エージェントによる津波避難行動と被災箇所の特定 Tsunami Evacuation Behavior and Identification of Dameged Areas by Agents

川合康央^{*1} Yasuo Kawai 海津ゆりえ^{*2} Yurie Kaizu

*1 文教大学情報学部 Faculty of Information and Communications, Bunkyo University *2 文教大学国際学部 Faculty of International Studies, Bunkyo University

Abstract: Currently, hazard maps are developed using computationally expensive techniques. After a major disaster, these maps must be revised. We developed a tsunami evacuation simulation system using a game engine and open data at low cost. We then conducted a simulation evaluation using the target area as Kamakura City, Japan. An agent that performs evacuation actions, and autonomously searches for evacuation destinations and evacuation behaviors at specified speeds was developed, to clarify current issues with the location of evacuation sites. The agent prepared three types of walking speeds and disaster conditions, and two types of evacuation behaviors, and could freely change the number and ratio of agents. As a result of the simulation, it became clear that there are places where victims are concentrated even in inland areas.

1. はじめに

津波は、海底を震源とする地震時に、海底地形の短時間で の急激な変形によって発生する.この津波は、波高が低いもの であっても非常に強い圧力を持ち、沿岸地域の広範囲にわたっ て大きな被害を与える[松冨 94].これまでの研究では、津波の 波動による数値計算から、津波到達時間や地形効果による津 波集中などについて、多くの成果が発表されてきた[相田 77] [小谷 94] [首藤 94].これらは、波長数キロ単位の津波と地形 の関係について着目したものであり、国土レベルでの防災計画 を検討する際に重要なものである.

一方で、住民にとって身近な防災情報である津波ハザードマ ップなどは、主として地方自治体が防災計画を策定している。そ こでは、国や県から提供された津波シミュレーションのデータを もとに、浸水域や津波到達時間、最大津波高さを参照し、個別 の街路における避難経路や津波簿避難ビルの選定を行ってい る.しかし、提供されるデータによって防災計画を策定するため、 元となるデータが変更されると、防災計画を大幅に見直すことが 必要となる。例えば、神奈川県鎌倉市では、2011年の東日本大 震災以前と以後によって、県提供データにおける津波浸水域の 大規模な見直しが行われため、ハザードマップの再作成が行わ れた(図1)[鎌倉市 09, 12, 13a].



図1 鎌倉市のハザードマップの推移(左から2009年[鎌 倉市09],2012年[鎌倉市12],2013年[鎌倉市13a]) 本研究では、ゲームエンジンとオープンデータを用いることに よって、低コストで地域の実情を詳細に反映した、エージェント

連絡先:川合康央, 文教大学情報学部情報システム学科, kawai@shonan.bunkyo.ac.jp による津波避難行動のシミュレーションシステムの構築を行う. 本システムでは、津波そのものではなく、エージェントによる避 難者の避難行動に着目し、被災が予測される個所を可視化す ることによって、防災計画に資する基礎的なデータを提供するこ とを目的とする.

2. 方法

2.1 地理情報

地理情報として、国土地理院の基盤地図情報ダウンロードサ ービス*1を使用した.本サービスでは、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*2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、フリーオープンソースの地理情報システムである QGIS*3に、変換した Shape ファイルを新規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*4と, WebGLと three.js Javascript 3D libraryを使用した視覚化プラグ インである Qgis2threejs*5を使用し、高さ情報を持った 3 次元の 地理情報データを作成した.テクスチャデータとして、国土地理 院の地図・空中写真サービス*6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、道路縁、建築物 の外周線の 3 つのレイヤを、夫々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 の統合環境で ある blender*7上に読み込んだ. 道路緑データは, 路面に相当 する面にポリゴンを手動で生成し, 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, 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

^{*1} https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php

^{*2} https://fgd.gsi.go.jp/otherdata/tool/FGDV.zip

^{*3} https://www.qgis.org/

^{*4} https://plugins.qgis.org/plugins/TileLayerPlugin/

 $[\]star 5$ https://plugins.qgis.org/plugins/Qgis2threejs/

^{*6} https://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1

^{*7} https://www.blender.org/



図2 津波浸水域(上から1分後,5分後,10分後)

周線は、対象地域の都市計画地図の用途地域[鎌倉市 18a]を 参照し、容積率から想定される凡その建物高さを地区ごとに入 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、これを統合開発環境である ゲームエンジン UNITY*8に読み込むこととした.

2.2 津波の再現

国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 [内閣府 04]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、ハザードマップ作成に必要な浸水の時間的経過に 関するデータ、地点ごとの浸水深データ等を精度よく得られる が、技術力と費用を要するため高コストのものとなることが課題 であるとされている.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、これは簡便で安価に実施できるが、 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3次元地形モデルに挿入することで,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, 軽量な津波モデルとして採用した(図2).

2.3 避難者エージェント

本システムは、津波から自律的に避難するエージェントを作成し、アルゴリズムを改良することで動作の軽量化をはかることで、1万体のエージェントが同時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つの 年齢属性を持つものとした.本システムでは、避難行動パター ンとして、在住者と来街者の2種類を想定している.在住者は、 避難場所を予め知っているエージェントとして設定されている. 在住者エージェントは、津波発生後に、自らの座標から最も近 い位置にある高台または津波避難ビルに向かって、最短のル ートを検索し、定められた速度で移動することとした.また、津波 避難ビルに収容定員を設定し、避難したエージェントが到着し た際に既に津波避難ビルに避難できないものとした.そのた め、収容定員を超えていたことを確認したエージェントは、現在 の座標から最も近い避難先を検索し、再度避難行動を始める. 一方で来街者は、避難先を知らないエージェントとして設定され ており、津波発生後、自らの座標に最も近いエージェントに従っ て避難行動するものとした(図3).

また,年齢属性として,成人,児童,高齢者の3種類を用意した.成人エージェントは,移動速度0.8m/s,被災津波深さ0.6m, 児童エージェントは,移動速度0.8m/s,被災津波深さ0.3m,高 齢者エージェントは移動速度0.6m/s,被災津波深さ0.6mとした. 計6種類の各エージェントは,その性質に応じて色分けを行った.

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。 夫々のエージェントは、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、あるい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、どこの高台や津波避難ビルに避難者が集中しているのかを可視化する。一方で、津波を表す傾斜平面が、夫々の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。 被災エージェントは、その場でピンク色のバーとなり、被災した位置に留まる。 結果、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 4).

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 形式のファイルとして,システム内に出力を 行うものとなっている.エージェントはランダムに道路上に配置さ れるため,シミュレーションの初期条件によって結果は異なる. 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.

^{*8} https://unity3d.com/



図3 避難するエージェント群



図 4 津波避難ビル(赤),避難者収容者数(橙), エージェント被災箇所(桃)

3. 結果と考察

本システムを用いて,エージェントによる避難行動シミュレー ションを行った.対象地区は,神奈川県鎌倉市市街地とし,由 比ガ浜及び材木座に面する海岸から,JR 鎌倉駅周辺を含む凡 そ9kmの範囲とした.本対象地区における避難困難区域内人 口は浸水区域内建物数から約10,420人と推計されている[鎌倉 市 16].そこで,本システム上で10,000体のエージェントを対象 地区の道路上にランダムに配置し,対象地区の地形に基づく高 台または市が指定されている津波避難ビル23棟[鎌倉市 13a] を避難先として,エージェントに避難行動を行わせた.

エージェントの年齢属性として、本シミュレーションでは児童 を5~14歳、成人を15~64歳、高齢者を65歳以上とし、また5 歳未満のエージェントは成人とともに避難するものとした.本実 験では、鎌倉市の年齢別人口[鎌倉市 18b]に基づき、児童8%、 成人61%、高齢者31%とした.次に、在住者と来街者の比率を、 資料[鎌倉市 13b]の入込観光客調査から1日当たりの平均観 光客数を割り出し、その比率を在住者78%、来街者22%とした. 今回は津波高さとして5m、10m、15mの三種類を用意し、それ ぞれの場合について50回のシミュレーションを行った.

シミュレーションを試行し、その集計を行った結果、エージェ ント別の平均被災率は、次のような値となった. 津波高さ 5mの 時に、在住者は児童 0.27%、成人 0.05%、高齢者 0.25%、来街 者は児童 0.20%、成人 0.05%、高齢者 0.26%となった. 津波高 さ 10m の時、在住者児童は 5.00%、成人は 3.36%、高齢者は 5.50%、来街者児童は 4.85%、成人は 3.53%、高齢者は 5.56% となった. また、津波高さ 15m 時には、在住者児童 21.60%、成 人 12.81%、高齢者 18.85%、来街者児童 22.33%、成人 13.36%、 高齢者 19.08%であった(図 5). いずれのケースにおいても、成 人エージェントに比して、被災する津波高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は、成人エージェ



ントに比して被災率が高いものとなった.また,対象地区全域での平均被災率は,津波高さ5mの時0.13%であったが,津波高さ10m時には4.19%,15m時には15.57%であり,津波高さに応じて甚大な被害が生じる可能性があることが分かった.

シミュレーションの結果,内陸部においても被災者が集中してみられる箇所が存在することが明らかとなった.これらは,内陸部に河川が入り込んだ低地に多くみられ,津波が河川を遡上し,海岸方向からの津波と挟まれる個所が見られた.また,避難者は津波発生後に何らかの避難行動を行うため,実際には内陸部に避難してはいたが,低地が続く地形においては,内陸部の市街地において津波被害に遭遇する事態も見られた.海岸沿いの津波避難ビルとともに,低地の内陸部における市街地においても,被災者が集中してみられる箇所が観測されたため,適切な避難場所と川沿いを迂回する安全な避難経路の策定が必要であると考えられる.さらに避難経路によっては目の前に津波が迫る海側へ避難しなければならない箇所もあり,避難サインや誘導方向などの改善を必要とする場所があることも明らかとなった.

4. まとめ

本研究では、ゲームエンジンを用いた津波避難行動シミュレ ーションシステムを開発し、実在する市街地として、鎌倉市を対 象としたシミュレーションによる評価を行った、津波の再現につ いては、仮想海面を模した傾斜平面挿入による簡易な表現を 用いることによって、処理を軽量化し、リアルタイムでの検討を 可能とした.一方、避難者については、自律的に避難先を検索 し、定められた速度で移動するエージェントを作成した.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.また、津波発生時には、在住者や来街者がど のような状態であるかは不確定であるため、本システムでは避 難者を対象地区の道路面上にランダム配置することとした.

結果,鎌倉市では、沿岸部だけでなく、避難途中の内陸部で も大きな被害が発生することが明らかとなった.また、低標高が 続く道や川に挟まれた場所など、高さの比較的低い津波であっ ても大規模な被害が出るポイントがあることを確認した.一方で、 鎌倉市は歴史的文化都市でもあり、景観法に基づく景観計画 が施されており、景観地区[鎌倉市 07]や風致地区[鎌倉市 14] が定められている.そのため、建物高さは地区により 8~15mの 高さ制限が課されており、津波避難ビルとしての収容定員は小 さいものとなっている.今後、多くの被災が予測される箇所にお いては、地方自治体と地域住民の協働によって、適切な津波避 難ビルの配置計画と指定が必要であると考えられる.また鎌倉 市では、発災後の速やかな行動が被災率に大きな影響を持つ ため,詳細な地域別に,発災後約8分間と約3時間までの状況 に備えた地域別津波避難実施計画とこれに伴うワークショップ を実施しており,実効性の高い津波防災のための施策を行って いる[鎌倉市16].

提案したシステムは、オープンデータを用い、開発環境として 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、低コストで開発が可能であるため、地方自治体な どで、地域住民とともに防災計画を検討する際に有効なツール となると考えられる。今回提案したシステムは、津波表現につい て簡易なものを用いたが、別途いくつかの条件を設定した動的 な津波モデルと置き換えることで、より正確なシミュレーションが 可能になると考えられる。また、実際に防災計画を検討するにあ たり、津波避難ビルなどの避難先や災害時に通行を可能とする 私有地が追加できる等、都市条件をインタラクティブに変更が 可能なツールへと発展していく必要がある。

今回のシステムでは、津波に対する避難行動をシミュレートするものとして開発を行ったが、津波発生前の地震が近い場所で発生した場合、建物や都市設置物等の火災、崩壊などによる道路の寸断が起こる可能性がある.また、津波避難ビルについても、すべて稼働することが前提となっているが、震源が近い場所で大規模な地震が発生した場合には、これらのビルそのものが避難場所として使用できないケースが考えられる.今後は、本システムを改良し、大規模火災、地震、洪水等、複合的な災害を組み合わせた総合的な防災シミュレーションモデルを作成し、実際の防災計画に資するシステムの開発を行っていくこととする.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP16K02080 の助成を受けたものです.

参考文献

- [相田 77] 相田勇:陸上に溢れる津波の数値実験-高知県須崎および 宇佐の場合,地震研究所彙報, Vol.52, pp.441-460, 1977.
- [鎌倉市 07] 鎌倉市都市景観部都市景観課都市景観担当: 鎌倉市景 観計画, 鎌倉市, 2007.
- [鎌倉市 09] 鎌倉市防災安全部総合防災課:鎌倉市津波ハザードマ ップ材木座から稲村ガ崎,鎌倉市,2009.
- [鎌倉市 12] 鎌倉市防災安全部総合防災課:鎌倉市津波浸水予測図 (暫定版),鎌倉市,2012.
- [鎌倉市 13a] 鎌倉市防災安全部総合防災課:鎌倉市津波ハザードマ ップ材木座から稲村ガ崎,鎌倉市,2013.
- [鎌倉市 13b] 鎌倉市観光基本計画推進協議会災害時観光客対策部 会:鎌倉市観光客等地震・津波対策ガイドライン,鎌倉市,2013.
- [鎌倉市 14] 鎌倉市都市景観部都市景観課風致担当:鎌倉市風致地 区条例による許可の審査基準・運用と解釈,鎌倉市, 2014.
- [鎌倉市 16] 鎌倉市防災安全部総合防災課:鎌倉市津波避難計画地 域別実施計画由比ガ浜・材木座エリア(第1版),鎌倉市,2016.
- [鎌倉市 18a] 鎌倉市まちづくり計画部都市計画課都市計画担当:用 途地域等閲覧用参考図書,鎌倉市,2018.
- [鎌倉市 18b] 鎌倉市総務部総務課統計担当: 年齢(各歳・5 歳階級) 別, 男女別人口, 鎌倉市, 2018.
- [小谷 94] 小谷美佐, 今村文彦, 首籐伸夫: GIS を利用した津波遡上 計算と被害推定法, 海岸工学論文集, Vol.45, pp.356-360, 1998.
- [松冨 94] 松冨英夫, 首藤伸夫: 津波の浸水深, 流速と家屋被害, 海 岸工学論文集, Vol.41, pp. 246-250, 1994.
- [内閣府 04] 内閣府(地震·火山対策担当),農林水産省農村振興局 防災課,農林水産省水産庁防災漁村課,国土交通省河川局海岸

室,国土交通省港湾局海岸・防災課:津波・高潮ハザードマップマ ニュアル,国土交通省,2014.

[首藤 94] 首藤伸夫, 永井孝志: 津波の数値シミュレーションと可視化, 可視化情報学会誌, Vol.14, No.52, pp.2-6, 1994.