

## 青島地区における災害時の避難行動に関するシミュレーション

白崎 翔太郎<sup>a)</sup>・藤井 貴大<sup>b)</sup>・山場 久昭<sup>c)</sup>・油田 健太郎<sup>d)</sup>・岡崎 直宣<sup>e)</sup>Simulation on Evacuation Behavior  
During Disaster in Aoshima District

Shotaro USUZAKI, Takahiro FUJII, Hisaaki YAMABA, Kentaro ABURADA, Naonobu OKAZAKI

## Abstract

The area that forms the groove-like topography of the sea floor which the Philippine Sea plate and the Eurasian plate meet from Suruga Bay to the offing of the Hyuga Nada is called the Nankai Trough. The earthquake with the epicentral boundary along this area is called the Nankai Trough Earthquake. The Nankai Trough Earthquake, which is predicted to occur within the next 30 years, is assumed to be magnitude from 8 to 9. In particular, Miyazaki prefecture is predicted that it has great impacts of this earthquake because of high maximum forecasts for both seismic intensity and tsunami. Therefore, it is important to investigate evacuation behavior in Miyazaki. Since a lot of residents are sacrificed during the evacuation by the tsunami, we consider that evacuation can be carried out more safely by perceiving information about evacuation. Therefore, in order to investigate the importance of obtaining information about evacuation spot, we performed simulation on evacuation behaviors during disaster in Miyazaki and compared the case which the agents share the information by communication and the case which they don't. As the result of this simulation, sharing evacuation information increased the number of evacuable people and the taken time for evacuation also decreased in the case of the number of evacuees was large.

**Keywords:** disaster, earthquake, simulation, multi agent, evacuation

## 1. はじめに

日本は世界有数の自然災害大国である。台風、地震、津波、火山噴火などそのリスクは数えきれない程で、毎年多くの被害が発生している。中でも、日本は北米プレート、ユーラシアプレート、太平洋プレート、フィリピン海プレートの4つのプレートの上に位置するため非常に地震が発生しやすく、世界で発生する地震の10%、マグニチュード6以上の地震に限定すると20%以上が日本で起きているとされている<sup>1)</sup>。

駿河湾から遠州灘、熊野灘、紀伊半島の南側の海域及び土佐湾を経て日向灘沖までのフィリピン海プレート及びユーラシアプレートが接する海底の溝状の地形を形成する区域を南海トラフといい、この南海トラフ沿いのプレート境界を震源とする大規模な地震が南海トラフ地震である。南海トラフ地震は、おおむね100~150年間隔で繰り返し発生しているが、その発生間隔にはばらつきがあり、震源域の広がり方には多様性があることが知られている<sup>2)</sup>。また、南海トラフ地震が30年以内に発生する確率は70~80%と予測されており、マグニチュード8~9級と想定されている。九州の中でも、宮崎県は震度、津波ともに予測されている最大値が高く、地震

による多大な影響が想定されている。

これまで日本で起きた地震では、津波により避難途中の住民の多くが犠牲となっている。津波警報が発令された場合、どのような方法で、どこに避難をすべきか、などの情報を住民全てが把握していれば、より安全に避難行動を行うことができると思われる。

災害時における避難行動を行う上での情報を把握しておくことの重要性を調べるため、本研究では災害時の避難行動を想定したシミュレーションを行う。避難者に見立てたエージェントモデルが通信によって情報の共有を行う場合と行わない場合を比較し、情報を共有することによる避難完了者の増加率や避難完了までの時間の変化を調べる。

## 2. 関連研究

関連研究として、災害時に避難者の意思決定を援助する地図の作成を行うシステムについての研究<sup>3)</sup>と、エージェントモデルによる災害時の避難行動シミュレーションについての研究<sup>4)</sup>を紹介する。

## 2.1 DTNとアドホック通信による災害地域の歩行者用地図の生成

災害時の応急対策に不可欠な技術の1つに災害地域のマッピングがある。これは災害時に災害発生地域を地図上にマッピングする技術で、その地図データはクラウドベースで共有される。この地図は避難者の意思決定を援助し、避難者を避

<sup>a)</sup>工学専攻機械・情報系コース大学院生

<sup>b)</sup>情報システム工学科学部生

<sup>c)</sup>情報システム工学助教

<sup>d)</sup>情報システム工学助教

<sup>e)</sup>情報システム工学教授

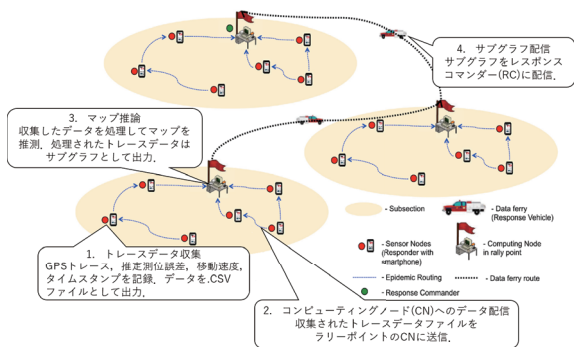


図 1. 災害時のデジタル歩行者用地図生成システムの流れ<sup>3)</sup>  
p.133 による図表を一部加筆

難所へ導くルートを示す。しかし、災害によって通信インフラが損なわれる可能性があり、クラウドベースのマッピングサービスにアクセスできなくなる可能性がある。その場合、避難者は、共有することが難しく、最適な避難ルート参照できない紙の地図に頼ることになる。この研究<sup>3)</sup>では、災害時のデジタル歩行者用地図生成システム(図1)を紹介する。システムを実現するために、以下に示す課題に取り組んだ。

1. クラウドベースのコンピューティングリソースを使用せずに必要なデータを収集してマップを生成する方法。
2. エンドツーエンドの連続したネットワークがなくてもシステム内でメッセージを共有する方法。
3. マップ推論タスク(収集したデータを処理し、マップの推論、出力を行う)の負荷のバランスをとる方法。

1. については、災害時の経路情報を統括・管理するレスポндаにGPSのトレース情報を集め、その後収集したデータを各地のコンピューティングノードに送信することで解決した。2. のために、システムはEpidemic Routing(感染型経路制御モデルの一種であり、送信ノード、感染ノードは出会ったすべての非感染ノード、受信ノードにパケットを複製する。)を使用して短距離間で通信するDTN(Delay Tolerant Networking)を確立し、データフェリーとしてレスポンスビークル(無線通信機器を備えた車両)を使用して長距離通信を行った。3. では、フェリー経路時間表と計算ノードの負荷に関する統計情報を用いてマップ推論タスクの負荷軽減方法を決定する、負荷分散ヒューリスティックを提案した。実験とシミュレーションによってシステムを評価し、大量のデータを処理しなければならない極端な場合において、地図の生成と配信に要する時間を約2時間短縮することができた。

この研究では、地図の生成と配信に要する時間を約2時間短縮することができたが、それでも2時間近く時間がかかっているため、リアルタイムでの使用にはあまり適さないと考えられる。

## 2.2 エージェントモデルによる災害時避難行動シミュレーション

津波警報が発令された場合、避難する手段や場所を住民全てが知っていれば、より安全に避難できる。避難指示を出す行政は防災計画を立案しているが、どの経路を通して避難をするのか、避難経路毎の道路容量は混雑することなく避難する

ことが可能なか、などの点が反映されているとは言い難い。津波避難計画立案に際しては、津波警報発令以降の避難対象となる住民の行動予測が必要であるが、津波警報発令後、経過時間毎に住民毎の行動をシミュレートすることは不可能である。そこで、この研究<sup>4)</sup>では、津波避難という条件の下での避難行動を、避難者の情報受発信に着目し、マルチエージェントモデルによってモデル化を行った。このモデルを適用し、避難者の行動をシミュレートするとともに、避難建物への避難制限時間を設けることで避難完了者数の変化をシミュレーションによって予測した。その結果、避難制限を設けることによって、避難能力の高い避難者を海岸線より遠くへ避難させる一方、避難能力が低い避難者を海岸線近くに設置されている避難建物への避難を容易にすることが可能となり、避難完了者を増加させるためには、避難建物への避難制限を設けることが有効であると明らかにした。

この研究では、シミュレーションの結果、避難建物への避難制限を設けることが有効であることが分かったが、情報受発信システムなどを用いた広範囲の情報共有は行われていない。

## 3. シミュレータ

本研究では、マルチエージェントモデルを用いたシミュレータを比較し、本研究の目的である、実地図データを用いた災害時の避難行動シミュレーションに最も適したものを実験に利用することにした。マルチエージェントシステム(Multi-Agent System, MAS)とは、複数のエージェント(人や生物など)に同時進行的に各々のルールをもとに、互いに相互作用を受けながら実行させるシミュレーションを行うシステムであり、本論文ではartisoc<sup>5)</sup>、LEGION<sup>6)7)</sup>、Scenargie<sup>8)</sup>の3つのMASを備えたシミュレータを比較する。

### 3.1 artisoc

artisocは、MASコミュニティで開発されたマルチエージェントシミュレータである。人間同士の相互作用を再現することができ、ダイナミックに変化する社会現象を生きたまま分析することが可能である。artisocの特徴として以下のものが挙げられる。

- エージェントの空間移動、エージェント集合を操作する組み込み関数が存在する。
- ネットワーク図や関係図を容易に出力することが可能である。
- 複数モデルによる同時実行、分散実行が可能である。
- マルチエージェントシミュレーションのためのモデルを容易に作成することが可能である。
- シミュレーションの実行の過程をリアルタイムで観察することが可能である。

### 3.2 LEGION

LEGIONは、LEGION社で開発されたマルチエージェント型の歩行者シミュレータである。駅やスタジアムなど多くの歩行者が集散する施設において、歩行者の流動をシミュレートすることで、施設の安全性や快適性、経済性を具体的な数

値で評価することが可能である。LEGION の特徴として以下のものが挙げられる。

- 緊急避難だけでなく、平常ピークの状態をシミュレーションすることが可能である。
- シミュレーションの様子を 3D アニメーションとして観察することが可能である。
- 3DCAD データの取り込みが可能である。

### 3.3 Scenargie

Scenargie は、Space-Time Engineering 社で開発された離散事象シミュレータである。現実世界での無線通信や人の行動の流れをソフトウェア上でシミュレーションし、通信品質や人の振る舞いをコンピュータ上で評価することが可能である。Scenargie の特徴として以下のものが挙げられる。

- GIS(地理情報システム) との連携が可能である。
- ノードの移動など GIS をシミュレータ内でも利用可能である。
- 並列計算エンジンによって 1 つのシナリオを並列化して計算することが可能である。
- 外部のシミュレータとの連携 API を持っており、交通流シミュレータと連携してシミュレーションを行うことが可能である。
- コーディングが標準 C++ に従って統一されており、比較的容易に新しいプロトコルの実装を行うことが可能である。

### 3.4 シミュレータ評価

以上の 3 つのシミュレータを比較した結果、本研究では Scenargie を用いてシミュレーションを行うことにした。理由としては、シミュレーションを行う上で実地図を扱いたいため、GIS 標準の shape ファイルの読み込みが可能である点や、GUI 環境上でほとんどの操作を行うことができるため比較的容易に扱える点、コーディングが読みやすく機能の実装がしやすい点が挙げられる。

## 4. Scenargie

Scenargie は、Windows と Linux で動作する離散事象シミュレータであり、現実世界での無線通信や人の行動の流れをソフトウェア上でシミュレーションし、通信品質や人の振る舞いをコンピュータ上で評価することを可能とする、複雑なシステム解析・評価のためのシナリオ生成・管理フレームワークである<sup>8)</sup>。Space-Time Engineering(STE) の製品であり、様々なシミュレーションツールを提供している。データ通信におけるアプリケーションから電波伝搬までを模擬しており、パケットレベルでのシミュレーションや、GIS データとの連携、電波伝搬解析ツールとして使用することが可能であり、統計情報解析機能等を実装している。また、シミュレーション速度が速く、大規模なネットワークシミュレーション評価が可能である。

画面上に表示された地図や建物を見ながら通信ノードの配置や通信パラメータの設定、移動パターンの設定など、シミュ

レーションを行う上で必要な情報を容易に設定できる GUI 環境を提供する Scenargie Visual Lab と、通信システムやノードの移動のシミュレーションを行うシミュレーションエンジンである Scenargie Base Simulator から構成されている。

## 5. シミュレーション

避難者が、避難所が満員であるという情報の共有を通信機を用いて行う場合と行わない場合を比較し、情報を共有することによる避難完了者の増加率や避難完了までの時間の変化を調べる為、災害時の避難行動を想定したシミュレーションを行う。避難完了者の増加率や避難完了までの時間の変化から、避難行動を行う上での情報を把握しておくことの重要性を調べる。情報の共有は、通信規格 IEEE802.11ac の通信機を用いて行われる。満員により目的地に到達できなかったエージェントの通信機から、周囲の通信機に満員である避難所の情報がアドホック通信によって送信され、情報を受け取ったエージェントはその避難所を目的地から除外する。除外された目的地に向かっていたエージェントは、他の目的地へ移動先を変更する。

今回のシミュレーションでは、青島地区を対象にして、避難行動のシナリオを作成する。青島地区は、周囲を海岸線に囲まれ、夏には海水浴客でにぎわっている。また、河川も多く、津波や、それに伴った増水の影響を受けやすいと考えられる。そのため、避難経路を見失う可能性も高いと考えられるため、適切な避難所への誘導標識の設定や、避難経路の設定、誘導方法が必要な地域である。

### 5.1 実装

今回シミュレーションを行うにあたって、Scenargie はデフォルトでは通信とユーザ行動の連携を行うことができないため、通信結果に応じてエージェントの行動を指定する実装を行った。

実装内容としては、目的地に到達不可であった場合に、到達不可である場所の位置情報を他のエージェントに送信する UnreachableDestinationNotification 関数と、到達不可である場所の位置情報を受け取り、到達不可の場所として受け取った位置情報を保存する ReceivePacket 関数を実装した。

UnreachableDestinationNotification は、目的地に到達不可の通知を行う関数である。目的地に到達できなかった際に呼び出される関数であり、到達不可であった目的地の情報を送信するよう実態定義を行った。

ReceivePacket は、送信されたパケットを受信する関数である。UnreachableDestinationNotification 関数によって送信された到達不可な場所の情報を受信し保存するよう実態定義を行った。

### 5.2 実地図に基づくシミュレーション

#### 5.2.1 シナリオ

今回のシミュレーションでは、平常時を想定したシナリオと、観光シーズンを想定したシナリオの 2 パターンのシナリオを用意した。対象人数を、<sup>9)</sup> を基に、宮崎市全体の宿泊者数の内、青島地区に宿泊した人数の割合である 15% を月別観光入込客数に掛けたものを、青島地区における月別観光入込



図 2. 実地図に基づくシミュレーション

客数と仮定し、それぞれ、客数最少である6月のものと、客数最多である8月のものを参考に設定した。また、10)と11)を基に、青島地区の道路情報に建物の情報や指定避難所の情報を加え、複数の避難所を目的地として設定した。避難者を示すエージェントは、複数の目的地の内、自らの初期位置に最も近い目的地を目指して移動を始める。シミュレーションはそれぞれのシナリオで通信機を持っている場合と、通信機を持たない場合で5回ずつ行い、時間毎の避難完了人数の平均値を求めた。通信機を持っている場合は、通信機を通じてエージェント同士で情報の共有が行われる。

シナリオ設定を表1に、シミュレーションの様子を図2に示す。

表 1. シナリオ設定

	平常時	観光シーズン
対象人数 [人]	350	1,000
初期配置	住宅街中心	観光地中心
目的地	複数設置された避難所	
シミュレーション時間 [s]	600	

## 5.2.2 結果

シミュレーションの結果を、図3、図4に示す。縦軸と横軸はそれぞれ避難が完了した人数とシミュレーションの経過時間、青線と赤線はそれぞれ通信機を持たせた場合と持たせない場合を示す。平常時を想定したシナリオでは、ほとんど違いがみられなかったが、観光シーズンを想定したシナリオでは、通信機を持たせた場合、シミュレーション時間が460sの時点で、通信機を持たない場合と比較し、140人多く避難を完了することができた。また、シミュレーションのケースによっては、通信機を持たせた場合に、通信機を持たない場合と比較し、70~100s早く全員が避難を完了することができた。

## 6. まとめ

本論文では、マルチエージェントモデルを用いて、青島地区における災害時の避難行動に関するシミュレーションを行った。災害時の避難行動をシミュレートするにあたって、MASを備えた3種類のシミュレータを比較し、本研究ではScenargieを用いることとした。また、通信結果に応じてエージェントの行動を指定する実装を行い、目的地が到達不可である情報を共有できるようにした。シミュレーションの結果、平常時を

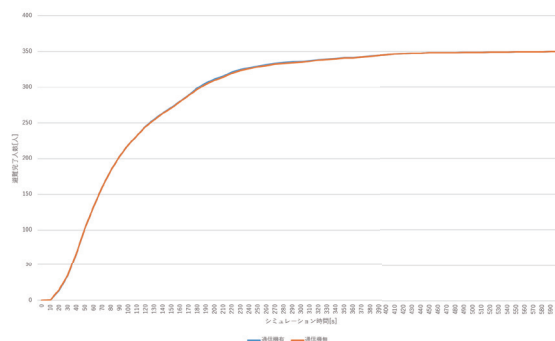


図 3. 平常時の避難完了人数の変化 (横軸はシミュレーション時間、縦軸は避難完了人数、青線は通信機を持たせた場合、赤線は通信機を持たせない場合)

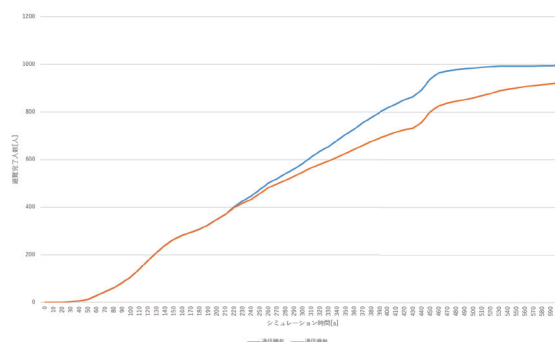


図 4. 観光シーズンの避難完了人数の変化 (横軸はシミュレーション時間、縦軸は避難完了人数、青線は通信機を持たせた場合、赤線は通信機を持たせない場合)

想定したシナリオでは通信機の有無による大きな変化はみられなかったが、観光シーズンを想定したシナリオの場合、通信機がある場合に避難者数が1割以上増加し、避難完了までの時間も最大で100s短縮された。

今回のシミュレーションでは、対象者が少ない平常時を想定したシナリオにおいて効果が得られなかったが、これは、青島地区における避難所の収容人数が十分設けられているからではないかと考えられる。しかし、観光シーズンを想定したシナリオでは、1割ではあるが避難完了人数を増加させることができ、避難時間も短縮できたため、避難人数が多ければ多いほど、災害時における避難状況や、避難所の空き情報を共有する機能があれば、より大きな効果を得られると考えられ、情報を把握することの重要性が高いと言える。

今後の課題として、ホップバイホップ方式のような方法でより広い範囲で情報の共有を可能にすることや、感染型経路制御のように、避難者同士がすれ違った際に情報を共有する状況をシミュレートすることが挙げられる。

## 参考文献

- 1) 一般財団法人国土技術研究センター トップ/国土を知る/意外と知らない日本の国土/地震の多い国、日本 (<http://www.jice.or.jp/knowledge/japan/commentary12>) (accessed 2018-02-01).
- 2) 気象庁 | 南海トラフ地震について | 南海トラフ地震とは (<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/nteq/nteq.html>) (accessed 2018-01-19).
- 3) E. M. Trono, M. Fujimoto, H. Suwa, Y. Arakawa, and K. Yasumoto: Generating Pedestrian Maps of Disaster

- Areas Through Ad-hoc Deployment of Computing Resources Across a DTN, *Computer Communications*, Vol. 100, pp.129–142, 2017.
- 4) 石橋健一、藤岡政樹: エージェントモデルによる災害時避難行動シミュレーションの試み—湘南海岸における事例—, *オペレーションズ・リサーチ*, Vol.47, No.7, pp.447–452, 2002.
  - 5) MAS コミュニティ (<http://mas.kke.co.jp/>) (accessed 2018-01-22).
  - 6) ユーデック株式会社 (<http://www.udec.co.jp/>) (accessed 2018-01-22).
  - 7) 馬場園克也: マルチエージェント型歩行者シミュレータ Legion の紹介と最近の適用事例案, *情報処理学会研究報告高度交通システム (ITS)*, Vol. 2006, No. 67 (2006-ITS-025), pp.55–62, 2006.
  - 8) Space-Time Engineering (<https://www.spacetime-eng.com/jp/>) (accessed 2018-01-23).
  - 9) 宮崎市/観光・文化/みやレポ/宮崎市の観光統計 (<http://www.city.miyazaki.miyazaki.jp/city/statistics/results/12183.html>) (accessed 2018-01-26).
  - 10) ひなた GIS (<https://hgis.pref.miyazaki.lg.jp/hinata/>) (accessed 2018-01-21).
  - 11) 宮崎市津波ハザードマップ ([http://www.city.miyazaki.miyazaki.jp/life/fire\\_department/hazard\\_map/803.html](http://www.city.miyazaki.miyazaki.jp/life/fire_department/hazard_map/803.html)) (accessed 2018-01-21).