

土砂災害の時間変化と避難時間に関する研究

A STUDY FOR TIMELINE OF SEDIMENT-RELATED DISASTERS AND TIME
REQUAIRED FOR EVACUATION ACTIVITY

秋山 恵子¹・木下 篤彦¹・高原 晃宙¹・石塚 忠範¹

Reiko AKIYAMA, Atsuhiko KINOSHITA, Teruyoshi TAKAHARA, Tadanori ISHIZUKA

一言 正之²・杉山 実²

Masayuki HITOKOTO and Minoru SUGIYAMA

¹独立行政法人土木研究所 土砂管理研究グループ(〒305-8516 つくば市南原1-6)

E-mail: akiyama44@pwri.go.jp

²日本工営株式会社 中央研究所(〒300-1259 茨城県つくば市稻荷原2304)

Key Words: multi-agent model, evacuation, timeline, debris flow, sediment-related disasters

1. 研究の背景と目的

土砂災害対策において、ハード対策の推進とともに、ソフト対策を効果的に進めていくことの重要性が高まっている。また、2014年4月には、内閣府より「避難勧告等の判断・伝達マニュアル作成ガイドライン(案)」¹⁾が公表されており、避難を前提とした防災対策が認知されつつある。既往の研究^{例えば2)}によると、降雨予測の情報のみでは、自治体による避難の呼びかけや、住民の避難行動の契機になりづらいことが明らかにされている。そのため、河川流量等の観測データのほか土砂災害の前兆的な現象の通報など、複数の情報を提供したり、複数の段階に分けて発信し、「いつ」「どこ」が危険かがわかるきめ細かな情報となるよう、検討が重ねられている。

情報の多様化、多重化は、避難勧告等の発令の判断材料が増えることとなり歓迎すべきことである一方で、大量の情報の集約と判断には、伝達される情報の正確な理解と判断が必要であり、基礎的な知識や事前の訓練が不可欠だと考えられる。最近になって災害を経験している地域では、被災時の経験や、その後の訓練などにより、スムーズに対応が進む場合があるものの、多くの自治体住民は、豪雨災害による避難経験がない場合が多い。その場合、時々刻々と変化する状況と、情報の集約・理解がうまく進まず、対応に結びつかない可能性があり、情報の内容や活用方法の理解の促進について

も、並行して取り組む必要がある。とりわけ、いかにして経験したことのない避難時の状況変化や判断が困難な点の実感をもつつかは非常に重要であり、最近は、自治体関係者のほか住民参加型の訓練の事例も増えてきている。訓練の中では、ハザードマップや、災害時のイメージ動画を見せることが多く、近年はマルチエージェントモデルによる避難シミュレーションを合わせて示す取り組みもある。

マルチエージェントモデルは、主に建築や都市計画分野を中心に2000年前後から活用されることが増えている^{例えば3)}。特に、地震・津波分野では2011年3月に発生した東日本大震災の実態調査^{例えば4)}が進められたことから、再現検証が実施される例もある⁵⁾。マルチエージェントモデルは、エージェントひとつひとつに、自律性が与えられ、行動ルールに基づいて与えられた場面に対応する人間の行動をモデル化することができるが、これまで砂防分野での適用事例は限られている^{例えば6)}。砂防分野では、人口の少ない中山間地を対象とする場合が多く、結果を統計データとして扱うことが不向きであることが原因の一つと考える。しかし、土砂災害特有の、豪雨～土砂移動～河床上昇～土砂氾濫などの一連の現象の時間変化と、住民の移動、避難時の途絶経路の発生などの災害の状況を俯瞰するツールとして、マルチエージェントモデルに期待できることも多い。特に、再現される現象の不確実性が大きかったとしても、情報提

供のタイミングや、避難の開始時刻、避難先等を自由に変えて比較できる点で、これまでイメージしにくかった災害時の状況を疑似的に経験できる可能性がある。

そこで本研究では、すでに土砂生産から土砂・洪水氾濫の一連の現象についてモデル化され計算可能な流域を対象に、マルチエージェンモデルを用いて住民の避難時間に関する検討を実施し、土砂災害に関連する現象の変化と住民の避難行動時間の関係について考察するとともに、砂防事業を対象としたマルチエージェントモデルの適用可能性について検討した。ここで、想定している現象は、豪雨による斜面崩壊と、それに起因した土石流が引き起こす河床上昇による土砂・洪水氾濫である。

2. 研究手法

(1) 対象地の概要

本研究では六甲山系において構築されている「リアルタイムハザードマップシステム」⁷⁾（以下、「六甲システム」と呼ぶ）の対象範囲のうち、住吉川流域の上、中、下流の3区域とした（図-1）。各区域は1~1.5 km²である。

住吉川流域は、砂防基準点を新落合橋（標高 69m）とし、流域の広い範囲が市街地となっている。近年、土砂整備率は 95%に及び、阪神・淡路大震災（1995 年）で斜面崩壊が複数発生したことを除くと、集中的に発生する斜面崩壊、土石流等の土砂災害はほとんど発生していない。しかし、1938 年（昭和 13 年）、1967 年（昭和 42 年）の二度の水害では土石流が発生し、市街地にも巨礫や流木が氾濫した。また、かつては日常的に土砂生産が盛んで、隣接する石屋川、芦屋川とも同様に天井川となっており、現在でも河床より周辺市街地の宅地の比高が低い範囲が広い。

(2) 土砂災害現象の時系列の把握

六甲システムの採用する計算モジュールは、分布型流出解析モデル、無限長斜面モデル、住吉川本川における一次元土石流モデル、二次元土砂氾濫計算の4つで構成されている。降雨を入力条件として、崩壊発生時刻、河川流量のピーク時刻、氾濫開始時刻等を連続的に把握し、現象の発生時刻を追跡できる点で、災害シナリオの作成に適している。なお、このモデルの再現性については、河川流量は 2004 年 9 月 30 日及び 10 月 20 日の出水時の実績流量、斜面崩壊は、1967 年（昭和 42 年）7 月の崩壊事例に対して検証されている⁷⁾。下記に示す以外の水理条件は、検証時と同様とした。

a) 対象ハイエトグラフ

災害実績のある 1938 年（昭和 13 年）7 月 5 日の

ハイエトグラフ（神戸海洋気象台）とした。ただし、この災害は日雨量規模では 200 年確率規模に相当するが、短時間雨量強度（最大 10 分間降雨強度）については 7.9mm と過去に経験した上位の降雨と比較して少なく、山地流域では平地よりも強い降雨が生じる場合が多いことも考慮して、ピーク時の 10 分間雨量を既往最大値である 36.5mm に置き換えて採用了。採用了したハイエトグラフは図-2 のとおりである。

b) 生産土砂量

本検討は、マルチエージェントモデルの利活用条件の検討を主眼としているため、堤内地側で土砂堆積が発生し、土砂移動による被害発生顕著に確認できる条件を採用了。現行砂防基本計画では、崩壊面積率、崩壊深、土砂流出率から計画土砂量が設定されているが、基本計画検討時の諸条件（崩壊深、土砂流出率）の考え方において危険側を採用了した場合の土砂量（133.5 万 m³）を、土石流として給砂させた。

c) 給砂タイミング

六甲システムでは、分布型降雨流出モデルを採用了

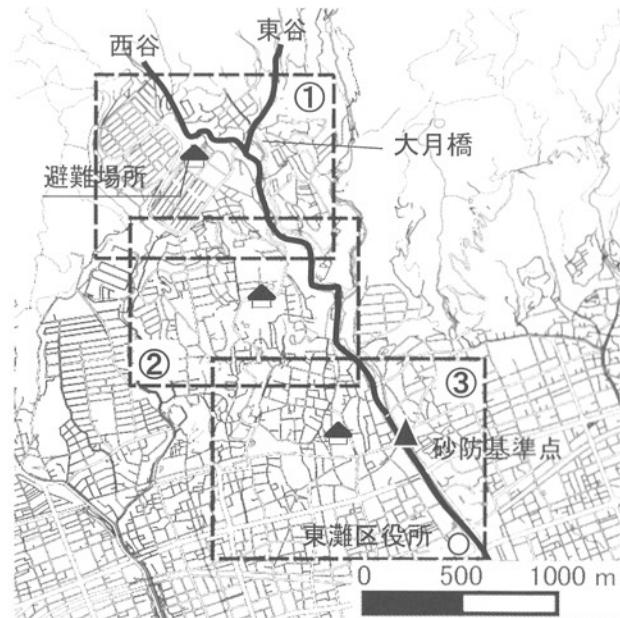


図-1 検討対象区域

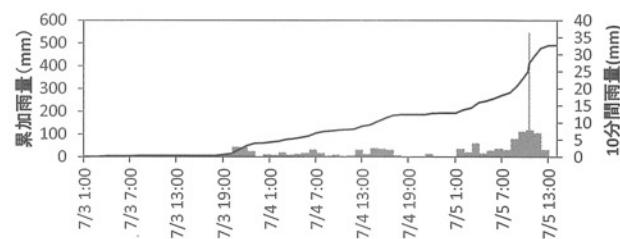


図-2 対象ハイエトグラフ

ているため、発生する土砂災害現象を連続的に把握できるが、崩壊により斜面上で不安定化した土砂が土石流化して河道まで輸送される過程については再現できていない。そこで、一次河床変動計算区間の上流端において生産土砂量の上限値に相当する土砂が侵食可能な区間を設定し、降雨ピーク時刻以降、土石流として流下するように設定した。

(3) マルチエージェントモデルを用いた避難時間の算定

本研究は、対象地域における住民の避難行動の再現性や、望ましい避難のあり方に関する比較検討の前段階の基礎的な検討として実施した。そのため、避難の前提条件及びエージェントの行動モデルは最低限のシンプルな条件のみとし、避難タイミングの違いによる避難時間の変化を試算した。

a) 使用した基盤データ

道路データは、国土地理院で公開する基盤地図情報縮尺レベル 2500 の道路縁データから、リンク（経路）とノード（交差点及び道路端点）を作成して経路ネットワークを構築した（図-3）。エージェントの初期配置条件となる建物位置については、同様に基盤地図情報縮尺レベル 2500 の建物データを用いた。

b) 初期条件とエージェントの属性

各区域に配置するエージェント数は、住民基本台帳に記載された各町丁目に該当する人口に、土砂災害発生時の避難率（10%）を乗じて求めた。避難率は、水野ら⁸⁾が近年の土砂災害時の実績を整理しているが、対象世帯数が 50 世帯以上になると避難率は数%まで減少することが示されている。本研究では、ある程度まとまったエージェントを設定することで不確実性の少ない結果が得られると考え、暫定的に 10%と設定した（表-1）。

エージェントの初期配置は、基盤地図情報の建物データ（ポリゴン）の分布する範囲に対して、配置数が合うようにランダムに設定した。配置するエージェントの属性として、各区域の該当する町丁目の年齢構成比から、高齢者、乳幼児等の歩行困難者（6 歳以下、65 歳以上）と、それ以外の通常の避難が可能な者（7 歳～64 歳）をランダムに設定した。

c) 移動条件

移動条件として、移動開始時刻と、移動場所、移動速度、迂回条件等が必要である。これらのエージェントの移動ルールについては、アンケート結果に基づいたり、実験的に求めたり様々な事例があるが⁹⁾、本研究では、簡素な条件として、主に移動速度と迂回条件のみの設定をしている（表-2）。これらのより適切な値の設定方法

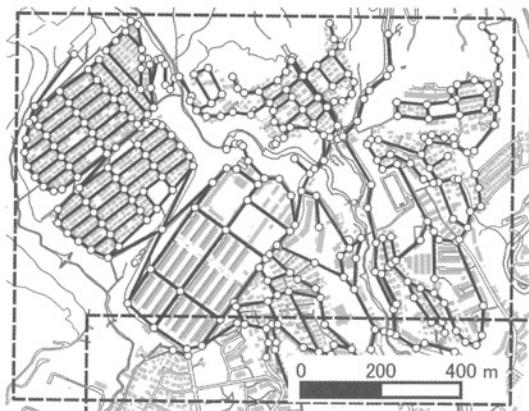


図-3 経路ネットワークの例（区域 1）

表-1 各区域に配置するエージェント数

	推定区域 人口	配置エージェント数 (うち歩行困難者比[%])
区域 1	11,102	1,100 (36.4 %)
区域 2	10,986	1,100 (33.0 %)
区域 3	20,930	2,100 (29.0 %)

表-2 エージェントの行動ルール

項目		設定概要
初期 条件	避難者の配置	建築物の範囲にランダムに配 置。配置数は住民基本台帳か ら設定した値
	属性の設定	住民基本台帳に基づく年齢比
	避難率	10%（既往実績等より設定）
移動開始条件		同時（複数ケース検討）
移動先		市の指定する避難所
移動 経路	最短経路探索	ワーシャルフロイド法
	迂回時の条件	避難経路にかかる斜面要素が 崩壊 流動深 50 cm 以上
移動 速度	平常時	7 歳以上 64 歳以下: 1.0m/s 6 歳以下・65 歳以上: 0.5m/s *勾配補正係数: $\alpha=1-0.01770$ *密度補正: 1.5~3.8 人/m ² : 0.5m/s 3.8~6.5 人/m ² : 0.2m/s 6.5 人/m ² ~-
	浸水時	水深 50cm で移動速度 0m/s 50 cm 以下は線形に低下

については今後の重要な課題である。

移動開始時刻は、全エージェント同時とし、検討ケースを変えて複数比較し、移動場所は、各区域内の指定された避難所（学校等）とした。エージェントの移動速度は性別、年齢別で速度を変える事例も多いものの、ここでは、歩行困難者等は一律 0.5m/s、それ以外は一律 1.0m/s とした¹⁰⁾。なお、混雑による速度低下はリンクの人口密度別に設定し¹¹⁾、坂道による速度変化については現地調査時の GPS データから、斜面勾配と速度の変

化率の関係から求めた補正係数を乗じた。

最短経路探索にワーシャルフロイド法を採用し、各建物データから出発したエージェントは、移動中のリンクが①斜面崩壊による途絶、②元の地盤から土砂堆積深を含む水深と定義した流動深が50cm以上、のいずれかの条件を満たした場合に、通行不可と判断し、別の経路を選択するとした。また、流動深が50cm未満の場合は、流動深がない場合から線形で変化させた^{12), 13)}。ただし、計算結果より、斜面崩壊により経路が途絶する箇所は発生しなかった。

3. 結果

(1) 土砂災害現象の時間変化

六甲システムで再現できる現象は、表層崩壊と、土石流による河川流量の増加、流量の増加または河床上昇による土砂・洪水氾濫である。ここでは、住民が事前に避難する場合に重要となる条件として、次に示す事象が生じた時刻について時系列で整理した(図-4)。

a) 斜面崩壊

住吉川上流域で最初に崩壊が発生したのは、累加雨量205mm、午前1:50時点であった。その後、微増傾向が続くが、8:00以降、崩壊土量は急増を始める。また、避難経路に隣接する市街地では10:30に最初の崩壊が発生し、12:00以降、新たな崩壊は発生しない。従って、警戒避難上の契機となる時刻は、1:50, 8:00, 10:30であった。

b) 流量の推移及び土砂・洪水氾濫

本川流量がピーク流量を記録するのは、降雨ピークと同時期の10:30～10:40である。また、土砂・洪水氾濫が開始するのは、上流の西谷上流堰堤付近で10:50、下流砂防基準点下流では11:17である。ここで、12:00以降、新たな斜面崩壊が発生していないのに対し、下流氾濫開始点ではこの時刻から氾濫が開始する。本研究

のシナリオでは、斜面崩壊が、かなり早い段階から累加雨量に比例するように増加し、一定量に達するとそれ以上増加しないのに対し、土砂・洪水氾濫は越流後に急速に状況が変化する。これらの時間的な関係は、ハイエトグラフや流出特性、上流域の崩壊しやすさ、河道断面等の相互の関係から変化すると考えられる。

(2) 避難時間

避難シミュレーションとして、表-3に示す時刻に、避難を開始したとして、避難時間を算出した。その結果を表-4、図-5に示す。土砂氾濫タイミングの差から、区域1・区域2では西谷・東谷流量ピーク直後の避難開始のケース(ケース1)から避難の遅延が始まるのに対して、区域3ではその1.5時間後の避難開始のケース(参考2)から避難時間の遅延が始まり、経路の途絶により避難所に到達できないエージェントが生じることが確認できる。

4. 考察

(1) 土砂災害現象の時間変化

本検討で設定したシナリオでは、最初の崩壊から、集中的な崩壊発生、降雨ピークまでは8時間以上の時間

表-3 避難開始タイミング

	避難開始	契機になる現象
ケース0	8:00	斜面崩壊の急激な増加
ケース1	10:40	避難路の一部で崩壊発生・降雨・流量(東谷)ピーク
ケース2	11:00	西谷堰堤上流付近で氾濫開始
ケース3	11:30	新落合橋下流で氾濫開始
参考1	12:00	(下流氾濫開始から40分後)
参考2	13:00	(下流氾濫開始から100分後)

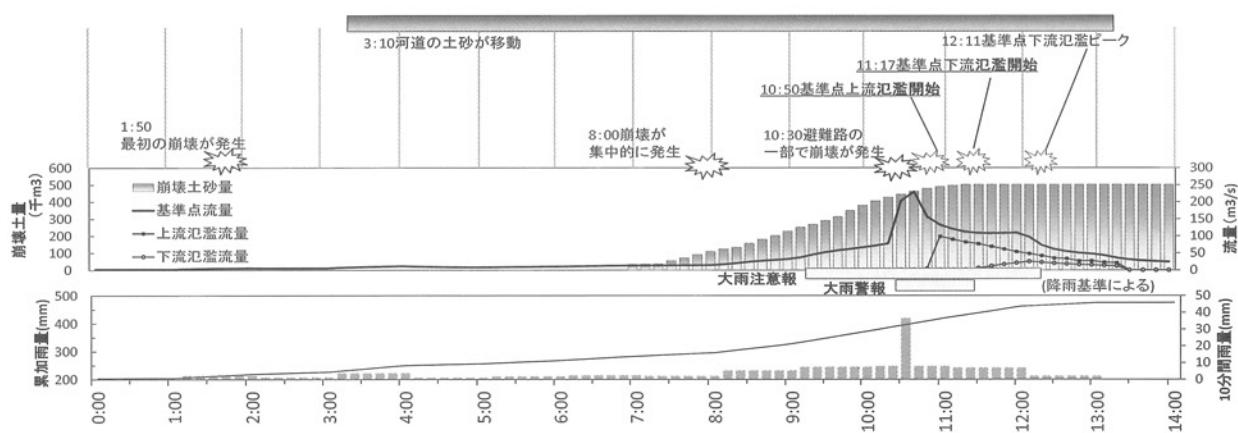


図-4 リアルタイムハザードマップシステムによる土砂災害関連事象の時系列

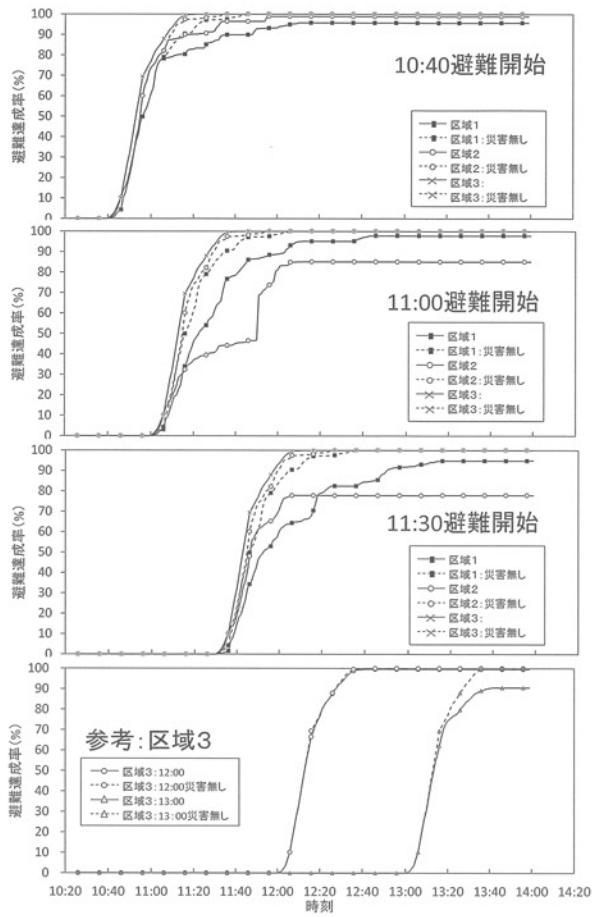


図-5 避難時間計算結果

表-4 80%避難達成時間

	開始時刻	区域1	区域2	区域3
ケース0	8:00	0:27:10	0:24:00	0:21:10
ケース1	10:40	0:31:40	0:24:00	0:21:10
ケース2	11:00	0:41:30	0:58:30	0:21:10
ケース3	11:30	0:51:20	(80%に満たない)	0:21:10
参考1	12:00	-	-	0:21:10
参考2	13:00	-	-	0:26:20

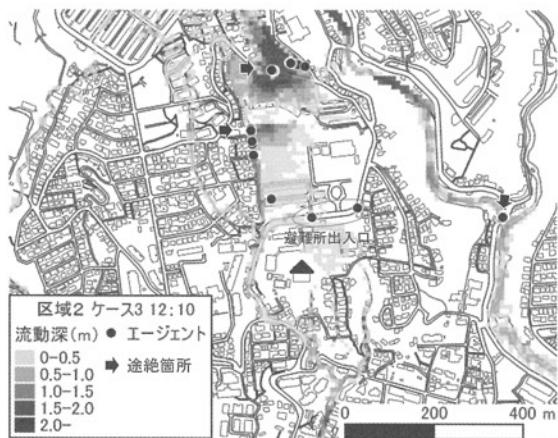


図-6 避難時間計算結果(区域2: ケース3: 12:10)

差があり、急激に崩壊が発生し始める時刻(8:00)までについても6時間以上の時間差があった。また、崩壊土砂の流出時間なども考慮して、河川流量のピークに合わせて土石流の発生を想定したため、土砂・洪水氾濫は10:30以降に発生した。土砂・洪水氾濫は一度越流し始めると、住宅や避難経路に連続的に被害を及ぼすことから、本研究で想定したシナリオの斜面崩壊の初発や集中的な発生を事前に把握することが、避難時間の確保上重要であることがわかる。

(2) 避難時間の変化

土砂・洪水氾濫が始まる以前と、氾濫の発生やピーク発生のタイミング前後に避難を開始した場合について、避難達成時間を比較する。各区域は長辺を約1.2kmとしており、単純に計算すると、避難時間は概ね15~20分と考えられる。しかし、ランダムで配置した歩行困難者や、ネットワークの影響により、避難経路上の障害が発生しない場合でも、20~30分を要することがわかる。そのため、最初の崩壊や崩壊の急増を契機とした避難開始では避難時の移動に土砂氾濫の影響は受けないが、降雨ピーク・流量ピーク後の避難開始では、避難時間が遅延し、避難所に到達できない恐れがあることがわかる(図-6)。また、区域1と区域3では避難時間の遅延が生じる避難開始時刻の間に1時間半以上の差があり、下流の区域に対しては、上流の土砂・洪水氾濫を契機にしてもまだ避難時間が確保できることがわかる。

ここで、1938年(昭和13年)4月1日以降の時間雨量データから、土壤雨量指数を試算したところ、兵庫県南部(神戸市)の大気警報の土壤雨量指数の基準値123mmは、7月4日の午後14:00~16:00には超過していたことになる。対象地域において現在運用中の土砂災害警戒情報の発表基準は確認できていない。しかし、崩壊の急激な増加は、翌7月5日の未明以降であるため、現行の注意報・警報及び土砂災害警戒情報のほか、六甲システムのような土砂移動に関する予測結果を加えることで、土砂災害に関する状況変化を把握し、避難の契機となる可能性があると考える。

以上から、本研究で検討対象として設定したハイエトグラフに対しては、土砂災害が急増し始める時刻以前に避難を開始すれば、モデル上平常時と変わらないが、降雨ピーク・流量ピーク後の移動は、所要時間が長く、到達できないエージェントが生じることがわかった。このことから、土砂移動に関する予測情報、監視・観測情報を避難の契機としても、十分に避難時間を確保する場合があることが確認できる。

(3) マルチエージェントモデルの活用可能性と今後の課題

本研究で、降雨～崩壊発生～土砂・洪水氾濫の一連の現象と、それを条件とした避難シミュレーションを実施した。その結果、それぞれの一連の現象のタイミングと、それによる避難時間の変化を確認することができた。その際、検討対象のハイエトグラフに対しては、斜面崩壊の初発及び集中的な崩壊発生を契機に避難行動を開始すれば、土砂・洪水氾濫の発生より先に安全な避難所に移動することが可能であることを示すことができた。

再現性の高いマルチエージェントモデルの構築にあたっては、悪天候での経路選択など行動心理学的な知見が必要であるほか、検討結果に対する検証が困難であるなど、課題は多い。同様に、シナリオの設定においても、一定の仮定に基づくものであり、災害時にこの結果と同様の状況になるわけではないことなど説明上の課題は、これまでのハザードマップなどと同様である。しかしながら、地方自治体に対して、災害時の影響を説明する場合や、豪雨の継続が予想される場合に、実際の避難の時間感覚の目安として説明したり、クリティカルパスを把握したりするツールとして、有効であると考える。また、自治体の担当者や住民が、早期に避難すべきか、屋内で退避的な行動をとるべきか、判断が必要な場面において、被災時の具体的イメージをもつことは、仮想のシナリオに対してであっても重要なことと考える。特に土砂災害の場合、住居は山腹斜面に接した危険な場所にあり、避難時に利用可能な路網が少なく、河川渡渉が必要などより厳しい条件である場合の方が多い。そのような場合、より危険が切迫した事態では屋内で移動するなどに留まるなどの善処策があったとしても、望ましいのは早期に安全な場所へ避難することである。早めの行動を喚起する資料として、また実際の山間地での現象に敏感になり、その後に発生する現象を想像する資料として、このようなシミュレーションツールを活用することは有用だと考える。

5. おわりに

現在、各関係機関による降雨、流量等の監視・観測データ、それらをもとに作成される危険度データ、さらに、SNS を用いた非公式情報など非常に多くの情報が配信されている。しかしながら、自治体担当者や住民が、実際にとるべき行動を判断するためには、避難行動そのものの時間や距離といった定量的情報が必要となる。その際、ある程度不確実性があったとしても、このような計算ツールを用いて、災害時に行動について事前に把握

し、監視・観測によるデータと合わせて提供することが重要だと考える。

謝辞：本研究で使用し使用したデータの一部は、国土交通省近畿地方整備局六甲砂防事務所の所有するシステムを使用させていただきました。ここに厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 内閣府(防災担当):避難勧告等の判断・伝達マニュアル作成ガイドライン(案), 99p, 2014.
- 2) 富田陽子・秋山怜子・岡本敦:「土砂災害警戒情報」及び「土砂災害警戒情報を補足する情報」の運用実態、砂防学会誌, Vol. 66, No.1, 53-57, 2013.
- 3) 堀宗朗・犬飼洋平・小口健二・市村強:地震時の緊急避難行動を予測するシミュレーション手法の開発に関する基礎的研究、社会技術研究論文集, Vol. 3, 138-145, 2005.
- 4) 国土交通省都市局:津波避難を想定した避難路、避難施設の配置及び避難誘導について(第3版), 230p, 2013.
- 5) 熊谷兼太郎:2011 年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動への津波避難シミュレーションの適用性、国土技術政策総合研究所資料, No. 742, 22p, 2013.
- 6) 水野秀明・鈴木拓郎・小山内信智・倉本和正・金本満:土石流発生時の住民避難行動に関する考察、砂防学会研究発表会要旨集, p223, 2010.
- 7) 木下篤彦・神野忠広・岡本敦・一言正之・小野寺勝・桜庭雅明・杉山実:六甲山系におけるリアルタイムハザードマップシステムの構築、砂防学会誌, Vol. 66, No.1, 15-22, 2013.
- 8) 水野正樹・富田陽子・桂真也・小山内信智・花田良太・安田武道:災害情報を用いた土砂災害時の住民の避難率の分析、砂防学会誌, Vol.65, No. 3, 29-34, 2012.
- 9) 西畑剛・森屋陽一・田村保・瀧本浩一・三浦房紀:津波浸水時の避難条件に関する実験的研究、海岸工学論文集, 第 52 卷, 1256-1260, 2005.
- 10) 津波避難ビル等に係るガイドライン検討会・内閣府政策統括官(防災担当):津波避難ビル等に係るガイドライン, 73p, 2005.
- 11) 源貴志、成行義文、藤原康寛、三神厚:津波避難シミュレーションシステムの開発と地区の避難安全性評価への適用、第 30 回土木学会地震工学研究発表会論文集, 4-0030, 2009.
- 12) 国土交通省:「洪水ハザードマップ作成の手引き」, 2013.
- 13) 目黒公郎、織田 浩平:津波災害時の避難行動シミュレーションモデルの開発、生産研究, 57(4), 155-159, 2009.

(2014. 5. 9 受付)