

# 広域緊急避難における効率的な誘導方式の マルチエージェントシミュレーションによる立案支援

## Support for Planning Efficient Resident Navigation in Wide-Area Emergency Evacuation by using Multi-Agent Simulation

奥村 拓海<sup>†</sup>, 飯島 正<sup>‡</sup>

Takumi Okumura<sup>†</sup>, and Tadashi Iijima<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>慶應義塾大学 大学院 理工学研究科 開放環境科学専攻

<sup>‡</sup>慶應義塾大学 理工学部

<sup>†</sup>Graduate School of Science and Technology, Keio Univ.

<sup>‡</sup>Faculty of Science and Technology, Keio Univ.

### 要旨

本研究では、マルチエージェントシミュレーションを用いて推定した被災者の行動をもとに、時々刻々変化する状況に対応した、効率的な被災者誘導支援の実現を目的としている。本論文では、動的に表示内容を変更できる避難誘導指示（デジタルサイネージ）の設備配置の選定戦略と、表示内容の生成に関して、シミュレーションに基づく意思決定支援を行った。

設備配置の選定戦略としては、対象地域の地理情報・統計情報から、住民が多い地域や、多くの道路に接している交差点などを探し、自動でデジタルサイネージの配置場所の有力候補を選定した。その有力候補ごとに避難シミュレーションを行うことで、避難時間および避難者数を比較し、最も効率的なデジタルサイネージの設備配置案を選出した。さらに、そもそもデジタルサイネージを設置していない場合と、設置した場合とを比較し、その効果の評価も試みた。

シミュレーションにより設備配置案を評価し、自治体担当者の立案支援に利用することは可能であるという結論は得られたが、その信頼性をデータに基づいて向上させるためには更なる研究が必要といえる。

## 1. はじめに

古来より近年に至るまで、各地で地震や津波など様々な災害が発生しており、その度に多くの被害を受けている。現在、災害対策は各市町村の地方自治体が主導で行っており、地域防災計画の作成、災害対策本部等の設置、災害に関する情報収集及び伝達、居住者に対する避難勧告・指示など、非常に広範な責務がある [1]。現在、災害時の対策として緊急地震速報や SNS(Social Networking Service) 等によるリアルタイムの情報発信が用いられているが、大規模災害時には通信サービスが制限され、十分に情報提供を行えない可能性がある [2]。地方自治体はこのような状況も考慮して、住民を安全に避難させるための防災計画を立てる必要がある。

本研究では、地方自治体による防災計画立案支援の一環として、災害時に住民へ情報提供するための効率的な方法を、広域緊急避難シミュレーションを用いて評価する。これにより、地方自治体が標識や誘導員の配置等の意思決定や、発災直後からリアルタイムに住民へ提供すべき情報内容の決定に役立つ支援システムを構築することを目的とする。

## 2. 広域災害避難シミュレーション

本節では、検証に使用したシミュレーションシステムについて説明する。

### 2.1. 概要

広域災害避難シミュレーションでは、ライブラリとして Mason を使用した。内部ではマルチエージェントシステムを用いることで住民の避難行動をモデル化をしている。また、シミュレーションを行う場所は神奈川県茅ヶ崎市沿岸部とした。その理由は、

- 海岸沿いの都市の中でも標高が低く（海拔 0~10m ほど）、津波の被害を受けやすい。
- 茅ヶ崎市西部に大きな川が流れており、増水による氾濫の危険がある。
- 茅ヶ崎市が面している相模湾沖には関東大震災の震源とされている相模トラフがあり、再び大地震が起こった際に津波の被害を受ける可能性が高い。

などである。地理データは基盤地図情報ダウンロードサービスから茅ヶ崎市周辺のデータ入手し使用している。避難者については、総務省統計局が発行する国勢調査の人口分布に基づいて配置し、設定した行動モデルに沿った行動をする。

## 2.2. 使用するデータ

### 2.2.1. 基盤地図情報

本研究のシミュレーションでは、基盤地図情報の項目のうち「海岸線」「軌道（道路）中心線」「標高」の3つを使用した。データは全てXMLファイルで記述されており、地物の種類（海岸線や道路など）と座標が記述されている [3]。

### 2.2.2. 統計情報

統計情報として使用する情報は、総務省統計局が提供する平成27年国勢調査（小地域）である。統計情報として国勢調査を選択した理由として以下の理由を挙げる。

- 総務省統計局という政府機関が発行しており、信頼性が高い。
- 無償でデータが提供されているため、誰でも手軽に利用することができる。
- 提供されている情報の種類が豊富である。

### 2.2.3. 避難所情報

災害時にエージェントが向かう場所として避難所を設定する。この避難所情報は公的に配布されていないため、データを収集し手作業で入力する必要がある。データ形式はCSV（Comma Separated Values）であり、これを読み込む事で避難所情報をシステムに追加することが出来る。入力する必要があるデータは、「施設の名前」、「緯度」、「経度」、「収容人数」、「画像のファイルパス」、の5つである。また、本研究で使用した避難所情報は茅ヶ崎市津波マップ [4] を参考に作成した。

## 2.3. シミュレーションモデル

### 2.3.1. 避難エージェントモデル

本節では具体的なエージェントモデル構築について説明する。エージェントの内部処理の大きな流れを図4.2に示す。一般にエージェントは周りの環境から情報を取得しモデルに沿って行動し、今回はシミュレーションは避難であることから、避難者は最も現在地から近いと思う避難所に向かうものとする。各エージェントは、避難開始時間というパラメータを所持しており、時間帯（一般に夜間は昼よりも避難開始に時間がかかる。）や避難勧告などによって変化する。経過時間が避難開始時間を超えた場合に避難者は避難を開始する。その後、どういったルートで避難するのかを決定するフェーズがあり、その決まったルートに沿って行動をする。その振る舞いは毎回の周囲の状況などに影響されて変化する事を考えて、毎回の行動の直前に情報収集とルートの再プランニングを行う。そして目的値（広域避難場所や標高の高いところ）に到着すると避難行動を終了する。

エージェントの避難経路の決定方法は、以下のモデルを参考にしている。

- 目的地を定めず、ランダムに歩き回る行動パターン  
観光客や訪問客のように土地勘がないエージェントに適用する。ランダムに歩き回る。
- 道路混雑回避行動パターン  
混雑している道路を避けて目的値に向かう行動モデル。群衆密度と歩行速度の関係から速度の大小を決定し、ある値より速度が小さくなる場合にルートを再計画する。
- 標高の高い方へ向かう行動パターン  
特に津波からの避難を想定した場合により標高の高いところを目的地とする行動モデル。
- 海岸線から離れる行動パターン  
こちらも津波を想定した場合に、なるべく海岸線から離れようとする行動モデル。海岸線からの距離が最も大きくなる方向へ移動する。
- 追従モデル  
多くの避難者に見られる、周りの人についていく行動モデル。周囲に一定数以上のエージェントが存在し、その中に避難所の場所を知っているエージェントがいる場合に追従するものとする。

これらのモデルを組み合わせて、エージェントの行動を表現している。また、群衆密度と移動速度は以下のように設定している。

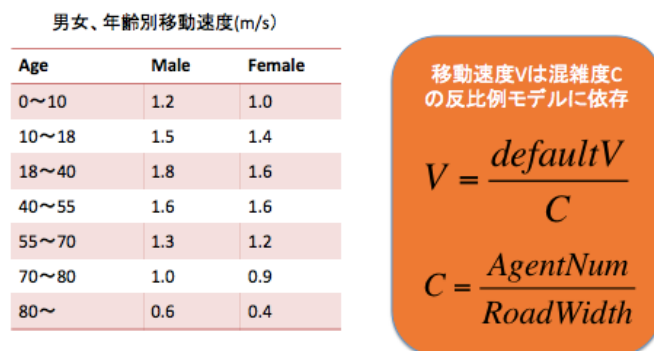


図 1: エージェントの移動速度

### 2.3.2. シナリオモデル

広域災害避難シミュレーションにおいて、どのような状況のもとで行われるのかという想定は非常に重要であり、エージェントの行動に大きく影響する。本節では、災害の想定や場所などの外的要因と、年齢や性別などの内的要因の2つに分けてシナリオモデルを設定する。

- 外的要因に関するモデル

エージェントに影響を与える外的要因として最も影響度が高いのは場所（シミュレーション対象地域）であると考えた。道路の本数や幅、避難所の位置などによってエージェントの行動が大きく変わるため、地理情報の設定は必要不可欠である。この他では、シミュレーションを行う時間帯も重要な外的要因としており、時間帯が夜間の場合は昼と比べて避難速度と避難開始時間が遅くなることが考えられる。これらを勘案し、シミュレーションを行う際にはシミュレーションを行う地域と時間帯を設定する。

- 内的要因に関するモデル

避難者エージェントの持つ主な属性としては、年齢、性別等が挙げられる。現実でも高齢者や乳児を連れている場合では移動速度が遅くなることから、エージェントの属性が避難行動に大きく影響していると考えた。シミュレーションをより現実に近づけるためにはエージェントの属性を統計情報に準じて設定することが望ましく、初期設定として年齢、性別、人口などを統計情報から取得するようにしている。

## 3. 提案

### 3.1. デジタルサイネージによる情報提供

避難誘導において、エージェントへの情報提供は効率的な避難に大きな影響を与える [5]。デジタルサイネージを避難者が多く通ると思われる場所に設置し、避難所の場所、及び避難経路を表示することで、より効率的な避難誘導を行えるのではないかと考えた。その際に、最も効果が高いサイネージの配置方法を広域災害避難シミュレーションを用いて比較検証する。

### 3.2. デジタルサイネージの配置場所の立案

デジタルサイネージはその性質上、あらかじめ必要な地点に設置する必要がある。本研究では、より効率的に住民を避難させられるような設置場所および設置数を推測するためのシステムを構築する。具体的には、任意の地点及び優先する条件（人口が多い地点など）に則った地点にサイネージを配置し、それぞれの条件で住民の行動をシミュレートすることで評価を行う。評価にシミュレーションを用いたのは、

- 比較することが難しい項目においても、避難完了者数など明確な評価値を用いて比較することが出来る。
- シミュレーションを用いることで、道路の倒壊や避難所の混雑状況など、時間ごとの変化もモデルに組み込んで評価することができる。
- 他の手法と比べ導入できるパラメータが多く、より現実に則した検証を行う事が出来る。

が主な理由である。このような配置場所の立案によって、地方自治体がデジタルサイネージをはじめとする情報提供媒体を設置する際の指標となると考えた。

## 4. シミュレーションによる評価実験

### 4.1. サイネージの効率的な配置戦略・配置数の検証

#### 4.1.1. 実験条件・結果

この評価実験では、サイネージの配置方法と配置数を変えた際に、避難完了率がどのように変化するかを実験した。避難完了率は、茅ヶ崎市海岸で想定されている津波到来時間である30分後に避難が完了している住民の割合を示している[4]。サイネージの配置方法は「ランダムに配置」「人口が多い地点に配置」「大通りかつ交差点である地点に配置」の3通りとし、設置数は0~60(10刻み)で変化させ、それぞれの避難完了率を比較した。実験結果を図2に示す。

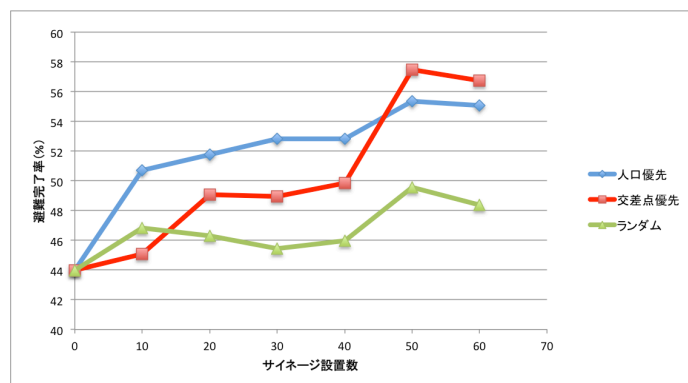


図2: サイネージの配置と避難完了率の関係

#### 4.1.2. 考察

図2では、サイネージの設置数を増やすことで避難完了率が上がる傾向が見られた。最大で15%ほど上がっており、サイネージによる情報提供が住民の避難誘導に対して効果があるといえる。しかし、すべての配置方法において設置数が60の時に、避難完了率が50の時より下がった。このような結果となった原因の一つとして、避難者の集中が考えられる。配置数を増やすことで多くの住民が情報を受け取り最も近い避難所に向かうと、人口の多い地域では一つの避難所に人が集中してしまうのではないかと考えた。今回の結果から、サイネージのような情報媒体は多いほど結果が良くなるとは限らず、適した設置数が存在すると言える。次に配置方法で比較すると、人口を優先する場合と交差点を優先する場合共に、ランダムに配置する場合よりも避難完了率が高くなった。このことより、人口優先および交差点を優先する方法はどちらも無作為に選択する場合より効率的であるといえる。また、この2つの方法で比較をすると、最大値は交差点優先の方が避難完了率が高いが、平均では人口優先の方が高くなっていることが分かる。避難計画の性質上、最大値よりも平均値を優先すべきと考え、茅ヶ崎市沿岸部におけるサイネージの設置では、人口が多い点を優先した方が良いと考えられる。

### 4.2. 道路状況の変化とサイネージの効果の検証

#### 4.2.1. 実験条件・結果

この評価実験では、道路が通行止めになるなど状況の変化が大きい場合で、サイネージによる情報提供の効果を検証する。配置方法は「設置なし」「人口が多い地点に配置」「大通りかつ交差点である地点

に配置」の3通りとし、道路損壊率を10%~30%と変化させたときの避難完了率を調べる。施設数は、前実験で最も効果の高かった50個に固定する。実験結果を図3に示す。

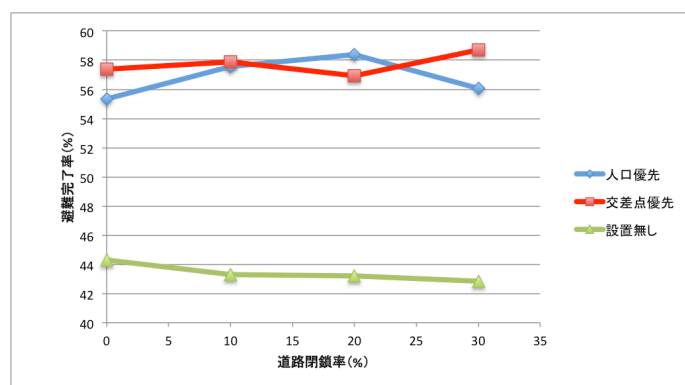


図3: 道路損壊率と避難完了率の関係

#### 4.2.2. 考察

図3では、道路閉塞率を10%, 20%, 30%と大きく変化させた結果を示している。サイネージを設置することにより、避難完了率は向上しているが、道路閉塞率の変化の影響はあまり小さくなく、高い水準を維持できていた。但し、その効果は、道路閉塞率が10%を越えると、必ずしも安定して得られるものではなかった。

とはいえサイネージを設置しない場合は道路閉塞率が上がるにつれて避難完了率が少し下がる傾向にあったことから、サイネージによる情報提供によって道路が閉鎖されることによる避難時間のロスを軽減することができると考えられる。

#### 4.3. 効率的な配置場所の出力

##### 4.3.1. 出力結果

サイネージの配置方法と配置数の実験において、最も避難完了率の高かった交差点優先・配置数50の場合のサイネージ配置を図4に示す。

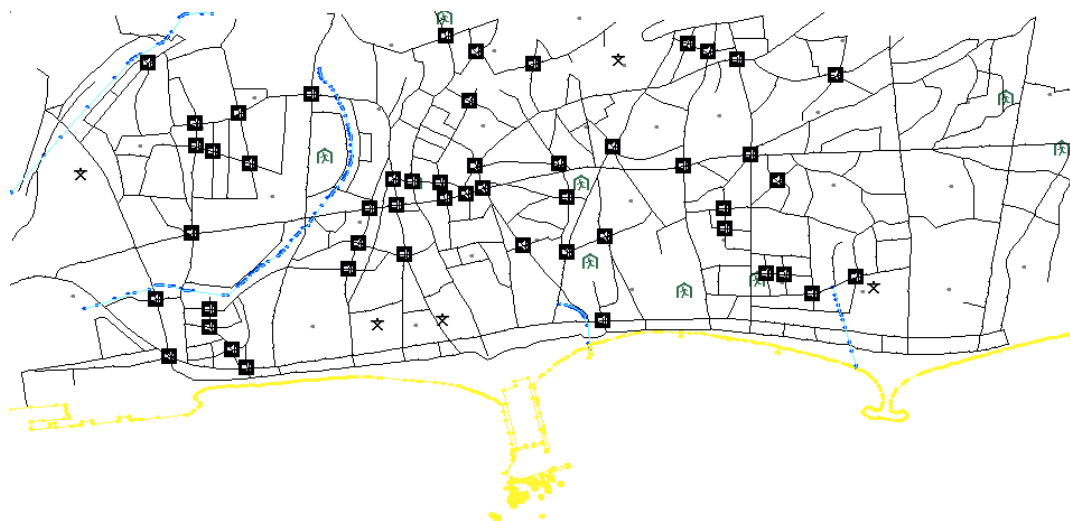


図4: 交差点優先・配置数50のサイネージ配置

#### 4.3.2. 考察

図4から、シミュレーション上での主観的評価ではあるが、比較的効率的と考えられる配置場所の一つを地図上に表示できており、シミュレーションによる配置案評価の観点から、本研究のテーマである防災計画の立案支援にむけて、一歩踏み出すことができたと判断している。

しかし、今回提示した交差点優先配置戦略では、一見すると広く大域的に分散した配置となっているようにみえても、詳細に検討すると、東部では幅員の大きな道路が少なく、結果としてサイネージの設置がほとんど見られず、地域格差が発生している。

これを改善する配置案は、交差点優先配置戦略と人口優先配置戦略を組み合わせた混合戦略のバリエーションの中にあると考えている。その組み合わせは膨大なものとなるが、数案に絞り込むことが望ましい。ここでは、地方自治体の防災担当者の立案支援を目的としており、必ずしも一つの最適解の自動提示を目的としているわけではないが、提示する配置案は5±2案くらいが望ましいと考えている。

混合戦略には、(1) 対象地域全体に対し各戦略の優先度を変えて混合する方式（大域混合戦略）、(2) より細粒度な地域に区画分割し、区画ごとの地域特性に応じて戦略を切り替える方式（局所混合戦略）、などが考えられる。(2)は、全体的な大域避難完了率だけでなく、区画毎の局所避難完了率の分散を減らしつつ平均完了率の向上を目的関数とした最適解探索ともいえる。また遺伝的アルゴリズム (GA; Genetic Algorithm) 等の最適化手法や、自治体担当者のスキルを深層学習 (Deep Learning) 等で学習する機械学習手法との比較も検討しているが、現時点ではシミュレーションに要する時間が長く、比較検討には至っていない。すなわち、シミュレーションの更なる高速化は、今後の展開に不可欠な要素といえる。

また、本稿の範囲では、動的情報提供を行う設備配置まではアプローチできているが、発災後に動的に配信していく情報内容そのものには、十分にアプローチできていない。今回、実施したシミュレーション実験では、災害に起因する道路閉塞状況の情報の時間的変化しか対象としていない<sup>1</sup>。今回のシミュレーション実験では、道路閉塞率がある程度を越えると、サイネージによる情報提供があっても避難率が低下するケースも見られた。道路閉塞状況の情報を提供し代替目的地を提示

## 5. まとめ

シミュレーション上では、デジタルサイネージによるリアルタイムの情報提供によって、道路状況の変化に住民の避難率を上げることができた。また、人口の多い地点及び大通りの交差点にサイネージを配置することで、より効果が高まることが分かった。システム面については、効率的な配置場所を出力することによって地方自治体の意思決定に役立てられるのではないかと考えられる。

また今後の課題としては、現状ではシミュレーションにかなり時間がかかってしまうため、シミュレーションの高速化と、シミュレーションと現実との整合性を評価し信頼性を向上させることなどが挙げられる。

## 参考文献

- [1] 市町村における防災対策について-内閣府（防災担当）  
[http://www.bousai.go.jp/kaigirep/kentokai/bousai\\_specialist2/01/pdf/shiryos5.pdf](http://www.bousai.go.jp/kaigirep/kentokai/bousai_specialist2/01/pdf/shiryos5.pdf) 最終閲覧日 2017/10/24
- [2] 総務省, ”大規模災害時の非常用通信手段の在り方に関する研究”  
[http://www.soumu.go.jp/menu\\_news/s-news/01tsushin03\\_02000175.html](http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01tsushin03_02000175.html) 最終閲覧日 2017/10/24
- [3] 国土交通省国土地理院, ”基盤地図情報サイト-国土地理院”  
<http://www.gsi.go.jp/kiban> 最終閲覧日 2017/10/24
- [4] 茅ヶ崎市津波ハンドブック:”津波から身をまもるために”  
<http://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php> 最終閲覧日 2017/10/24
- [5] 村木雄二, 狩野均: ”マルチエージェントモデルを用いた広域災害避難シミュレーションにおける情報伝達の有効性” 2004年, 筑波大学

<sup>1</sup>道路閉塞が発災から時間経過後に発生するケースもあれば、既に道路閉塞が発生していてもその情報が防災本部へ届くまでも時間遅延があるケースもある。