

茅ヶ崎市沿岸部を対象とした 津波避難行動シミュレーションシステムの開発

桑名祐弥¹ 瀬戸直也¹ 増田光咲¹ 海津ゆりえ¹ 川合康央¹

概要：本研究では、ゲームエンジンと国土地理院のオープンデータを用いて、津波避難行動シミュレーションシステムを構築し、神奈川県茅ヶ崎市を対象地区としたシミュレーションを行った。避難行動を行うエージェントを自動生成し、避難先を自律的に検索し指定された速度で避難行動することによって、避難場所の再設置など現在の課題を明らかにする。このエージェントは、歩行速度や被災条件の異なる3種類と、避難行動の異なる2種類のものを用意し、その数や比率を自由に可変できるものとした。

1. はじめに

津波などの災害時に避難個所を示すものとして、ハザードマップが挙げられる。地方自治体がこのハザードマップの作成などの津波被害に対する防災計画の検討を行う際、避難場所の選定や避難経路の検討などにおいて、住民との協働による合意形成が必要となる。本研究は、津波に対する防災計画策定時に、地方自治体と地域住民が協働して計画を策定する際に用いられることを想定した、津波避難行動シミュレーションシステムの開発を行うものである。本システムは、地理情報データとしてオープンデータを、開発環境としてゲームエンジンを用いることとし、また、特にエージェントによる避難行動に着目することにより、現状の防災計画における課題を発見するためのシミュレーションシステムを作成することとした。地方自治体によるハザードマップ作成の基準となる国や県の津波予測シミュレーションは、大規模なシミュレーションによって正確に検討されたものである。しかし、都道府県ごとなどのマクロな視点で検討されているため、自治体が避難計画を策定する際に利用するものとしては、避難場所の設定や避難経路の選定の細部の検討が不十分なものとなっている。だが、地方自治体レベルでのハザードマップ作製や防災計画策定が求められているにも関わらず、これらの津波予測シミュレーションを自治体レベルで独自に開発し運用することは費用などの面から非常に困難である。これまでの津波シミュレーションでは、津波の予測に対して格子法[1,2]や粒子法[3,4]などの流体シミュレーションによる津波の予測が多く行われてきた。これらの手法は、地形や建物などを考慮した津波による影響を詳細に検討することが可能であるが、一方で大規模な処理、計算を必要とするため、高速な演算が可能な計算機が必要であり、またその範囲も小さいものとなるため、都市レベルでの防災計画検討のために条件を何度も変更してリ

アルタイムにレンダリングを行うことは難しい。

本システムは、ゲームエンジンと国土地理院が公開しているオープンデータの標高データ、建物データ、道路データを組み合わせ、これにごく僅かな傾斜を持った広大な面モデルを差し込むことによって、津波を再現するものである。傾斜平面を地形モデルに挿入することで、簡易的に津波を表現し、これに種々の条件を変更したシミュレーションをリアルタイムで行うことが可能となる。

この津波を再現したモデルに、ゲームエンジンを用いて自律的に避難するエージェントを数万人規模で用意し、津波避難経路についての検討を行う。エージェントは、津波発生後にエージェント自身の座標から最も近い高台または津波避難ビルを検索し、そこに向かって定められた速度で移動するものである。マルチエージェントによる津波避難に関する研究は、避難行動の開始、避難経路の選択、災害による道路状況などのシミュレーションモデルに関する研究が行われている[5,6]。これらは、地理情報システム（GIS）を用いた大規模で正確なものであるが、専用のシステムを必要とし、地方自治体が独自に運用することは難しい。また出力されるシミュレーション結果についても、事前に計算が必要なものであり、種々の条件変更をリアルタイムで検証することは困難である。

本研究は、津波ハザードマップなどの防災計画策定主体である地方自治体が自律的に運用可能な、津波と避難行動をリアルタイムで視覚化した津波避難行動シミュレーションシステムを開発し、シミュレーションによる防災計画の評価を行うものである。国や公的機関のオープンデータを活用し、ゲームエンジンやフリー・オープンソースソフトウェアを活用することによって、簡易な地域ごとの津波避難行動シミュレーションシステムが低コストで導入可能となる。また、本システムを用いることによって、これまで詳細な検討が十分行うことが困難であった街路レベルでの

災害箇所の予測や避難場所選定の検証が可能となると考えられる。

2. システムの開発

本研究では、対象地区として神奈川県茅ヶ崎市沿岸部を選定した(図1)。茅ヶ崎市では、2012年に神奈川県によって示された震源の異なる12地震の津波浸水予測図のうち、茅ヶ崎市に最も大きな被害をもたらすと考えられる、慶長型地震、元禄型関東地震と神縄・国府津一松田断層帯地震の連動地震、南関東地震の3つの地震における浸水予測図を基に、津波ハザードマップの改訂が行われた。地方自治体による津波ハザードマップは、国や県からのデータを基に作成されているため、東日本大震災など、大規模災害に基づく災害リスクの大規模な見直しが行われた際、その都度ハザードマップを更新している。本ハザードマップでは、相模湾沿岸及び相模川流域から最大500mの範囲での浸水が予測されている[7]。



図1 茅ヶ崎市を対象とした提案システムの動作画面

本システムでは、地理情報として国土地理院の基盤地図情報を使用した[8]。これは、Web上から任意の地域のメッシュにおける、様々な種類の基盤地図情報を、XMLデータ形式で取得することが可能である。ダウンロードしたXMLデータは、基本項目と数値標高モデルの専用表示ソフトウェアである基盤地図情報ビューア[9]によって読み取られ、これをShape形式のデータに変換して書き出すこととする。次に、これらのデータをフリーオープンソースの地理情報システムであるQGIS[10]へ、変換したShapeファイルをベクターレイヤとして読み込んで表示させた。QGIS上では、マップキャンバスにタイルマップを追加するためのプラグインであるTileLayerPlugin[11]と、3D視覚化プラグインであるgis2threejs[12]を使用し、高度情報を持った3次元の地理情報データを作成した。また、テキストチャデータとして、国土地理院の地図・空中写真閲覧サービス[13]を利用し、前掲のTileLayerPluginを用いて、航空写真を地形モデルに投影した。QGIS上で加工された3次元データは、地形、道路、建築物の外周線の3つのレイヤとして、STL形式のデ

ータとして書き出した。加工された3次元地理情報データは、3DCGソフトウェアであるblender[14]上に読み込んだ。道路データは、路面にポリゴンを生成し、市街地の道路面を詳細に作成した。道路面を表すポリゴンは、オープンデータの地形モデルの高さ情報と値が異なる箇所があったため、blenderのclothモディファイアを用いて、道路面を地形モデルに沿って落とし込んだ。建築物の外周線は、対象地域の都市計画地図の用途地域を参照し、容積率から想定される建物高を、街区全体の建物高さとして入力した。これらblender上で生成された3次元モデルデータは、FBX形式のデータとして書き出し、これをゲームエンジンUNITY[15]に読み込み、避難行動のためのアルゴリズムを施すこととした(図2)。

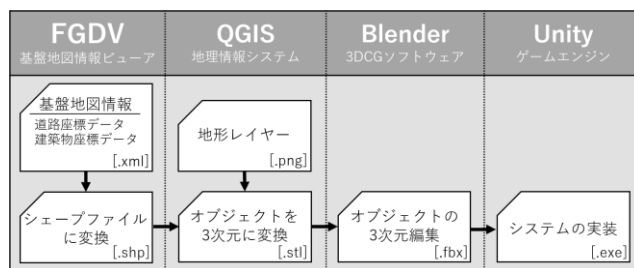


図2 本システムの開発フロー図

内閣府等によって作成された津波・高潮ハザードマップマニュアル[16]によれば、浸水予測手法の考え方として、作成目的・評価対象に応じた精度が求められるとされている。浸水予測手法として、時系列を考慮した数値計算シミュレーションによる設定は、浸水の時間的経過に関するデータや地点ごとの浸水深データなど、ハザードマップ作成に必要なデータを精度よく得られるとされているが、技術力と費用を要するため高コストのものとなる。一方で、簡便な手法として地盤高による設定手法も挙げられており、これは低コストで実施できるが、正確な流速や浸水開始時刻、地形による津波遡上の時系列的な影響が予測されないものとなっている。本システムでは、津波・高潮ハザードマップによる浸水予測手法のうち、地盤高による設定手法をベースとし、これに津波モデルを一定速度で移動させることによって、浸水開始時刻等の時系列を部分的に考慮したモデルを採用する。ここでは、津波を表すモデルとして、0.1度回転させた傾斜平面を用意し、これを地形モデルに挿入することによって、標高に応じた時系列浸水を再現した。地形や建物による流速の変化や施設等の破壊条件は設けていないため精度は劣るが、簡易な計算で表すことができるため、軽量の津波モデルとして採用した。

本システムでは、津波から自律的に避難するエージェントを作成した。避難行動アルゴリズムを改良することにより動作の軽量化をはかることで、同時に2万体のエージェントが、自律的に動作するものとして開発を行った。避難するエージェントは、2種類の避難行動パターンと、3種類の

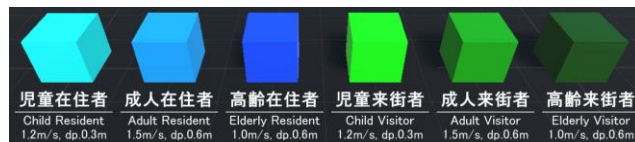
```

graph TD
    Start([開始]) --> ModelCreation{{地形モデル作成  
津波モデル作成  
エージェントモデル作成  
建築物モデル作成}}
    ModelCreation --> AgentPlacement[エージェントを  
道路上にランダム配置]
    AgentPlacement --> PathSearch[経路探索を開始]
    PathSearch --> EvacuationStart[避難行動開始]
    EvacuationStart --> EvacuationAction[避難行動実行]
    EvacuationAction --> EvacuationComplete[避難行動完了]
    EvacuationComplete --> End([終了])

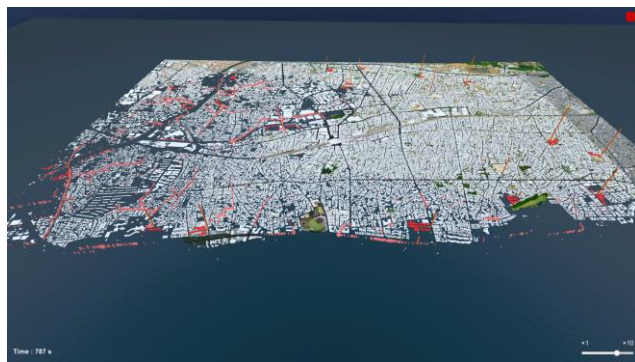
    subgraph DetailedFlowchart
        EvacuationStart2([避難行動開始]) --> Decision1{津波高さが  
被災津波深さを  
超える?}
        Decision1 -- 被災者判定 --> Decision2{収容店員が  
現在の避難者数  
を超える?}
        Decision1 -- 避難先に到着 --> Decision2
        Decision2 -- 避難完了者判定 --> End2([避難完了者判定])
        Decision2 -- 在住者  
エージェント? --> Decision3{最寄りの  
避難先を検索}
        Decision2 -- 最寄りのエージェントの  
避難先を検索 --> Decision3
        Decision3 -- これまでに  
訪れたことのある  
避難先? --> End2
        Decision3 -- 繰り返し --> Repeat([繰り返し])
    end

```

また、年齢属性として、成人エージェント、児童エージェント、高齢者エージェントの 3 種類を用意した。成人エージェントは、移動速度 1.5m/s、被災津波深さ 0.6m、児童エージェントは、移動速度 1.2m/s、被災津波深さ 0.3m、高齢者エージェントは移動速度 1.0m/s、被災津波深さ 0.6mとした。このエージェントは、システム上では立方体であらわされるものとし、在住者は青色、来街者は緑色、年齢属性は明度で、その性質に応じて 6 種の色分けを行い、シミュレーション時の避難行動をわかりやすく可視化することとしている (図 4)。



本システムでは、シミュレーション開始後、設定画面で登録した数と特質を持ったエージェントが、範囲内にある道路面上にランダムに配置される。在住者エージェントは、自らの座標から最も近い位置にある高台または赤色で表された津波避難ビルを目指して移動し、来街者エージェントは最も近いエージェントに従って移動する。設定された津波高さ以上の高台または津波避難ビルに収容されたエージェントは、避難完了者としてオレンジ色のバーで表され、どの津波避難ビルに避難者が集中しているのかを表す。一方で、津波を表す傾斜平面が、エージェントに設定された被災津波高さ以上の値となった際には、被災したエージェントとして判定される。この被災したエージェントは、その場でピンク色のバーとなり固定される。ピンク色のバーが集中している地域が、被災者が多く発生する位置であると考えられる(図5)。



シミュレーション終了後、結果画面が表示される。ここでは、在住者、来街者と年齢属性別の被災者の数が表示されるとともに、その結果を CSV ファイルとして出力を行う。エージェントは毎回ランダムに道路上に生成、配置されるため、シミュレーションの初期条件によって結果に差異が生じる。そのため、条件を設定した後、繰り返し試行してデータを収集し、分析することが可能なものとした。本システムによってシミュレーションを複数回実施し、そこから出力された結果を分析することによって評価を行う。

本システムを用いて、神奈川県茅ヶ崎市の沿岸部を対象地区とした避難行動シミュレーションを行った。20,000体の避難エージェントを、対象地区の道路にランダムに配

置して、避難行動を行わせる。本システムではエージェントの年齢属性を3種類用意し、5~14歳を児童、15~64歳を成人、65歳以上を高齢者とした。また、5歳未満のエージェントについては成人とともに避難するものとした。

今回の実験では対象地区である、茅ヶ崎市の国政調査を基にした住民基本台帳による2019年12月の年齢別人口[17]を参考にし、児童13%、成人61%、高齢者26%とした。また、在住者と来街者の比率を資料[18]の茅ヶ崎市平成29年の入込観光客調査結果から1日当たりにおける平均観光者数を計算し、それぞれの比率を在住者99%、来街者1%と設定した。本シミュレーションでは、エージェント数を2万体制とした。また、津波の高さとしては5m、10m、15mを用意し、それぞれの設定で10回のシミュレーションを行った。3種類の津波高さ時における茅ヶ崎市の最大津波浸水域を示す(図6-8)。

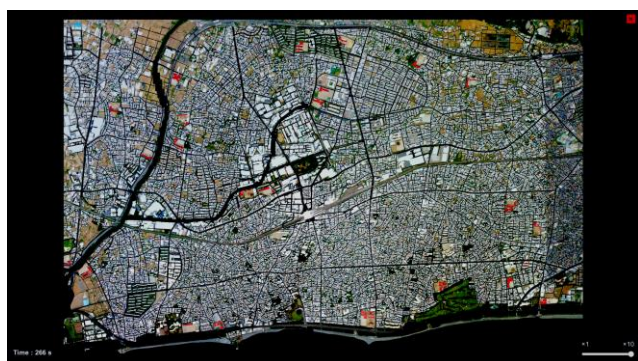


図6 津波高5m時の最大浸水域



図7 津波高10m時の最大浸水域



図8 津波高15m時の最大浸水域

4. 結果と考察

本システムを用いて、茅ヶ崎市における津波避難行動のシミュレーションを、エージェント数2万体制を用いて行った(表1, 図9)。津波高さ5mの時、対象範囲内の被災率は全体で0.07%となった。平均被災率は、在住者が児童0.08%、成人0.06%、高齢者0.08%、来街者が児童0.12%、成人0.08%、高齢者0.12%となった。被害は少ないが、逃げ遅れた避難者が被災することが分かった。また、成人エージェントに比べて被災浸水深さの低い児童エージェントと移動速度の遅い高齢者エージェントの被災が高いものとなった。さらに、避難先を知らない来街者の被災率もそれぞれ高いものとなっている。次に、津波高さ10mの時、平均被災率は10.60%となった。エージェントの属性別に見ると、在住者は、児童11.40%、成人10.28%、高齢者10.93%、来街者は、児童10.38%、成人11.11%、高齢者12.02%となった。エージェント間の被災の差については、5mの時の同様であるが、被災者数の数は飛躍的に増加している。茅ヶ崎市ハザードマップで想定されている津波高さで最大のものは、元禄型関東地震と神縄・国府津-松田断層帯地震の連動地震で、約8mである[19]。本シミュレーションによる10mの津波は、市の最大想定津波より高いものであるが、対象地区全体で1割以上の被害が発生することが分かった。特に河川を遡上する津波によって、市街地の奥深くまで津波が浸水したことによって被災したケースが多く見られた。平坦な地形が市街地内部まで続くこのような土地では、内陸部にも適切な避難場所の計画が必要である。最後に、津波高さ15mの時であるが、全体の被災率は平均で32.78%となり、特に被災判定津波高さの低い児童エージェントは在住者児童が42.64%、来街者児童が42.69%と4割以上の被災率となった。このクラスの津波は防災計画の上で発生することを想定していないが、発生した際は甚大な被害となる。

表1 茅ヶ崎市における津波被災率

津波高さ	5	10	15
在住者児童	0.08%	11.40%	42.64%
在住者成人	0.06%	10.28%	29.80%
在住者高齢	0.08%	10.93%	34.92%
来街者児童	0.12%	10.38%	42.69%
来街者成人	0.08%	11.11%	27.91%
来街者高齢	0.12%	12.02%	34.42%
総計	0.07%	10.60%	32.78%

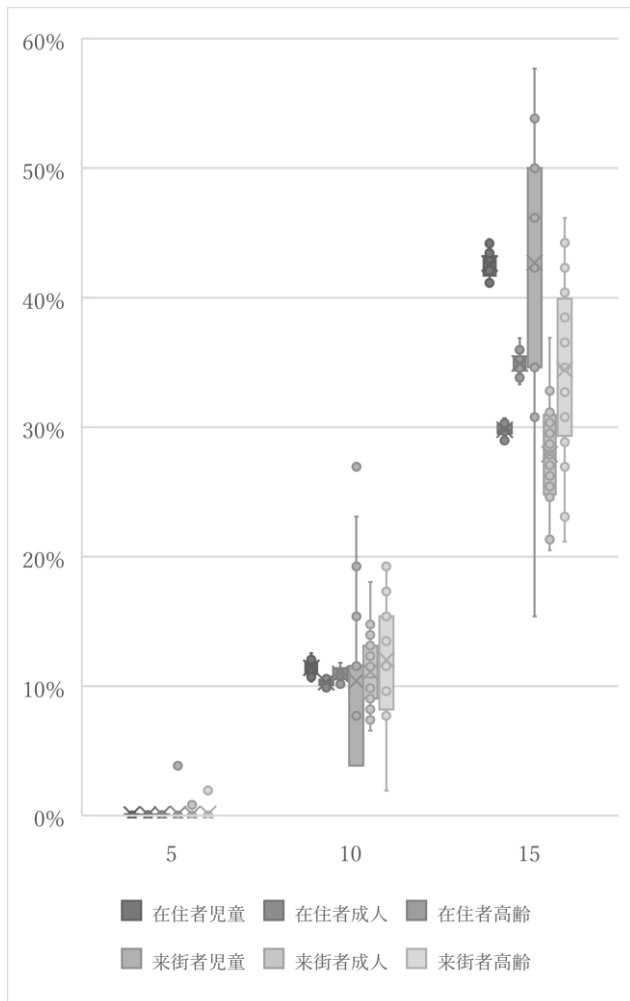


図9 茅ヶ崎市における津波被災率

5. 結果と考察

本研究では、オープンデータとゲームエンジンを活用した津波避難行動シミュレーションを開発し、神奈川県茅ヶ崎市を対象としたシミュレーションを行ったものである。開発環境として、フリー・オープンソースソフトウェアやゲームエンジンなどの低コストで実現できる環境を用い、またデータセットとして、国土地理院の地理情報データや、地方自治体の人口データ、観光客数データなどのオープンデータを活用することで、地方自治体レベルでの運用が可能なシステムの開発を行うことができた。また、茅ヶ崎市におけるシミュレーションの結果、津波高さ5mの際には、0.07%の被災率であったものが、津波高さ10mとなると10.60%の大きな被災が発生する可能性があることが分かった。本地区の想定する最大津波高さは8mであるが、津波は波高の高さに対して等比級数的に被災率が高くなることがあるため、注意が必要である。特に、本地区では河川を遡上する津波による内陸部での被災も多く見られたため、市街地における河川沿いの地域においての防災計画を行う必要があると思われる。

今後、本システムで再現された津波の動きは限定的なものであるため、格子法などの手法を取り入れ、津波の時系列的変化について再現を行う。また、避難エージェントのアルゴリズムについても、避難距離や避難者密度、道路勾配など、各種条件に応じた避難速度の検討、エージェント間での情報交換などの改良を行っていくこととする。また、津波とともに、台風などによる浸水と避難についても、浸水時間軸や避難アルゴリズムを改良することによって、実装可能であると考えられる。

謝辞 本研究はJSPS 科研費JP19K12665の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 福井貴也, 越村俊一, 松山昌史. 格子ボルツマン法による津波氾濫流の2D-3Dハイブリッド・シミュレーション. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 2010, vol.66, no. 1, pp.61-65.
- [2] 有光剛, 大江一也, 川崎浩司. 平面2次元津波遡上計算結果を用いた津波波圧算定方法の提案. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 2012, vol.68, no.2, pp.781-785.
- [3] 田邊将一, 浅井光輝, 中尾尚史, 伊津野和行. 3次元粒子法による橋桁に作用する津波外力評価とその精度検証. 構造工学論文集, 2014, vol.60A, pp.293-302.
- [4] 諏訪多聞, 今村文彦, 菅原大助. 非線形長波モデルと流体粒子法による津波シミュレータの開発. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 2014, vol.70, no.2, pp.16-20.
- [5] 藤岡正樹, 石橋健一, 梶秀樹, 塚越功. 津波避難対策のマルチエージェントモデルによる評価. 日本建築学会計画系論文集, 2002, vol.67, no.562, pp.231-236.
- [6] 大畑大志郎, 高井伸雄, 鏡味洋史. 釧路市中心市街地における津波避難施設配置の評価: マルチエージェントシステムを用いた津波からの避難シミュレーション その2. 日本建築学会計画系論文集, 2007, vol.72, no.612, pp.87-91.
- [7] “茅ヶ崎市津波ハザードマップ”. https://www.city.chigasaki.kanagawa.jp/_res/projects/default_project/_page_001/001/268/tsunamihazardmap.pdf, (参照 2019-12-22).
- [8] “基盤地図情報ダウンロードサービス - 国土地理院”. <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php> (参照 2019-12-22).
- [9] “基盤地図情報ビューア”. <https://fgd.gsi.go.jp/otherdata/tool/FGDV.zip> (参照 2019-12-22).
- [10] “QGIS プロジェクトへようこそ!”. <https://www.qgis.org/ja/site/> (参照 2019-12-22).
- [11] “TileLayerPlugin”. <https://github.com/minorua/TileLayerPlugin> (参照 2019-12-22).
- [12] “Qgis2threejs”. <https://github.com/minorua/Qgis2threejs> (参照 2019-12-22).
- [13] “地図・空中写真閲覧サービス”. <https://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1> (参照 2019-12-22).
- [14] “Blender”. <https://blender.jp> (参照 2019-12-22).
- [15] “Unity”. <https://unity.com/> (参照 2019-12-22).
- [16] “津波・高潮ハザードマップマニュアルの概要”. <https://www.mlit.go.jp/common/000054428.pdf> (参照 2019-12-22).
- [17] “茅ヶ崎市の人口と世帯”.

https://www.city.chigasaki.kanagawa.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/032/997/r01-12kakutei.xls（参照 2019-12-22）。

[18] “平成 29 年入込観光客調査結果”

https://www.city.chigasaki.kanagawa.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/029/098/kanko_chosah29.pdf（参照 2019-12-22）。

[19] “茅ヶ崎市津波ハンドブック”。

https://www.city.chigasaki.kanagawa.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/001/268/tsunamihandbook.pdf（参照 2019-12-22）。