

避難者の情報伝達を考慮した地震・津波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

松島弘^{†1} アランニャ・クラウス^{†2} 狩野均^{†2}

概要: 本論文では、避難者の情報伝達能力を考慮した地震・津波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を提案する。災害避難シミュレーションに関する従来研究の問題点として、避難者の避難移動中の情報伝達が十分に考慮されていなかった。本モデルでは、避難者が移動中に他の避難者に避難経路に関する情報を音声で伝達する行動が導入されている。また本モデルは各種防災行政無線を導入することができる。阪神・淡路大震災時の神戸市、および東日本大震災による津波発生時の石巻市における避難を想定して本モデルを用いたシミュレーションを実行した。シミュレーション結果から、各災害において本モデルの妥当性と避難者間の音声による情報伝達の有効性を示すことができた。

キーワード: マルチエージェント, 災害避難, シミュレーション, 防災施策, 情報伝達, 広域

Multiagent model for Earthquake/Tsunami-Evacuation Simulation Considering Information-Carrying Capacity of Evacuees

HIROMU MATSUSHIMA^{†1} CLAUD ARANHA^{†2}
HITOSHI KANO^{†2}

Abstract: In This paper, we propose a multi-agent model for evacuation simulation of earthquake and tsunami. Differently from conventional models, our model takes into account the communication behavior of evacuees during the evacuation procedure. In the proposed model, each agent is able to inform other agents of the evacuation route by sound. This makes it possible to take into account the effects of radio systems in disaster mitigation. We simulated the evacuation of Kobe city during the Great Hanshin-Awaji Earthquake, and the evacuation of Ishinomaki city during the Great East Japan Earthquake and Tsunami. Simulations results were in good agreement with the actual data. From simulations results, we confirmed that evacuee's communication behavior was effective in evacuation of earthquake and tsunami.

Keywords: Multi-agent, Disaster Evacuation, Simulation, Disaster Mitigation, Communication, Wide Area

1. はじめに

阪神・淡路大震災や東日本大震災など、日本では幾度となく大規模な震災が発生し、そのたびに多くの住民が甚大な被害を被っている。このような住民の数を減らすために、自治体はより適切な防災計画を作成する必要がある。しかし、どのような防災計画が適切かを判断するために必要な評価は、現実においては大きなコストが発生するため困難である。このため自治体が、各種災害における避難状況シミュレーションにより、防災計画の検討を容易に行うことのできる環境の構築が望まれる。

地震、津波それぞれにおいて、災害発生後の避難状況を再現するシミュレーションに関する研究は多く行われている[1][2][3][4]。しかし従来の研究では、防災計画の評価に適さないものが多い。また避難者同士や避難者-誘導員間で情報伝達を行いながら避難移動を行う状況を十分に考慮し

た研究はあまり見当たらない。

そこで本論文では避難者や誘導員などの音声伝達行為を考慮した地震・津波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を提案する。本モデルでは、避難者や誘導員を模したエージェントが、移動の途中で避難所に関する会話や避難の呼びかけを音声により周囲に広く伝達する行動を再現できる。また本モデルは防災行政無線や誘導員の配置および効果の検討が可能である。

以下では、まず研究分野の概要として災害避難の現状、ならびに従来研究の問題点について述べる。次に提案するモデルについて述べる。最後に本モデルの評価実験として、兵庫県神戸市における阪神・淡路大震災、宮城県石巻市における東日本大震災による津波発生時の避難状況を想定したシミュレーションをそれぞれ実行し、各種災害時での避難者の音声による情報共有行動の重要性、および本モデルの有効性を示す。

2. 研究分野の概要

2.1 災害避難の現状

1995年に発生した阪神・淡路大震災における避難では、

^{†1} 筑波大学大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻
Department of Computer Science, Graduate School of Systems and
Information Engineering, University of Tsukuba
^{†2} 筑波大学システム情報系情報工学域
Division of Information Engineering, Faculty of Engineering, Information and
Systems, University of Tsukuba

被災地域において住民の避難誘導が十分に行えなかったことが確認されている[5][6]. また2011年に発生した東日本大震災により発生した津波避難では、自治体の早急な避難情報の提供が避難者から望まれていた[7].

また、それぞれの災害に共通する重要な要素として、避難者間の情報伝達が挙げられる. 阪神・淡路大震災では上述の理由から、避難者はラジオまたは周囲の他人から避難所の情報を得なければならなかったと考えられる. 東日本大震災においては実際に避難者間で津波からの避難について相談、呼びかけを行い、その結果避難を開始したという避難者が多くみられている[7].

2.2 関連研究

地震の避難を対象としたシミュレーションの研究として、避難者の多様な状態と建物の物的被害を考慮したシミュレーション[1]や、任意の広範囲な地域の避難状況を一般のPC上で再現可能なシミュレーション[2]が研究されている. しかし、これらの研究では拡声器を所持した誘導員や固定系の防災行政無線といった要素を避難状況に反映することができず、また避難者間での避難経路に関する情報のやり取りも限定的である.

一方、津波の避難を対象としたシミュレーションとしては、情報伝達・避難移動・津波伝搬を統合した総合シナリオシミュレーション[3]や、避難者の避難行動を調査しその結果を避難経路選択に応用したシミュレーション[4]が研究されている. しかしこれらの研究において、避難所の受け入れ状況の変化や津波の浸水にともなう避難者がやり取りする避難目的地に関する情報の変化、ならびに待機中の人が通りすがりの避難者から避難を促されるといった状況は考慮されていない.

2.3 提案する手法の基本方針

2.2節で述べた問題点を踏まえ、本論文では避難者や誘導員などの音声伝達行為を考慮した地震・津波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(以下、本モデル)を提案する. 本モデルは村木らの地震避難シミュレーション[2]におけるモデル(以下、従来モデル)を基に以下の改良を行った.

(1) 音声による情報伝達行為の追加

本モデルでは、避難者などを表すエージェントが、微細な道路領域を表すセルを通じて他エージェントへの音声による情報伝達行動を追加している. これは従来モデルにおけるエージェントの行動ルールならびにセルのデータ構造や更新ルールの拡張を行うことで実現した. またこの改良によって、本モデルでは防災行政無線の要素をシミュレーションに反映することができる.

(2) 津波避難への対応

本モデルでは、地震の避難だけでなく津波の避難も再現できるように従来モデルから拡張を行った. 拡張として、高

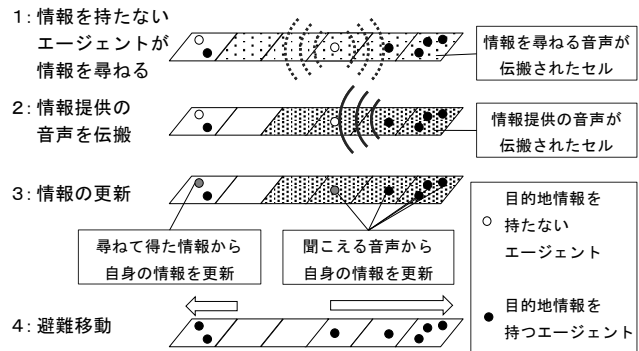


図1 本モデルにおける避難者の避難行動

台を考慮に入れた避難移動や呼びかけによる避難開始をエージェントの行動ルールに導入した.

3. 提案する手法

本モデルは、①避難者や誘導員、防災行政無線を表すエージェント、②道路情報を一定間隔で区切った領域情報セル、④地域情報や津波における浸水状況を反映するための領域情報メッシュによって構成されている. 本モデルはナビゲーション規格フォーマット Version2.2 規格[8]のカーナビゲーション用の地図データベースと地域データファイル群を入力とし、それぞれセルの生成、地域情報の設定に利用する.

本モデルにおけるシミュレーションの流れを図1に示す. 避難者を表すエージェントはそれぞれ避難の目的地とするセルに向かって避難移動を行う. また、その最中に周辺セルにいるほかのエージェントに対して避難経路情報の要求や提供を行う. 避難経路情報の要求や提供は、送信側のエージェントはセルに対する音声の伝搬によって行い、受信側のエージェントはセルに伝搬された情報から要求の有無や提供された情報の取得を試みることで行う.

ここで避難経路情報とは、特定の避難所までの道のりを表す情報である. 避難経路情報にはその情報の新しさや、だれが発信源であるかという属性が付加されている.

本モデルではシミュレーション時間の1秒を1ステップとする.

3.1 エージェント

3.1.1 エージェントの種類

本モデルにおいてエージェントは、①避難者を表す避難者エージェント、②誘導員を表す誘導員エージェント、③固定系の防災行政無線を表す防災行政無線エージェントの3種類が存在する. 避難者エージェントの目的地は災害の種類や自身の居住地に応じて表1のように決定される. 表1において地震避難時の目的地の決定方法は従来モデルのものを利用した. また、地震、津波の両方の避難時において、避難者は家族などの集団で避難することが多いことが確認されている[7][9]. よって本モデルでは1~5人の避難者集団を1体の避難者エージェントとする.

表 1 避難者エージェントの目的地

避難対象	自宅の位置	分類	目的地	本モデルで新たに追加
地震	マップ内	住民	避難所が存在するセル	
	マップ外 (県内)	近隣流入者	マップの端に位置し、特定の方角に位置するセル	
	マップ外 (県外)	遠方流入者	上記のいずれか	
津波	—	—	避難所または高台のどちらか近い方	○

3.1.2 エージェントの属性および状態

すべてのエージェントは構成人数や歩行弱者の有無、自動車の利用の有無、音声伝達能力が属性として付加される。また現在位置や所持する避難経路情報、周囲に避難経路情報を尋ねているかといった状態を状態変数として持つ。本モデルでは、従来モデルでの属性・状態に加えて、避難者の情報伝達に関する属性・状態を新たに追加した。

3.1.3 状態遷移

状態遷移ルールはエージェントごとに異なる。以下に各種のエージェントの状態遷移ルールを示す。ただし、避難経路情報の提供などの音声の伝搬はセルの状態遷移ルールに含まれる (3.2.3 節参照)。本モデルにおけるエージェントの状態遷移ルールは、従来モデルの状態遷移ルールを参考に新たに設定した。

(1) 避難者エージェント

単一の避難者エージェントの状態遷移アルゴリズムを図 2 に示す。ただし、Time はシミュレーション時刻である。図 2 中のアルゴリズム内の各処理の説明を以下に記す。

A) 避難経路情報の取得

この処理では、セルが状態変数として持つ 2 種類の避難経路情報 (3.2.2 節参照) を取得し、自身が所持する避難経路情報の更新を試みる。また津波の避難のみ、避難を開始していない状態で新たに避難経路情報を得たときにその情報の発信者に応じた確率で避難の意思を更新する。避難の意思が更新された場合、その意思に応じてその避難者の避難開始時間が短縮される。

B) 避難完了判定

目的地に到着したかどうかの判定を行う。目的地に到着したならば、そのエージェントの避難は完了したものと見なし、それ以降の状態の更新は行わず、音声による避難経路情報のやりとりも行わないものとする。ただし、目的地が避難所であり、かつその避難所が収容不可なときは避難行動を継続する。

C) 現在位置の更新

移動速度を計算した後に移動先のセルを決定、現在地セルの更新を行うことにより移動を行う。

移動速度は、歩行による移動の場合は周辺セルの群集密度 [10] や歩行弱者の有無、集団の歩行速度 [11] に基づいて 0~1.43[m/s] の範囲で決定する。車両による移動の場合はブロック密度法 [12] を利用し、最大速度 40km/s としてセルで求めた交通量 (3.2.3 説(4)参照) を超えないように決定する。

交差点での進行方向は、災害の種類、避難経路情報の有

```

Procedure RefugeAgent_Update
if Time(mod 15) = 0
    避難経路情報の取得 ..... A)
end if
if Time ≥ 避難開始時間
    if ( 自動車で移動 and Time(mod 2) = 0 ) or
        ( 徒歩で移動 and Time(mod 15) = 0 )
        避難完了判定
        現在位置の更新
        if 津波避難である ..... B)
            目的地の更新 ..... C)
        end if
    end if
end if
end if
    
```

図 2 エージェントの状態遷移アルゴリズム

無、ほかのエージェントの進行方向などからダイクストラ法、RTA*, 他エージェントへの同調、ランダムのもので選択する。

(2) 誘導員エージェント

誘導員エージェントの状態遷移ルールは、移動と避難者の探索によって構成されている。移動における速度決定は避難者エージェントと同様とし、交差点での方向選択はランダムとする。避難者の探索は半径 50m 以内のセルを走査し、避難者エージェントが存在すれば避難経路情報の提供を行う行動である。

(3) 防災行政無線エージェント

防災行政無線エージェントは、地域条件パラメータによって与えられた周期ごとに避難経路情報の提供を行う。

3.2 セル

3.2.1 セルの種類

本モデルにおいて、セルは高速道路、自動車専用道路を除く道路を 20 間隔で区切った領域を表す。セルには①通常セル、②避難所が隣接している避難所セル、③マップの端に位置するマップ端のセルの 3 種類が存在する。

3.2.2 状態を表す変数

すべてのセルは、セル同士の接続関係などを位置情報として持つ。また、セル上の群衆密度やセル上で取り扱われる 2 種の避難経路情報 $Info_{prop}$ と $Info_{local}$ 、情報を尋ねる音声伝搬されたかを表す状態 S_{asked} などを状態変数として持つ。ここで $Info_{prop}$ と $Info_{local}$ は、セル内で聞こえた情報とセル内のほかのエージェントに尋ねて得られる情報をそれぞれ表す。本モデルでは、従来モデルで設定されていた属性・状態に加えて、音声伝搬や津波の被害、ブロック密度法に関する属性・状態を新たに追加した。

3.2.3 状態遷移

セルの状態遷移ルールとして、以下の順番で処理が行われる。ただし、すべてのセルで同じ処理を行った後に次の処理を実行するものとし、処理(1), (2), (3)は30ステップごとに、(4)は2ステップごとに実行するものとする。従来モデルにおけるセルの状態遷移ルールは処理(3)のみであり、処理(1), (2), (4)は本モデルで新たに追加した。

(4) 避難経路情報を尋ねる音声の伝搬

この処理では、避難経路情報を持たず、周囲に尋ねようとしている避難者エージェントがセル上に存在するときに、避難経路情報を尋ねる音声を周辺のセルに伝搬させる。セル上のエージェントの音声は他のセルに伝搬される確率はエージェントの音声伝達能力と単語理解度試験[13]、群衆密度に応じた騒音値[14]から決定する。情報を尋ねる音声伝搬されたセルは、 S_{asked} を真にする。

(5) 避難経路情報を提供する音声の伝搬

S_{asked} が真であるセルについて、そのセル上の避難経路情報を持つエージェントが避難経路情報を提供する音声を伝搬する。音声伝搬される確率は(1)と同様に求める。音声伝搬されたセルに、エージェントの持つ避難経路情報を一時的に記録する。

(6) セルの状態の更新

セル上のエージェントの内部状態から、セルの状態を更新する。ここで、(2)で一時的に記録された避難経路情報の集合のうちランダムな1つを $Info_{prop}$ に、セル上の避難者エージェントから得ることのできる避難経路情報の集合のうちランダムな1つを $Info_{local}$ として更新する。

(7) ブロック密度法の更新

車両の流れを再現するため、ブロック密度法を用いてセル間の車両の交通量を求める。このときブロック密度法におけるブロックをセルとして計算を行う。また、自動車の最大移動速度は40km/sとする。

3.3 メッシュ

本モデルでは、対処地域を $x \times y$ (x, y は任意の整数)の格子で分割した領域をメッシュとして定義する。入力パラメータからメッシュごとに人口の分布、建物種別、浸水レベルを設定することができ、それぞれエージェントの初期位置の設定、建物の倒壊を要因とするセルの面積の減少、津波による浸水の表現に用いられる。建物種別に応じたセルの面積の変化は従来モデルと同様とする。浸水レベルは本モデルで新たに設定可能になった値であり、0を海面、5を非浸水領域(高台)として0~5の6段階に設定することができる。浸水レベルの低い順からメッシュを浸水したと扱うことで時間による浸水の状況の変化を表現する。

3.4 地域情報の設定

本モデルでは入力地域データファイル群から、地域住民

表 2 シミュレーションに反映可能な地域パラメータ

反映対象	設定可能なパラメータ	本モデルで新たに追加
全般	シミュレーションの開始時刻	
	津波の到達時刻 (津波避難のみ)	○
	次の浸水レベルを浸水させるまでの時間 (津波避難のみ)	○
避難者	総数	
	住民の割合	
	避難所認知度	
	土地勘の有無	
	歩行弱者の割合	
	避難開始時刻	
誘導員	総数	
	避難誘導を開始する時刻	
防災行政無線	総数	
	配置	
セル	避難所の位置	
	避難所の収容人数の上限	○
メッシュ	人口密度	
	建物種別	
	浸水レベル	○

の人口と特性、避難所の位置、津波発生時の被害状況などの地域パラメータを設定し、シミュレーションに反映することができる。入力地域データファイル群からシミュレーション全般、エージェント、セル、メッシュにそれぞれ設定可能な地域パラメータを表2に示す。

4. 評価実験

本モデルの有効性を評価するための実験として、本モデルを用いて阪神淡路大震災と東日本大震災の津波発生時の避難状況を想定したシミュレーションをそれぞれ実行した。

避難完了率などのシミュレーション結果の比較は、同条件での結果の発生分布が正規分布に従うと仮定し、多群検定に分散分析を、多重比較には t 検定および Bonferoni 法を用いた(有意水準 $P < 0.05$)。

各エージェントの音声伝達能力パラメータについて、音声伝達確率が50%となる最大距離をそれぞれ避難者:30m, 誘導員:316m, 行政無線:1kmとなるように設定した。

シミュレーションの実行環境は、一般のPCを想定したもの(CPU: Intel® Xeon® E3-1230v3 (3.30GHz, 4コア), メモリ: 8GB (DDR3-1600))とした。

4.1 兵庫県神戸市における阪神淡路大震災を想定したシミュレーション

4.1.1 実験概要

兵庫県神戸市で阪神淡路大震災が発生したときの避難状況を想定し、次の実験を行った。

- **実験1-1:** 避難者の情報伝達手段を①なし、②同一セル上のみでの情報伝達、③音声を含めた情報伝達としたときの3条件でシミュレーションをそれぞれ30回実行し、避難



●○指定避難所 ■指定されていない避難所

図 3 実験 1 における対象地域 (兵庫県神戸市)

完了率および平均避難時間を比較した。

- ・**実験1-2:** シミュレーションを 1 回実行し、図 3 内の白丸で示した避難所と実際の避難所 2 か所の避難者収容率を比較した。
- ・**実験1-3:** 誘導員、防災行政無線、およびその両方を導入した場合の 3 条件でシミュレーションをそれぞれ 30 回実行し、避難完了率および平均避難時間を比較した。

ただし、震災当時の自治体の状況[5]を考慮して、実験 1-1 および実験 1-2 では防災施策 (誘導員と防災行政無線) を導入しないものとした。また実験 1-2 と実験 1-3 において避難者は音声を含めた情報伝達を行うものとした。

対象地域を図 3 に示す。ただし、図 3 中の黒丸および白丸は指定避難所を表し、黒い四角は指定されていない避難所を表す。また灰色の外周は境界とし、この部分ではシミュレーションは行わないが、避難者は各種計測の対象に含めない。防災施策を導入する場合、誘導員は指定避難所に 2 人ずつ、計 172 人配置し、地震発生から 4 時間後に避難誘導を開始するものとした。また防災行政無線はすべての避難所に 1 機ずつ配置し、地震発生時から 5 分おきに放送するものとした。シミュレーションの対象人数は約 44000 人、対象時間は地震発生直後の 6:00 から 24:00 までの間とした。避難者の避難開始時期は当時の震災のデータ[9]、地域パラメータは国勢調査[15]および神戸市の都市計画図[16]からそれぞれ設定した。

4.1.2 実験結果

実験 1-1, 1-2, 1-3 の結果をそれぞれ表 3, 図 4, 表 4 に示す。表 3 において、避難完了率はいずれの条件間でも有意差がみられ、平均避難時間は「同一セル上のみ」とそれ以外の条件間でのみ有意差がみられた。また、表 4 において、避難完了率は分散分析では有意差がみられたが、どの条件間で結果に差がみられたかを確認できなかった。平均避難時間は何も導入しなかった場合と誘導員を導入した場合以外の条件間で有意差がみられた。

実験 1-1 の結果から、避難者の音声による情報伝達は地震避難において有効であると考えられる。次に実験 1-2 の結果において、実際の結果に近い避難者収容率の推移がみられたことから、本シミュレーションには避難者の避難結

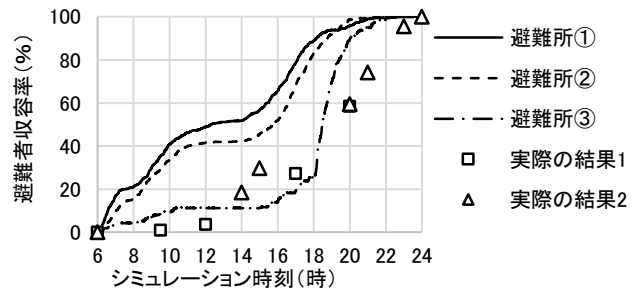


図 4 避難所における避難者収容率の推移

表 3 避難者の情報伝達手法の変化による避難結果の比較 (括弧内は標準偏差)

情報伝達手法	避難完了率 (%)	平均避難時間 (分)
情報伝達なし	92.2 (0.28)	27.8 (0.41)
同一セル上のみ	93.9 (1.68)	28.4 (1.41)
音声伝達	95.5 (0.59)	27.3 (1.18)

表 4 防災施策の導入による避難結果の比較 (括弧内は標準偏差)

導入する施策	避難完了率 (%)	平均避難時間 (分)
なし	95.5 (0.59)	27.3 (1.18)
誘導員	95.7 (0.22)	27.7 (0.90)
防災行政無線	95.8 (0.19)	25.1 (0.38)
上記の両方	95.8 (0.20)	25.1 (0.31)

果について妥当性があるものと考えられる。また実験 1-3 の結果から、神戸市における地震避難では防災行政無線が有効であることが示された。

4.2 宮城県石巻市における東日本大震災時の津波を想定したシミュレーション

4.2.1 実験概要

宮城県石巻市で東日本大震災による津波が発生したときの避難状況を想定し、次の実験を行った。

- ・**実験2-1:** シミュレーションを 30 回実行し、避難開始時間および平均避難時間の割合について実際の避難結果との比較を行った。
- ・**実験2-2:** 避難者の音声伝達の範囲を有効・無効にした状態でシミュレーションをそれぞれ 30 回実行し、避難完了率と平均避難時間を比較した。

ただし、両実験ともに防災施策を導入した状態で行う。

対象地域を図 5 に示す。ただし、図 5 中の黒丸は指定避難所を表し、黒い四角は防災行政無線を表す。また灰色の部分は 4.1.1 節と同様に扱う。誘導員は指定避難所に均等に計 100 人配置し、地震発生 5 分後に車両による避難誘導を開始するものとした。防災行政無線は図 5 に示す位置に計 132 機配置し、地震発生 5 分後から 5 分おきに放送するものとした。シミュレーションの対象人数は対象地域内の浸水地域に在住または従業している約 80000 人、対象時間は地震直後から津波が最大点まで到達するまでの 37.5 分間とした。避難者エージェントの初期避難開始時間は避難者アンケート[7]から設定した。上記以外の地域パラメ



図 5 実験 2 における対象地域 (宮城県石巻市)

ータは国勢調査[15]より設定した。また地震そのものによる建物の倒壊は少ないと仮定し、建物種別の設定は省略した。

4.2.2 実験結果

実験 2-1, 2-2 の結果をそれぞれ図 6, 表 5 に示す。表 5 において避難完了率に有意差がみられたが、平均避難時間については有意差がみられなかった。

実験 2-1 の結果から、避難開始時間について実際の結果に近い値がシミュレーション結果から得られた。よって避難開始時間については、本モデルを使用した津波避難シミュレーションに妥当性があると考えられる。一方避難移動について、シミュレーション結果が実際の結果よりも低い結果となったが、これは本実験で使用した地図データが詳細な道路情報を含んでいなかったためであると考えられる。また実験 2-2 から、津波避難における避難者間での音声伝達行為は避難者の避難開始を促すことに有効であることを示した。

5. おわりに

本論文では避難者や誘導員などの音声伝達行為を考慮した地震・津波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を提案した。阪神淡路大震災、東日本大震災による津波発生時の避難状況をそれぞれ想定したシミュレーションを実行した結果、両方の状況において避難者同士の音声による情報共有行動は有効であることを確認した。また、結果から本モデルによる各災害の避難シミュレーションは避難結果の一部において妥当性があることを示した。

今後は本モデルへの 2 段階避難行動の導入と、使用する地図データをより詳細なものに置き換えることで、本モデルをより有用なものにしたいと考えている。

参考文献

1) 大佛俊泰, 守澤貴幸: 都市内滞留者・移動者の多様な状態と属性を考慮した大地震時における広域避難行動シミュレーションモデル, 日本建築学会計画系論文集, Vol.76, No.660, pp.389-396 (2011).
 2) 村木雄二, 狩野均: 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

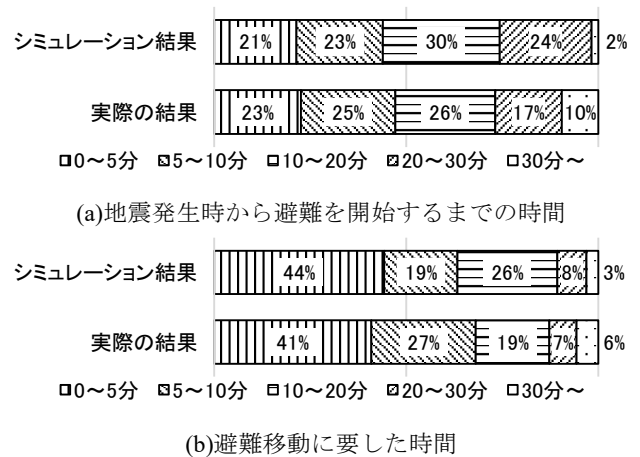


図 6 シミュレーション結果と実際の避難結果の比較

表 5 避難者の音声伝搬を変化させたときの
 避難完了率・避難時間の比較
 (括弧内は標準偏差)

避難者の音声伝搬	避難完了率	平均避難時間
無効	74.7 (0.77)	3.4 (0.03)
有効	75.4 (0.30)	3.4 (0.03)

誌, Vol.22, No.4, pp.416-424 (2007).
 3) 片田敏孝, 桑沢敬行: 津波に関わる危機管理と防災教育のための津波災害総合シナリオ・シミュレータの開発, 土木学会論文集 D, Vol. 62, No. 3, pp.250-261 (2006).
 4) 鈴木介, 今村文彦: 住民意識・行動を考慮した津波避難シミュレーションモデル, 自然災害科学, Vol.23, No.4, pp.521-538 (2005).
 5) 内閣府: 阪神・淡路大震災教訓情報資料集, http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/hanshin_awaji/data/index.html (1999).(2015年11月アクセス)
 6) 財団法人消防科学総合センター: 地域防災データ総覧: 阪神・淡路大震災基礎データ編 (1997).
 7) 内閣府: 東日本大震災時の地震・津波避難に関する調査について, <http://www.bousai.go.jp/jishin/tsunami/hinan/index.html> (2012).(2015年11月アクセス)
 8) ナビゲーションシステム研究会: ナビ研ソフト作成ガイドブック S 規格 (Version 2.2), ナビゲーションシステム研究会(1997).
 9) 柏原士郎, 上野淳, 森田孝夫: 阪神・淡路大震災における避難所の研究, 大阪大学出版会 (1998).
 10) ジョン・J・フルーイン: 歩行者の空間=理論とデザイン=, 鹿島出版会 (1974).
 11) 堀内俊幸, 卜部舜一: 遊園地における集団歩行速度, 日本経営工学会誌, Vol. 37, No.5, pp.283-288(1986).
 12) 桑原雅夫, 吉井稔雄, 堀口良太: ブロック密度法を用いた交通流の表現方法について, 交通工学, Vol.32, No.4, pp.39-44 (1997).
 13) 近藤和弘, 泉良, 藤森雅也, 加賀類, 中川清司: 二者択一型日本語音声了解度試験方法の検討, 日本音響学会誌, Vol.63, No.4, pp.196-205 (2007).
 14) 末岡伸一: 都市部における騒音の目安について, 東京都環境科学研究所年報 2005年版, pp.209-214 (2005).
 15) 総務省統計局: 平成 22 年度国勢調査 (2010).
 16) 神戸市都市計画総局計画部計画課: 神戸市用途地域検索, <http://www.city.kobe.lg.jp/business/plan/search/>.(2014年7月アクセス)