

エージェントベースモデルによる避難行動シミュレータの構築

○渡邊康平 小田中悠 中井豊 市川学 (芝浦工業大学)

Agent-Based Evacuation Behavior Modelling and Simulation

* K. Watanabe, Y. Odanaka, Y. Nakai and M. Ichikawa (Shibaura Institute of Technology)

概要— 熊本地震では、想定を上回る 11 万人もの住民が避難を余儀なくされた。被災者の避難行動は、駐車場等での車中泊や近隣施設への避難など多岐にわたり、指定外避難所へ避難する住民が大勢発生した。避難所の分散は、自治体の避難者把握を困難なものとし、指定外避難所へ支援が行き届かないという問題をもたらした。そこで、本研究ではエージェントベースによるアプローチで避難者一人一人の避難行動を表現可能なシミュレーションモデルを構築する。これにより、複数シナリオを想定した綿密な地域防災計画の策定及び訓練効果の向上に寄与することを目的とする。本稿では、避難行動のモデル化及び避難行動シミュレータを構築した。

キーワード: エージェントベースモデル, 避難行動, 熊本地震

1 はじめに

2016 年 4 月 14 日, 16 日に熊本県熊本地方を震源とする最大震度 7 の地震が発生し, 甚大な被害をもたらした。熊本市の発災以前の試算では, 避難者数を 57,946 人と想定していたが, 活発な余震活動等から最大で約 11 万人もの住民が避難を余儀なくされた¹⁾。想定を上回る避難者が発生した事で, 指定避難所の収容人数を超過する事態に陥った。これにより, 被災者の避難行動は, 駐車場等での車中泊や近隣施設への避難など多岐にわたり, 指定外避難所へ避難する住民が大勢発生した。避難先の分散によって自治体は避難者の実態把握が困難となり, 指定外避難所へ支援が行き届かないという問題をもたらした。想定を上回る被害が生じた要因として, 震度 6-7 クラスの地震の連続発生が挙げられる。今後, 試算による被害想定を超える震災がいつ起きてもおかしくなく, 先述した問題への対応が急がれる。

地域防災計画の課題として, 不正確な避難者推計により, 計画が頓挫し被災地へ適切な支援を行えないことが挙げられる。避難者推計には, どういった属性を持つ被災者がどの程度, どのような避難行動を取るのかを明らかにする必要がある。また, 複数シナリオを想定した計画を立てることが重要である。そこで本研究では, エージェントベースによるアプローチで避難者一人一人の避難行動を表現可能なシミュレーションモデルを構築する。これにより, 被災者の避難状況を擬似的に生成することが可能となり, 複数シナリオを想定した綿密な地域防災計画の策定に寄与することを目的とする。また, 作り出された擬似的避難状況を避難所運営ゲーム等に用いることで, より現実的な訓練・研修を実施可能となる。加えて, 実災害で起こりうる被害を想定した複数シナリオを作成することができるため, 様々な状況下での訓練等の実施を通じて対応力を高めることが期待できる。

2 関連研究

マルチエージェント技術を用いた避難行動シミュレーションの研究は 20 年来行われている。エージェントベースモデル (ABM) とは, 避難者などの意思決定主体をエージェントとして捉えモデル化する手法である。複数のエージェントが相互作用を及ぼすことで, 複雑

な社会現象を表現できる。村木ら (2007) の研究では, セル型の環境, 居住地や土地勘の有無, 避難場所認知度等を属性として持つエージェントを用いて広域災害避難シミュレーションをするための ABM を構築した²⁾。以上のように, 避難行動に影響を与える要因を局所的に表現した避難行動 ABM を構築した研究が多く行われている。しかしながら, 避難行動に与える要因を包括的に捉え, 現実社会を模した仮想環境でシミュレーションした研究はない。

3 方法

本稿では, 避難行動シミュレータの構築及び避難行動のモデル化について説明する。

3.1 シミュレーションモデルの構築

本稿で構築するシミュレータは, ABM 実装 Java ライブラリ SOARS Toolkit³⁾ を利用し, 建物間の距離情報といった地理情報や世帯構成を再現した都市モデルを表現したシミュレーションモデルである。

3.1.1 仮想熊本市モデル

モデルのケーススタディとして人口約 66 万人の熊本県熊本市を例に仮想都市モデルを構築した。都市情報は, 国土数値情報等を利用した。また, 熊本市の人口・世帯分布を考慮するにあたり, 国勢調査の統計情報をもとに合成した仮想的な個人・世帯情報 (以下, 模擬個票⁴⁾) を利用した。SOARS では, スポットと呼ばれるエージェントが相互作用する場 (住宅や事業所等) を表現できる。そこで, 世帯, 事業所, 教育機関, 避難所をスポットとして定義した。

3.1.2 エージェントの行動

エージェントは模擬個票における仮想個人に対応し, 属性情報として年齢, 性別, 世帯等を持つ。本稿では, 模擬個票の属性情報, NHK 国民生活時間調査 (2015) の行為者率分布から行動の開始/継続時間を割り当てた松井ら⁵⁾の社会シミュレーションプラットフォームを用いてエージェントの日常行動を定義した。エージェントはそれぞれ自宅を持ち, 年齢, 職種等によって日常行動を割り当てられ, 行為者分布に従い社会人であれば出勤, 学生であれば登下校する。移動時間は, 一律に 15 分と仮定する。発災後のエージェント行動に関しては次節で説明する。

3.1.3 避難行動モデル

文献調査により、災害発生時の避難行動に影響を与える要因の整理及びフローチャートを用いた避難行動発生メカニズムの可視化を行う。

文献調査及び要因整理の結果、避難行動に影響を与える要因は個人、環境、情報、地域・家庭特性の4カテゴリに分類できた。この分類は、シミュレーション上でどこに持たせる情報かを基準とする。本研究では、文献調査を行なった21文献中、複数の震災事例で取り上げられていた項目を普遍であり、影響のある要因とした。避難行動に影響を与える主な要因として、住宅被害の程度、ライフラインの機能停止等があげられる。また、他のカテゴリが内包する要因との相互関係については、Fig.1に示すように各カテゴリの右上に示したアイコンで、各要因が関連していることを示している。避難行動発生メカニズムを可視化した結果をFig.2に示す。

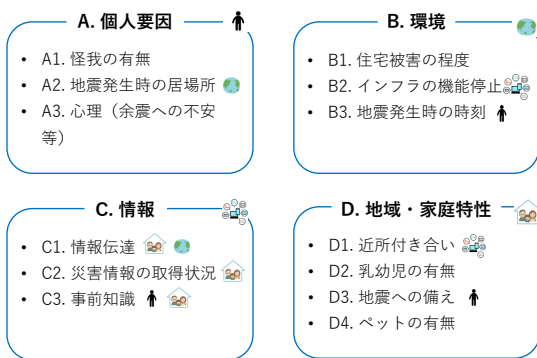


Fig. 1: 避難行動に影響を与える要因

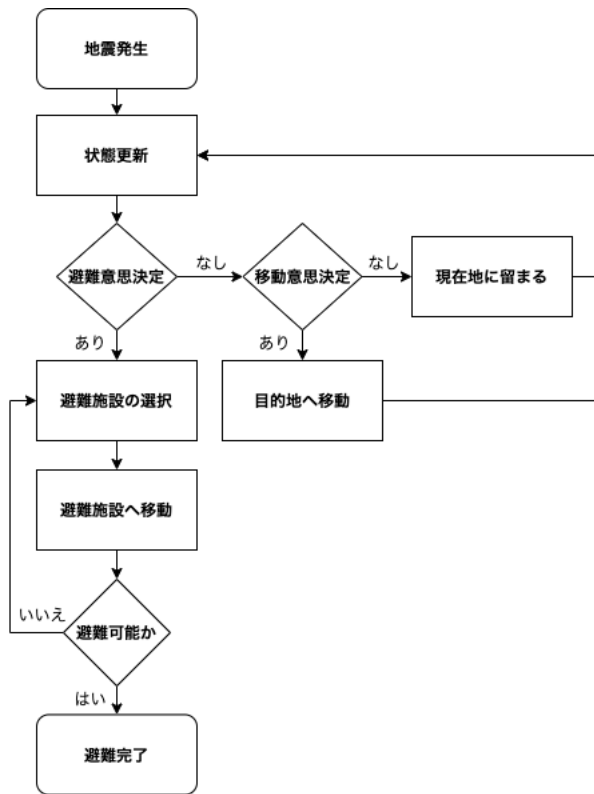


Fig. 2: 避難行動フローチャート

続いて、フローチャート構造の詳細について述べる。地震発生後、エージェント及びスポットの状態が更新される。状態更新の詳細については後述する。避難意思がある場合は、「避難所の選択」へ遷移する。避難所の選択は、阪神淡路大震災の際に自宅から400m以内の避難所へ避難する被災者が88%であったことから⁶⁾、徒歩圏の避難所を選択することとする。本シミュレータの避難所選択方法は、標準地域メッシュを用いて表現している。標準地域メッシュとは、地表面をルールに基づき分割したメッシュを標準化したものを指す。また、メッシュにはコードが割り当てられており、メッシュコードを用いることで特定のエリアを参照できる。Fig.3に示すフローのように、エージェントが滞在するスポットを内包したメッシュ内の避難所スポットを探索する。探索するメッシュの大きさは、250m四方の4分の1地域メッシュ（以下、5次メッシュ）から始まり、避難所がなければ4次メッシュ、3次メッシュ、2次メッシュのようにメッシュの次元を下げることで探索範囲を広げていく。メッシュを用いた探索法、探索範囲の拡大のイメージをFig.4に示す。

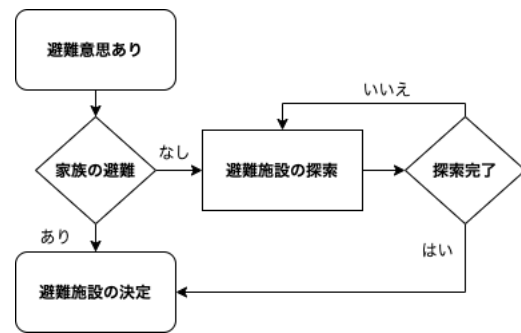


Fig. 3: 避難所選択フロー

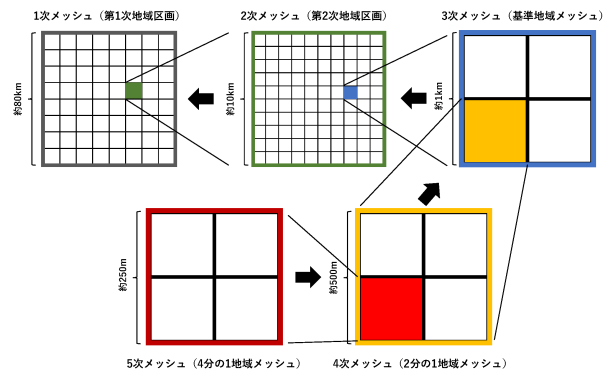


Fig. 4: 避難施設の探索方法

一方で、エージェントの家族が避難所へ移動している場合は、避難所の探索を行わず家族が居る避難所を選択する。本シミュレータでは、通信の断絶を表現していないため、被災地全エリアで通信は可能と仮定する。そこで、家族と連絡がつかず一度1人で避難し、通信復旧後に連絡を取り、家族の元へ移動するといった行動は想定しない。ただし、通信の断絶状況を仮想都市で表現することで、以上で挙げた行動をシミュレータに組み込むことは可能である。

「避難施設へ移動」へ遷移したのち、避難施設の収容人数超過判定を行い避難が完了する。超過の場合は、「避難所の選択」に遷移し繰り返す。本稿では、避難所の収容人数を500人、避難失敗回数が5回となると避難を諦め自宅へ移動すると仮定した。

次に、避難意思がない場合、エージェントが現在地から移動する意思を持っているか否かを判定する。堀口ら⁷⁾の研究によると、外出中の人の55.8%が自宅へ移動を開始し、一斉に帰宅行動を試みる被災者が多数であることが示唆されている。そこで本稿では、子供を迎えに行く等の行動も予想されるが帰宅行動のみを考慮する。帰宅行動を起こせるかに関しては、徒歩以外の移動手段の有無、自宅までの距離が大きな要因となると考えられる。シミュレーション上では、発災直後の避難を想定しているため電車、バス等の公共交通機関は停止すると仮定し、状態更新時に徒歩以外の移動手段を持たないエージェントが8割になるよう割り当てる。また、学校/職場から自宅までの距離は、建物の緯度経度情報を用いて2地点間の直線距離を求めたものとする。帰宅可能かについては、廣井ら⁸⁾の研究より以下のように定義した。

- 直線距離が10km以内のエージェントは帰宅可能である。
- 10km以降は、1kmますごとに帰宅可能率が10%減少する。
- 20km以降は、帰宅不可能とする。

Fig. 5に示すように移動手段の有無、自宅までの離情報を用いて移動意思があるかどうかを判定する。

移動意思がある場合は、自宅へ移動する。移動意思を持たない場合は現在位置へ留まる。自宅へ移動したエージェントは自宅スポットの被害状況等を確認する。これによりエージェントが持つ情報が更新され、もう一度避難するか否かの意思決定が行われる。

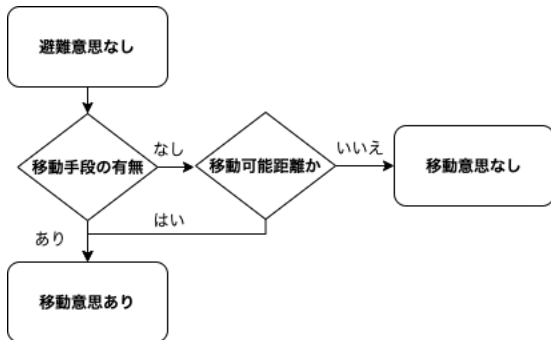


Fig. 5: 移動意思決定フロー

続いて、「避難意思決定」の判定構造について解説する。まず、前述した避難行動の要因整理により抽出した項目がどの程度避難行動に影響を与えるか調査した方法、結果について説明する。本稿では、コンジョイント分析の手法を参考に調査を行う。コンジョイント分析とは、多変量解析を用いた分析手法である。主に、マーケティングに用いられ、商品やサービスのコンセプト決定するため使用される。アンケートの回答により全体効用値を求め、部分効用値を算出する手法である。例えば、回答者に条件(価格、色、デザイン)の異なる商品(プロファイル)を複数提示し、どの商品を買いたいのか評価してもらう。このように、商品全

体を評価することで、価格や色、デザインの各要素がどの程度、商品購入に影響をもたらしたかを算出できる。そこで、本稿ではコンジョイント分析手法を用いて、住宅被害やライフラインの停止状況といった要因がどの程度避難行動に影響を与えるか調査する。

アンケートで提示するプロファイルは、Table1に示す質問項目をもとに作成した。ただし、上記の質問項目で条件の異なるプロファイルを作成するとすると、組み合わせが1296通りと膨大になり、アンケート回答に負荷がかかる。そこで、コンジョイント分析の特徴である直交表を用いてプロファイル数を減少させる。直交表とは、任意の2因子について、その水準のすべての組み合わせが同数回ずつ現れるという性質もつ。この性質により、全組み合わせを実施せずとも同等の結果を得ることができる。結果、1296プロファイルから36プロファイルにまで減少させることができた。作成した直交表をTable2に示す。

Table 1: 質問項目

属性(項目)	水準(選択肢)		
	自宅	学校/職場	
発災時の居場所	自宅	学校/職場	
天気	良好	不良	
徒歩以外の移動手段	なし	あり	
滞在する建物の被害状況	無被害	一部損壊	半壊
滞在する建物のライフライン停止状況	無被害	電気	水道
近隣の人の避難状況	なし	あり	
季節	春/秋	夏	冬
発災時刻	朝	昼	夜

Table 2: 直交表(一部抜粋)

No.	居場所	天気	移動手段	建物被害	ライフライン停止	近隣	季節	時刻
1	自宅	良好	なし	無被害	無被害	なし	春/秋	朝
2	学校/職場	良好	なし	無被害	水道	あり	夏	夜
3	自宅	不良	なし	半壊	水道	なし	冬	朝
4	学校/職場	不良	なし	一部損壊	電気	なし	夏	朝
5	学校/職場	良好	あり	一部損壊	水道	なし	春/秋	昼

アンケート内容としては、回答者が各状況(条件の異なるプロファイル)下におかれた場合、避難行動を起こすか否かを問う形式となっている。プロファイルの提示例をFig. 6に示す。アンケート回収後、ロジスティック回帰分析を用いて確率モデルを作成した。ただし、本稿では回答者が2名と極めて少ないため、避難の意思決定に用いる要因の選定は行わず、全ての因子をモデルに組み込む。

カード	
季節・天気・時刻	被害状況
季節 春・秋(3~5、9~11月)	インフラ被害 無被害
天気 良好	建物被害 無被害
時刻 朝(AM6:00~AM9:00)	
居場所・移動・周囲	
居場所 自宅	
徒歩以外の移動手段 なし(徒歩のみあり)	
周囲の人々 避難なし	

Fig. 6: プロファイル提示例

「避難意思決定」の判定には、以上で作成した確率モデルを用いる。本項ではこの確率モデルに Table1 であげた質問項目の 8 属性 (住宅被害等)、各水準 (無被害、一部損壊、半壊等) を説明変数として入力し、目的変数である避難するか否かを出力する。このようにして、意思決定に与える要因を統合し、避難行動の意思決定を行う。

地震発生時にエージェントやスポットに割り当てる情報、方法について説明する。移動手段の有無や建物被害の程度といった情報は、エージェント、スポットが保持している。これらの情報と回帰モデルを用いてエージェントの避難意思決定が行われる。また、意思決定後の行動を起こすタイミングに関しては、東日本大震災津波調査⁹⁾の避難開始時刻のアンケート結果を用いて揺らぎを持たせている。

以下、回帰モデルに使用する各因子の設定について述べる。本シミュレータでは、S 値情報を用いて、仮想環境都市での被害状況を再現している。SI 値とは、地震によって建物にどの程度被害を生じさせるかを数値化した値である。計測震度と SI 値の対応表を Table3 に示す。SI 値が高ければ建物の倒壊、ライフラインの停止といった被害が大きくなる。本シミュレータでは、地震発生時に 5 次メッシュに対して SI 値が割り当てられたファイルを入力として、被害状況を算出している。

Table 3: 計測震度, SI 値の対応表

計測震度	SI値
0	-
1	-
2	-
3	1.1 - 3.7
4	3.8 - 12.5
5弱	12.6 - 22.8
5強	22.9 - 41.6
6弱	41.7 - 75.8
6強	75.9 - 138.1
7	138.2以上

建物のライフラインの停止状況を表現するにあたって、SI 値を用いて 5 次メッシュ単位でのライフラインの停止状況を模擬的に作り出した。この値をスポットの状況更新時に割り当てる。住宅被害の程度に関しては、模擬個票に付与されている仮想個人が居住する建物情報から建物構造タイプ (普通建物、堅ろう建物等) を抽出し、これらを東京都防災ホームページによる建物被害の被害想定手法¹⁰⁾で算出された計測震度 ()・建物構造別 (木造 6 区分、非木造 3 区分) 倒壊率と組み合わせることで表現する。分類としては、模擬個票の建物構造タイプ「普通建物」が木造に当たり、それ以外は非木造とした。震度、構造別の倒壊率を Table4 に示す。一部損壊率については言及されていなかったため、 $100 - (\text{半壊率} + \text{全壊率})/2$ と仮定した。無被害についても同様の値である。

以上で説明した住宅被害の程度が確率モデルの説明変数として代入され、目的変数として避難するか否かが出力される。震度が高大きいほど住宅被害が深刻と

なり、避難者が増加することが予想される。

Table 4: 震度、構造別倒壊率

計測震度	建物被害	木造	非木造
6.5	半壊	14.30%	15.50%
	全壊	7.00%	4.80%
7	半壊	52.70%	43.30%
	全壊	21.30%	20.20%

近隣の人の避難状況については、エージェントが滞在する 5 次メッシュ内の建物から避難したエージェント数を発災時の全建物内人数で割った値を用いて判定する。0.5 以上で近隣の人の避難ありとする。以上で述べたエージェント、スポットが保持する情報を以下に記す。

エージェント

- 発災時の居場所
- 徒歩以外の移動手段
- 自宅までの距離
- 避難の試行回数
- 家族の居場所
- 避難、移動意思

スポット (シミュレーション環境: 仮想熊本市)

- 発災時刻
- 天気
- 季節

スポット (建物)

- 建物の被害程度
- 建物のライフライン停止状況
- 同建物内から避難した被災者の数
- 最寄り避難所

4 結果

モデルの妥当性を評価するため、熊本地震と同様の規模の地震 (Table5) を発生させ、避難者の推移を比較する。モデルのシミュレーション条件とシナリオを以下に示す。ただし、熊本地震と異なる点として、避難した後、地震が落ち着き避難をやめるといった行動は考慮できていない。

シミュレーション条件

- 開始時刻: 0 日 00:00 (2016 年 4 月 14 日)
- 終了時刻: 2 日 23:00 (2016 年 4 月 16 日)
- 天候: 良好
- 季節: 春

Table 5: シミュレーションに用いた地震情報

熊本地震	シミュレーション	最大震度	SI震度
2016年4月14日	0/21:26	7	138.2
2016年4月15日	1/0:03	6強	107
2016年4月16日	2/1:25	7	138.2

上記の条件で 10 回のシミュレーション実験を行った時の、避難所スポットに滞在するエージェント滞在数の推移を Fig. 7 に示す。日常行動 (就学/出勤先) の割り当て、避難所選択はシミュレーション毎にランダ

ムに行われるが、試行 10 回とも同じような推移となった。就学/勤務先に関しては、発災時刻が 21:26 分と夜であったため、帰宅済みエージェントが多数であったことが影響していると考えられる。避難所選択についてもエージェントが滞在するスポットと同 5 次メッシュ内の避難所を選択する、かつ避難失敗 5 回で避難を諦めるよう設定していたため、避難者数の増減はみられなかったと考えられる。

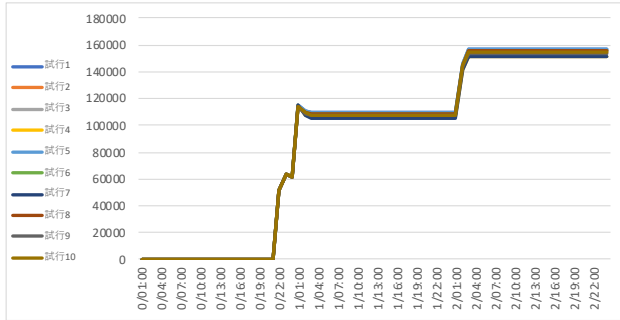


Fig. 7: 避難所滞在外者の推移

続いて、試行 10 回から抽出した各スポットのエージェント数の推移を Fig. 8 に示す。また、Fig. 9 に熊本地震時とシミュレーションの避難者数を比較した図を示す。熊本地震の避難者数は文献¹¹⁾より取得した。

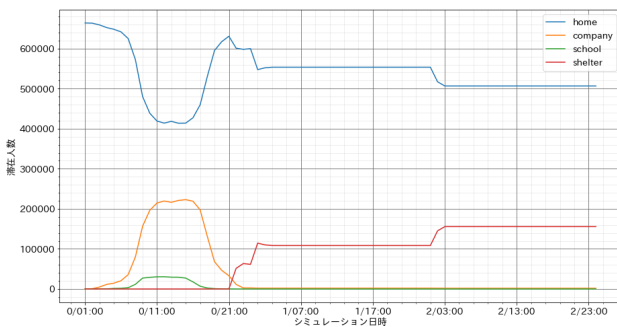


Fig. 8: 各スポットにおけるエージェント数の推移

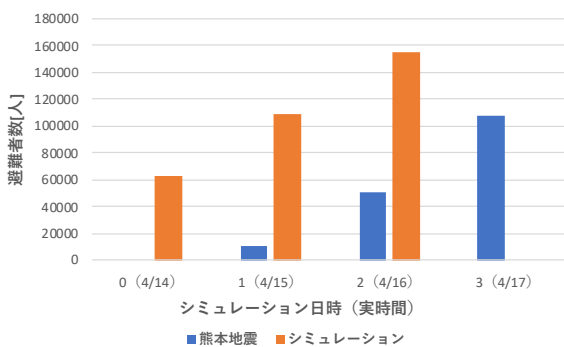


Fig. 9: 熊本地震との比較 (避難者数推移)

避難意思決定モデルの回答者が十分でないことが前提としてあるが、避難者数が一致していない。本稿の地震情報では、熊本市全域に震度 7 の地震を発生させているため、熊本地震よりも大きな被害が発生し避難者数が増加したと考えられる。熊本地震とシミュレータで与えた震度情報を比較した結果を Fig. 10 に示す。

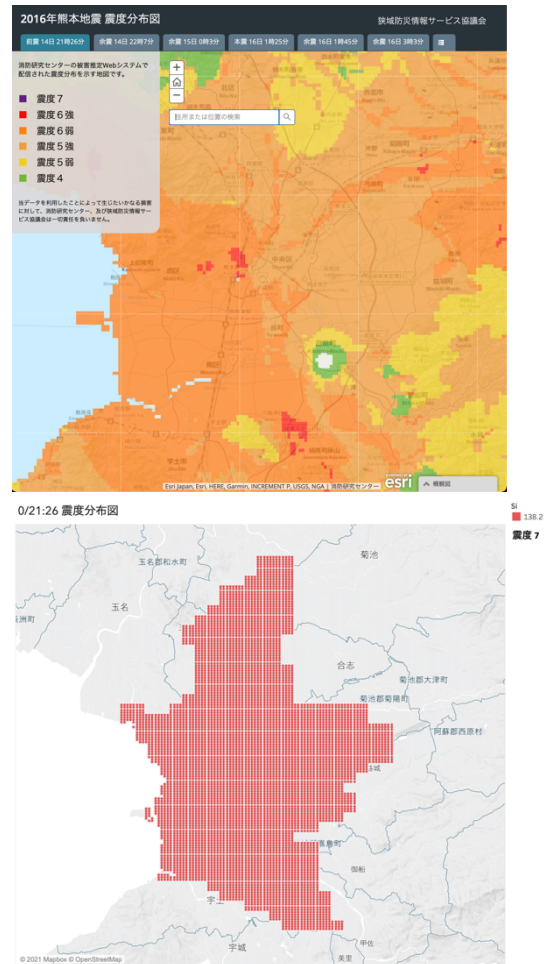


Fig. 10: 熊本地震 (上¹²⁾) とシミュレータ (下) に用いた震度分布

これは、シミュレータの再現性を高める解決法の一つとして、シミュレーションに熊本地震と同様な震度分布を考慮した地震情報を入力することが挙げられる。震度情報が避難者分布、避難者数に影響を与える点を以下に示す。まず、震度分布を用いて住宅被害、ライフラインの被害推計を行なっていることが挙げられる。避難意思決定において、影響を与える要因のうち住宅被害等は密接に関係があり、多大な影響を与えると考えられる。例えば、自宅の住宅被害が大きく生活が困難な場合、避難するしかないだろう。従って、震度分布を詳細に与えることが、シミュレータの再現性を高めることに繋がると言える。Fig. 11 にシミュレータ上での自宅分布、それらの住宅被害程度を地図にプロットした図を示す。図から読み取れるように、熊本市全域に震度 7 の地震を発生させたことで、全壊、半壊等の重度の被害を受けた自宅が多く見られる。これには、震度情報だけでなく、建物の被害推計が関係していると考えられる。現状の住宅被害算出では、自宅の構造を木造かそれ以外の 2 種類で分類し、住宅構造別の倒壊率を用いている。そこで、住宅構造を詳細に区別しそれらに合わせた倒壊率を用いることが必要となるだろう。以上の点も、シミュレータの再現性向上につながるだろう。

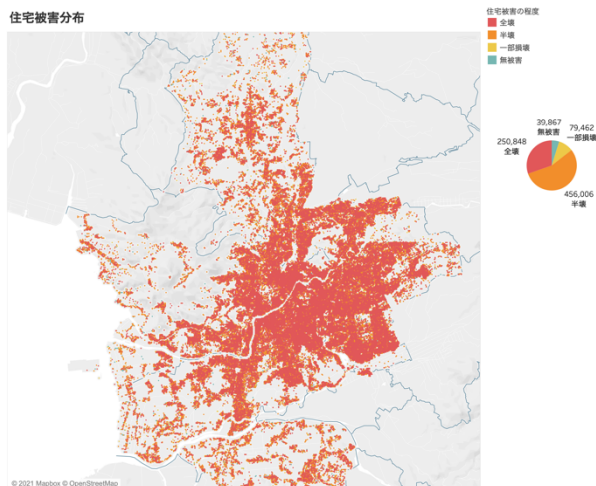


Fig. 11: 自宅被害分布
(シミュレーション : 0/22:00)

続いて、Fig. 12, 13 に避難者分布を示す。発災後の経過日数が異なる避難者分布のため単純に比較はできないが、避難者数の分布を比較すると、両者とも熊本市東部に避難者が分布しており、ほぼ一致している。

現状のシミュレータでは、意思決定モデルの精度が十分でないため、今後改善の余地があるが、おおよそ熊本地震と同等な結果を出力することができた。現状、避難するか否かの意思決定は、コンジョイント分析時にあげた質問項目 8 属性のみを説明変数としている。シミュレータの再現性について述べると、意思決定に用いる説明変数が十分ではないこと、アンケート回答者が少数であることにより、再現性は低いと考えられる。アンケートに関して、現段階では、調査対象 3 地域を想定し 1,200 サンプルの回収が必要であると考えられる。以上のサンプル数を回収し分析することで、有意な差を見いだすことができれば、説明変数に地域性、エージェントの年齢、家族構成、乳幼児・高齢者の有無といった情報も加味できる。意思決定に用いる変数が増加すること、推定精度が向上することでシミュレータの再現性が高まると考えられる。

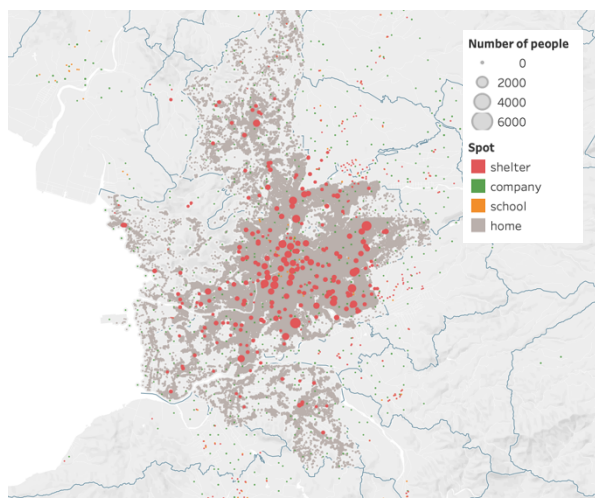


Fig. 12: 避難者分布 (シミュレーション : 0/22:00)

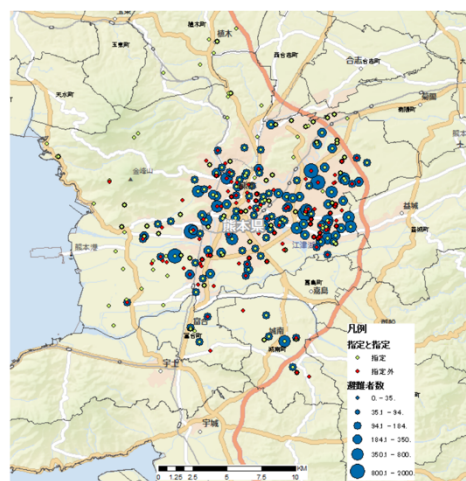


Fig. 13: 避難者分布¹³⁾ (熊本地震:4/23 時点, シミュレーション上で 8 日目)

最後に、各避難所内に滞在する被災者の年齢分布を Fig. 14 示す。避難所の年齢分布は地域性や時間帯によって変化すること考えられる。以上のように、地域性等を考慮した訓練シナリオを生成できることで、その地域で起こりうる実災害を想定した訓練が可能となる。訓練者が今後担当する可能性のある地域の避難所には、Fig. 14 shelter1 のように乳幼児等が多く滞在する状況が発生しやすいと想定できるのであれば、乳幼児への対応を重点的に行うといったことも可能となる。複数シナリオを想定して訓練を実施することは重要であるが、いつ地震が起きてもおかしくない状況下でそれら全てを実施することは困難であると考えられる。そこで、実施すべきシナリオに優先順位をつけることが望まれるだろう。また、本シミュレータは、複数のシナリオを生成できるため、訓練実施者の対応力向上に寄与できるであろう。

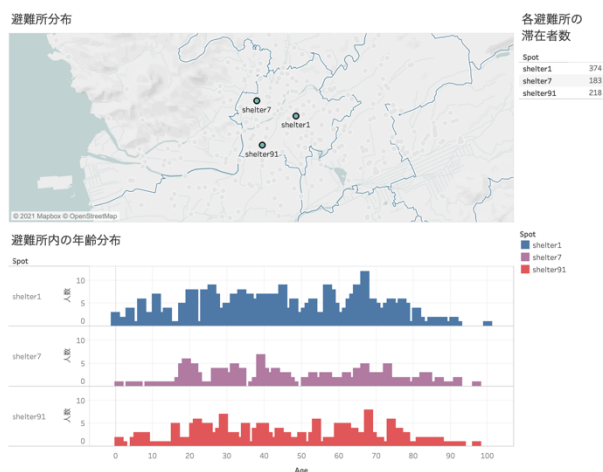


Fig. 14: 各避難所内に滞在する被災者の年齢分布
(シミュレーション : 0/22:00)

5 結論

本研究では、避難行動のモデル化、シミュレーションモデルの構築を行なった。結果、避難行動発生メカニズムを明らかにし、熊本市をケーススタディとして、地理情報、世帯構造を模した仮想熊本市モデルを構築した。シミュレーション結果はおおよそ熊本地震と一致したが、意思決定モデルの改善により実際外に近い結果を出力できると考えられる。また、天候や季節を加味したことで季節の違いなど複数シナリオを生成可能であり、物資貯蓄等の地域防災計画の策定、避難所運営ゲーム等に用いることで様々な状況下を想定した訓練を行え、対応力の向上が見込まれるだろう。

参考文献

- 1) 熊本市政策局危機管理防災総室：熊本地震の検証及び熊本市地域防災計画等の改定について（2017）
- 2) 村木，狩野：地域性を考慮した広域災害避難シミュレーションのためのマルチエージェントモデル，人工知能学会論文誌，**22**巻 4号，416/424（2007）
- 3) 小野，市川，出口：大規模エージェントベースシミュレーションのための SOARS Toolkit の提案，SSI2020，GS6-4-5（2020）
- 4) 原田，村田，枅井：家族類型と世帯内の役割を考慮した SA 法による大規模世帯の合成，計測自動制御学会論文集，**54**巻 9号，705/717（2018）
- 5) 松井，嶋，渡邊，市川：Soars Toolkit を用いた社会シミュレーションプラットフォームの構築，第 24 回社会システム部会研究会（2021）
- 6) 堀切，小谷：阪神・淡路大震災後における住民の避難行動に関する分析，土木計画学研究・論文集，17号，819/826（2000）
- 7) 堀口，小坂：地震時の人間行動に関する研究，総合都市研究，**23**巻（1984）
- 8) 廣井，関谷，中島，藁谷，花原：東日本大震災における首都圏の帰宅困難者に関する社会調査，地域安全学会論文集，**15**巻，343/353（2011）
- 9) 株式会社ウェザーニューズ：東日本大震災 津波調査（2011）
- 10) 東京都防災ホームページ：第 3 部被害想定手法（2007）
- 11) 一般財団法人ダイバーシティ研究所：熊本地震における避難者数の推移と今後の予測について（2016）
- 12) Esri Japan, Esri, HERE, Garmin, INCREMENT P, USGS, NGA | 消防研究センター
- 13) 村上：2016 年熊本地震における避難所の分布と避難所運営に関する実態調査報告，東濃地震科学研究所報告，**39**巻，111/125（2017）