認できた。

### 3. 土砂移動を考慮した土石流危険度評価

#### (1) 評価手法

土石流危険度予測では財団法人 砂防・地すべり技術センターと京都大学大学院農学研究科森林科学専攻山地保全学分野が、共同で開発した土石流シミュレータ Kanako<sup>4)</sup>を用いて土石流の流下過程を予測した。KanakoはGraphical User Interface (GUI)を実装した汎用土石流シミュレータであり、本研究では、一次元領域から二次元領域までを統合的に計算できるVer.2.01を用いてシミュレーションを実施した。

##### a) 流出土砂量の設定

愛知県東部に位置するS集落において、溪流の上流斜面で斜面崩壊が起き、そこで生産された土砂が土石流となって流下するものと考える。なお、流出土砂量としては溪流内の移動可能土砂量（溪流河床堆積物）と溪流山腹の予想崩壊土砂量を分けて考える必要がある。溪流河床堆積物については、斜面崩壊危険度評価において斜面と溪流とを区別せずメッシュを用いて計算しているため、溪流河床堆積物として識別して計算されていない。ただし、多くの部分は崩壊が予想されるメッシュの一部として考慮されているものと推察される。

斜面崩壊危険度評価で得られた安全率マップから危険度1.00以下の危険領域面積をGISによって求め、得られた面積に平均侵食深を乗じて流出土砂量を算出した。この解析で用いた平均侵食深は現地調査で求めた風化土層厚を参照して設定した。図-6は対象地区内の土石流危険流域であり、このうち流域①、②を対象としシミュレーションを行った。図-6上部の②のメッシュ部分が土石流危険流域であり、この流域で生産された土砂が③のメッシュの流下領域に流れる様子をシミュレートした。流下領域

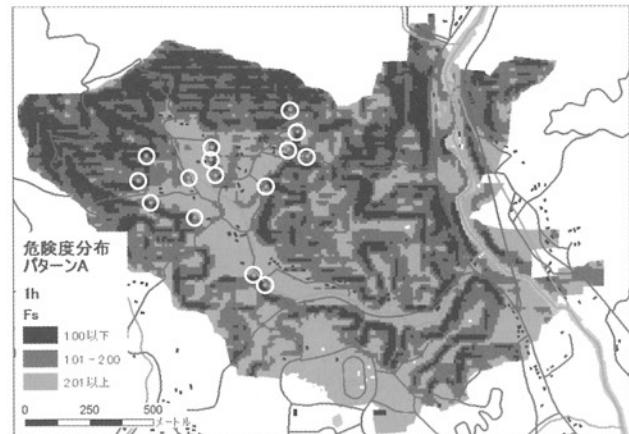


図-4 安全率分布（パターンA）

降雨1時間後

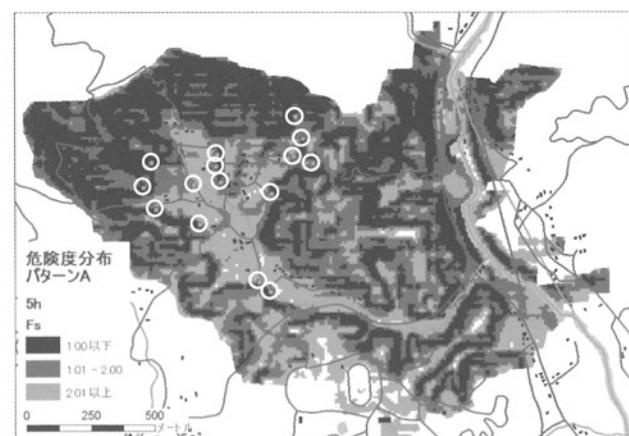


図-5 安全率分布（パターンA）

降雨5時間後

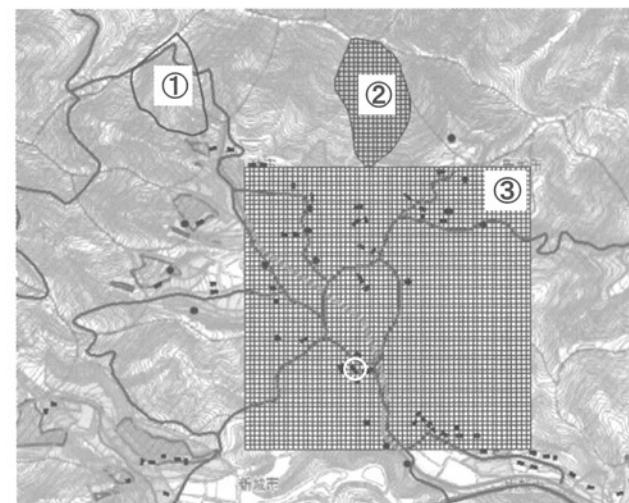


図-6 対象地区土石流危険流域

は標高データを基に2次元の10mメッシュで表現した。

##### b) 流入ハイドログラフの設定

土石流の総流量などの算定については、国土技術政策

総合研究所資料 砂防基本計画策定指針2.7土砂量等の算出方法を参考した<sup>5)</sup>。高橋らによる平衡土砂濃度式（式(8)）を用いて、土石流濃度Cdを求めた。ピーク流量 $Q_{sp}$ 、土石流総流量 $\Sigma Q$ については式(9)、(10)よりそれぞれ求めた。

$$Cd = \frac{\rho \cdot \tan(\theta)}{(\sigma - \rho)(\tan(\phi) - \tan(\theta))} \quad (8)$$

ここで、 $\sigma$ :砂礫の密度（=2650 kg/m<sup>3</sup>）、 $\rho$ :水の密度（=1180 kg/m<sup>3</sup>）、 $\phi$ :砂礫の内部摩擦角（=20.7°）、 $\theta$ :計画地点から上流100mの平均河床勾配（=25.12°） $Cd$ :土石流濃度（0.3≤ $Cd$ ≤0.54）、 $C^*$ :河床の容積濃度（=0.6）

$$Q_{sp} = 0.01 \Sigma Q \quad (9)$$

$$\Sigma Q = \frac{Vdqp \cdot C^*}{Cd} \quad (10)$$

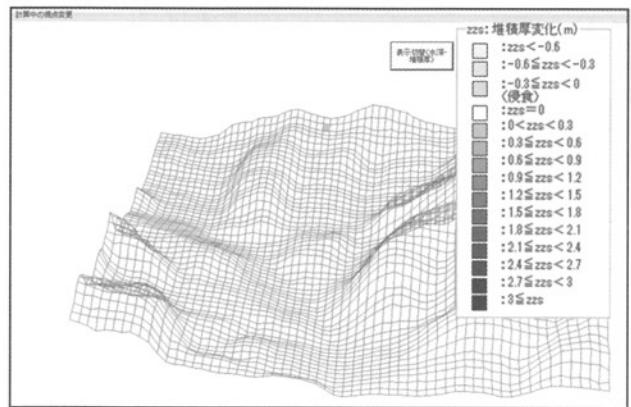
ここで、 $Q_{sp}$ は土石流のピーク流量（m<sup>3</sup>/s）、 $\Sigma Q$ は土石流総流量（m<sup>3</sup>）、 $Vdqp$ は流出土砂量（m<sup>3</sup>）である。

上述した式より土石流濃度 $Cd=0.30$ 、総流量58,677m<sup>3</sup>、ピーク流量587m<sup>3</sup>/sが算出された。ハイドログラフは200秒間継続する三角形状のピークで供給するものとした。また、200秒後から計算終了の1800秒までは、上流端からは一切の水・土砂を供給しないものとした。なお、土石流の総流量、ピーク流量は比較的大きな値となっているが、これは、最大時間雨量80mm、総降雨量300mmという降雨を斜面崩壊危険度評価で想定していることに起因する。日本における近年の降雨量を見るとこのような降雨も発生しないとは限らず、想定外の無いハザードマップの作成のために上記の降雨を想定した。

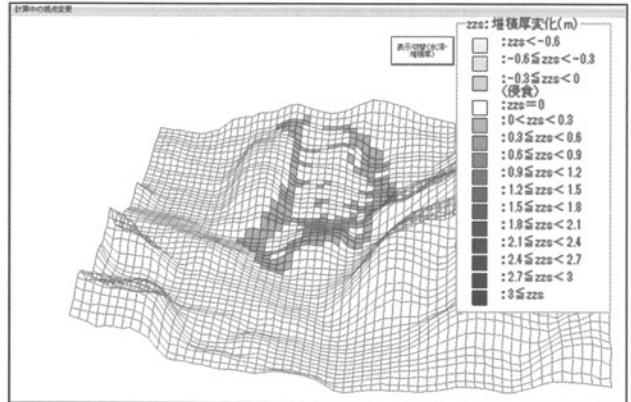
## (2) 土石流危険度評価結果

流域②で起きた土石流が図-6に示す③の流下領域に入流し始める59秒から300秒、900秒、1800秒後の堆積変化の結果を図-7に示す。

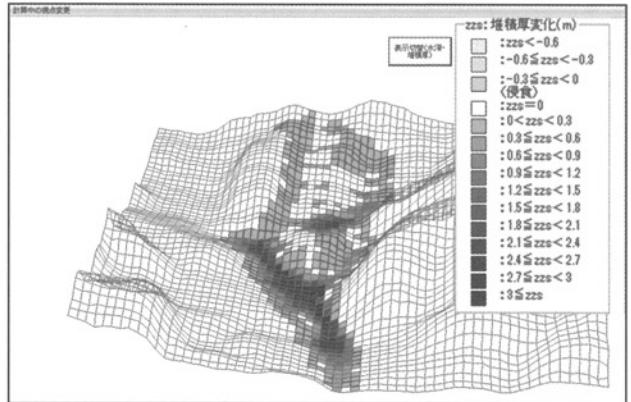
図-4に示すように安全率が低い流域のほぼ全域で崩壊が起きるという想定から非常に大規模な土石流となつた。そのため土石流が発生・流動してきた場合には広範囲にわたって水・土砂が氾濫する。図-5と合わせて流下過程を見ると、土石流発生領域の真南に民家があり、土石流の直撃を受けると考えられる。300秒後には2次元領域中腹の隆起部分で2.0m程度の土砂の堆積が見られ、時間の経過とともに西側に迂回して、下流端まで土砂が流れ着いている。図-6に示した丸印（流下領域中央より南西側）は一時避難場所の公民館であるが直近まで土砂が流れてきており、最大で3.0m以上の堆積が見られる。しかし、土石流の直撃は免れている。900秒以降堆積の大きな変化は見られず、土石流の移動はほぼ停止してお



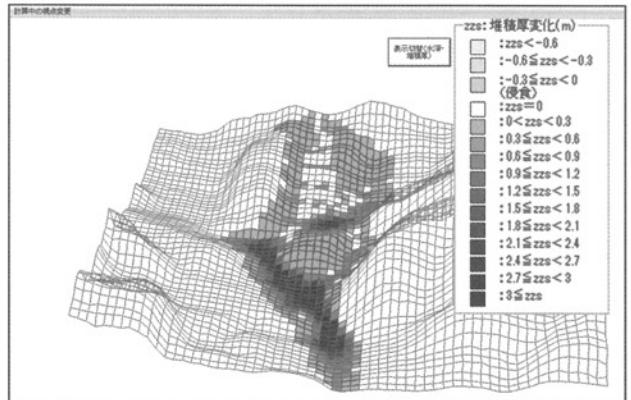
(a) 堆積：土石流発生 59 秒後



(b) 堆積：土石流発生 300 秒後



(c) 堆積：土石流発生 900 秒後



(d) 堆積：土石流発生 1800 秒後  
図-7 対象流域②シミュレーション結果

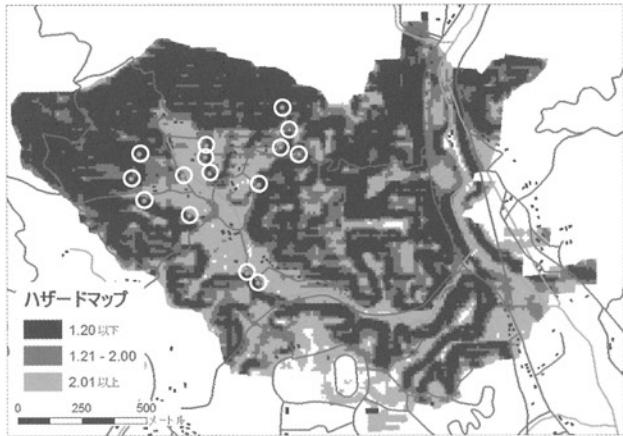


図-8 斜面崩壊ハザードマップ

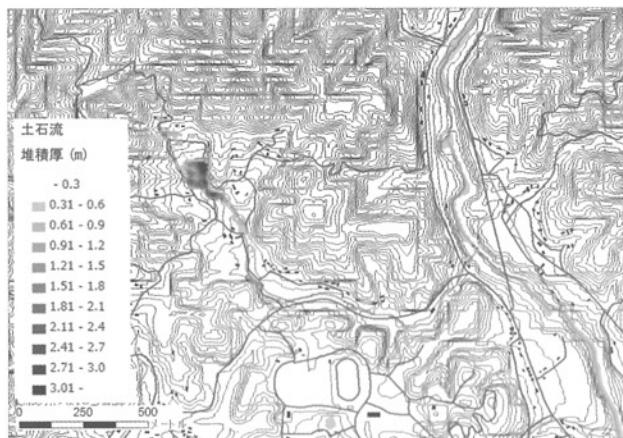


図-9 土石流ハザードマップ

り、土石流は発生から 10 分程度で流下し堆積している。

#### 4. ハザードマップによる避難体制の検討

##### (1) ハザードマップの作成

A パターンの降雨パターンで降雨開始後 5 時間後の斜面崩壊危険度評価の結果をもとに S 集落のハザードマップを作成し、図-8 に示した。ハザードマップでは安全率 1.20 以下の領域を危険領域とした。なお、実際の斜面崩壊は仮定に基づく計算通りには起きない場合もあると考えられるため、盛土の斜面安定計算で用いられる安全率 1.20 を参考にした。

土石流ハザードマップは Kanako を用いたシミュレーションで得られた土砂堆積厚のデータを GIS 上で再表示して作成した。シミュレーション終了時の堆積分布を示した土石流ハザードマップを図-9 に示す。なお、図の等高線間隔は 5m である。

##### (2) 避難体制の検討

S 集落では、住宅の建設に適した平坦地が少なく、傾斜地で斜面を切土して多くの住居が建っており、人家につながる道路も斜面に沿って通っている。したがって、豪雨をも

たらす前線や台風の通過が事前に予測される場合には、域外の高台にある避難施設に退避することが望まれる。

斜面崩壊ハザードマップによれば S 集落では背後の斜面が危険な人が多い。また、土石流のハザードマップによれば、土石流の流路にある人家も見られる。これらのことを見えて、住民とのワークショップの場を設け、ハード対策ばかりでなく避難体制の構築も重要となることを住民に述べた。ゲリラ豪雨のように急に降雨が激しくなった場合には、自宅から低地の避難所に無理に避難しようとすると、斜面を流下する水や土砂により被災する可能性がある。したがって、このような場合を想定し、事前に近隣の住民で話し合いを行い、斜面から離れ、土石流の流路にない家屋の 2 階を避難場所として取り決めておくことなどが必要と考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では、中山間地の集落を対象として、力学モデルによる定量的評価により降雨パターンを考慮した斜面崩壊の危険度評価を行った。また、土砂の流下、堆積を考慮した土石流のシミュレーションにより土石流の危険度評価を行った。これらの危険度評価結果に基づきハザードマップを作成し、集落における避難体制の検討を行った。作成されたハザードマップは、集落における危険性を客観的に評価することができ、避難体制の検討にあたって有用であった。

**謝辞:** 本研究は、東三河地域防災研究協議会平成 23 年度受託研究の一部として行われたものである。研究の実施にあたっては、群馬大学片田先生にご助力いただいた。また、愛知県ならびに東三河地域各市関係機関のご協力を頂いた。現地調査にあたっては、調査対象地区の住民の方々、東邦地水（株）石川昌幹氏の協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 地質調査所: 100 万分の 1 日本地質図（第 2 版）、地調承認番号「61 地調第 1053 号」、1978.
- 2) 土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム: 表層崩壊に起因する土石流の発生 危険度評価マニュアル(案)、土木研究所資料、第 4129 号、2009.
- 3) Tarboton, D.G.: A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, Water Resources Research. Vol.33, pp.309-319, 1999.
- 4) 中谷加奈・和田孝志・里深好文・水山高久: GUI を実装した汎用土石流シミュレータ開発、第 4 回土砂災害に関するシンポジウム論文集、pp.149-154, 2008.
- 5) 国土交通省 国土技術政策総合研究所: 国土技術政策総合研究所資料、砂防基本計画策定指針(土石流・流木対策編)、2007 年 3 月。

(2014. 5. 9 受付)