

マルチエージェントモデルを活用した 土砂災害に対する避難行動シミュレーション

秋山怜子・高原晃宙・木下篤彦・石塚忠範

1. はじめに

土砂災害対策において、ハード対策の推進と同時に、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。しかし、降雨の情報のみでは、自治体による避難の呼びかけや、住民の避難の契機になりにくく、河川水位などの観測データのほか実際の土砂災害の発生状況など複数の情報を提供したり、発信するタイミングを工夫するなど、様々な検討が重ねられている。しかし、提供される情報が多くなればなるほど、情報の取捨選択は不可欠であり、土砂災害に関する基礎的な知識や事前の訓練が必要である。多くの自治体や住民は、豪雨時の避難経験がない場合も多く、いかにして災害の切迫性や危機感をもたせるかが重要な課題である。そのため、津波や大規模地震分野では、関係機関、住民参加型の避難訓練の機会に、災害時の避難状況についてイメージをもたせるため、マルチエージェントモデル^{*}を用いた避難シミュレーションの結果を合わせて示す取組みも増えており、今後さらに増えることが予想される。

本報文では、土砂災害へのマルチエージェントモデル活用の基礎的検討として、降雨流出から土砂氾濫まで一連の土砂移動現象について、シミュレーション可能なシステムがすでに構築されている六甲山系住吉川流域を対象に、時系列に沿った降雨～崩壊発生～土砂・洪水氾濫～住民避難の一連のシミュレーション結果を報告する。

2. マルチエージェントモデルを用いた避難シミュレーション

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年前後から活用事例が増えてきた²⁾。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が進められており、再現検証が実施されている³⁾。マルチエージェン

トモデルは、エージェントと呼ぶ計算要素（人間）のひとつひとつが、あらかじめ設定したルールに基づいて行動するため、時々刻々と変化する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。しかし、土砂災害分野での適用事例は限られている。この原因として、土砂災害では、人口の少ない中山間地を対象とする場合が多く、計算結果を統計データとして扱うことが不向きであり、結果として避難経路や所要時間などの再現性の検証が困難であることが考えられる。

しかし、実際の災害時と、マルチエージェントモデルによる計算結果との乖離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、避難先などを自由に変えて比較できることから、避難勧告の発令タイミング等を考える上で、避難上のクリティカルパスや早期の退避が必要な地区の特定など有用な情報が得られることが期待できる。

3. マルチエージェントモデルの適用事例

3.1 土砂災害シナリオ

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」⁴⁾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1～1.5km²である。

この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、氾濫開始時刻などを連続的に把握できる点で、災害シナリオの作成に適している。

計算条件となる降雨は、災害実績のある昭和13年7月5日の降雨を基本に、近年頻発する短時間強雨を考慮し、降雨ピーク時の10分間雨量のみ、既往最大値36.5mm（2012年4月3日）に置き換え、累加雨量475mmの降雨とした（図-2）。

A study on evacuation activity by multi-agent model for sediment related disasters

*土木用語解説：マルチエージェントモデル

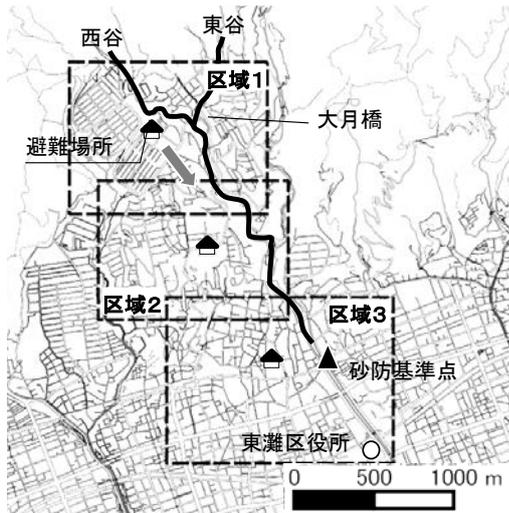


図-1 検討対象区域

3.2 避難行動条件

ここでは、住民が避難する際の行動の再現や、適切な避難方法に関する基礎的な検討を実施した。そのため、避難の前提条件およ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の試算をした。なお、本検討において行動制限となる洪水氾濫は、当該溪流の崩壊土砂の流入によって引き起こされる氾濫であり、他の内水・外水による影響は考慮していない。

道路データと、エージェントの初期配置条件となる建物位置は、国土地理院で公開する基盤地図情報縮尺レベル2500のGISデータを用いた。

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を乗じて求めた。

避難率は、既往の調査から近年の土砂災害時の避難実績として、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ことから⁵⁾、本研究では10%と設定した。移動条件として、移動開始時刻と、移動場所、移動速度、迂回条件などが必要である。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、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を既往の文献^{例えば6)}を参考に設定した(表-1)。これらのより適切な値の設定方法については今後の重要な課題でもある。

3.3 結果

計算結果によると、住吉川上流域での最初の崩

壊は午前1:50時点であった。その後、微増傾向が続くが、累加雨量205mmを記録した8:00以降、崩壊土量は急増を始めた。一方、河川流量は、本川で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であった。また、土砂・洪水氾濫が開始するのは、合流地点上流の西谷で10:50、砂防基準点下流では11:17であった。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結果となった(図-2)。

上記の結果から、表-2に示す時刻に、避難を開始したとして計算したエージェントの避難達成率の時間変化を図-3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(ケース5)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。

表-1 避難者の行動ルール

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
避難経路	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50cm以上
避難速度	平常時	通常の歩行可能者:1.0m/s 7歳以下・65歳以上:0.5m/s *勾配補正係数:あり *密度補正:あり
	浸水時	水深50cmで移動速度0m/s。 50cm以下は線形に低下。

表-2 避難開始のタイミング

	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
ケース4	12:00	(下流氾濫開始から40分後)
ケース5	13:00	(下流氾濫開始から100分後)

*ケース4、5は区域3のみ実施

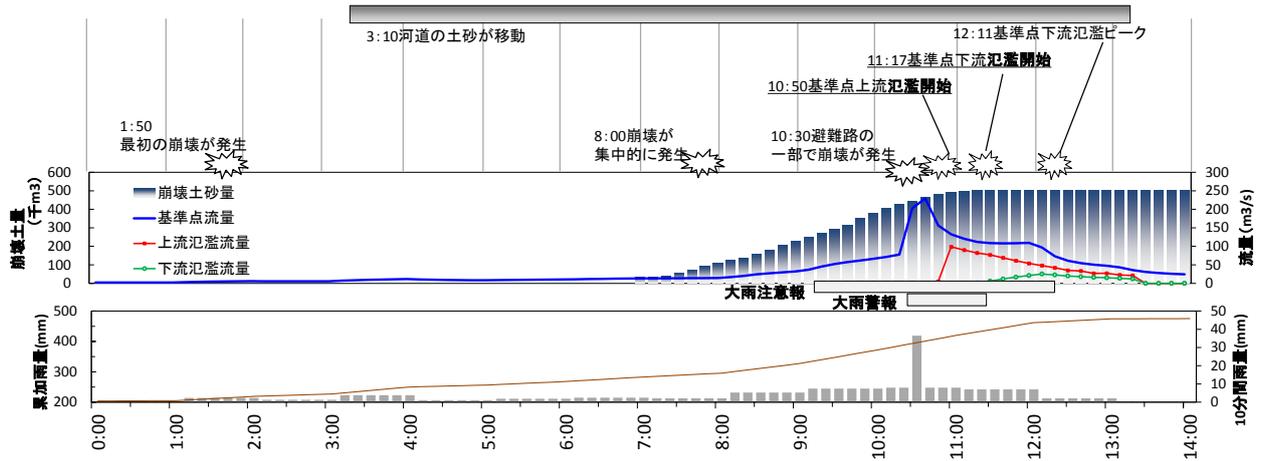


図-2 土砂移動現象の発生時刻

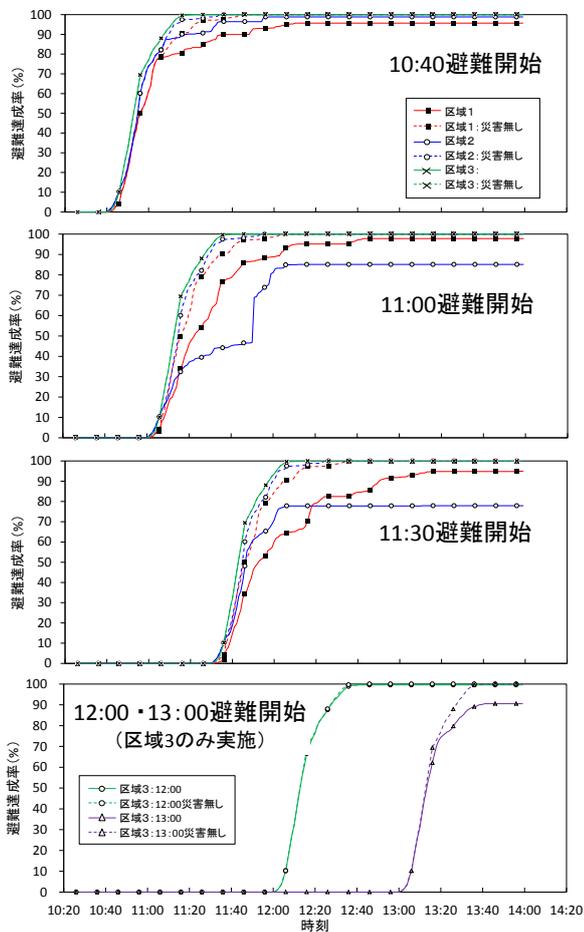
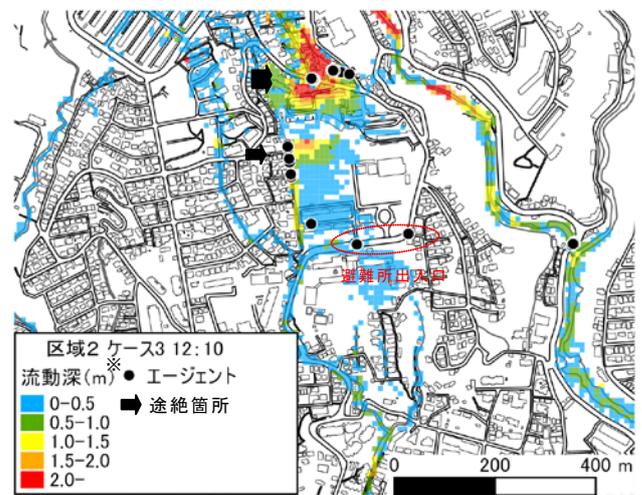


図-3 避難達成率計算結果

3.4 考察

3.4.1 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時間以上の時間差があり、急激に崩壊が発生し始める時刻（8:00）まで6時間以上の時間差があった。また、シナリオでは、河川流量のピークに合わせて土石流が発生する条件としているため、土砂・



※流動深は元の地盤から土砂堆積を含んだ水面までの高さを示す

図-4 避難時の道路途絶状況例(区域2ケース3 12:10)

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で示されたような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。

3.4.2 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、災害無しの計算から、年齢による歩行速度の違いや、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。加えて、最初の崩壊や崩壊の急増を契機に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、氾濫後の避難開始では、避難時間が遅延し、道路途絶により避難所に到達できない恐れがあることがわかる(図-4)。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。

4. まとめ

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、一連の現象の発生タイミングと、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、検討した降雨に対しては、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。

実際の豪雨時に、同様の現象、同様の避難状況が再現されるものではなくても、本検討のような単純な条件による検討だけでも、図-2～図-4のように「河川流量のピークよりも早い段階で、斜面崩壊が発生し始めた」、「土砂・洪水氾濫が発生するよりも、早いタイミングの避難が安全」、「氾濫後の避難は非常に危険」、「土砂氾濫時には通行できない街路が発生する」など、警戒避難上重要な情報が得ることができた。また、将来的に検証が進み再現性が向上すれば、地震分野などと同様に事前の避難時間の試算などにも活用できることが期待できる。一方、地域住民に対しても、早めの行動の喚起に加え、実際の間接地での現象やそのあとに発生する現象を想像する学習ツールとして、

活用が期待できる。

今後、よりきめ細かな災害情報の作成においては、降雨等の観測情報に加え、このようなそれぞれの地域特有の避難時の制約条件なども考慮できるよう本手法の活用方法の検討を進めたいと考える。

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) 栗原淳一、山越隆雄、大谷忠夫、麿嶋直樹、佐口治、白杵伸浩：わかりやすい土砂災害情報に関する社会実験、平成19年度砂防学会研究発表会概要集、pp.196～197、2007
- 2) 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、pp.138～145、2005
- 3) 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、p22、2013
- 4) 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、pp.15～22、2013
- 5) 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、pp.29～34、2012
- 6) 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

秋山 怜子



(独)土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム交流研究員
Reiko Akiyama

高原 晃宙



(独)土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム研究員、博(農)
Dr. Teruyoshi TAKAHARA

木下 篤彦



(独)土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム主任研究員、博(農)
Dr. Atsuhiko KINOSHITA

石塚 忠範



(独)土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム上席研究員
Tadanori ISHIZUKA