

防災計画における合意形成のための 津波避難行動シミュレーションシステムの開発

川合康央^{†1} 海津ゆりえ^{†1} 河原健太^{†1} 大淵遥平^{†1} 大塚哲史^{†1} 富松栞里^{†1}

概要: 本研究は、地方自治体の防災計画に資する津波避難行動シミュレーションシステムを、ゲームエンジンを用いて開発を行ったものである。地方自治体は津波ハザードマップを国や県の津波予想データをもとにして作成しているが、その元となるデータを用いて街路レベルで避難計画を作成することは難しい。本研究では、最も近い避難場所へ自律的に避難行動を行うエージェントを大規模に作成し、避難者が被災する個所を特定する。提案したシステムを用いたシミュレーションの結果、津波に挟まれる街路や津波側に避難する経路があることが明らかとなった。本システムは、低コストでの開発が可能であり、地方自治体と地域住民が自由に使用でき、津波避難ビルの新規指定や災害時の避難経路指定など、防災計画を検討する際に有効なツールになると考えられる。

Development of Tsunami Evacuation Behavior Simulation System for Consensus Building in Disaster Prevention Planning

YASUO KAWAI^{†1} YURIE KAIZU^{†1} KENTA KAWAHARA^{†1}
YOUHEI OBUCHI^{†1} SATOSHI OTSUKA^{†1} SHIORI TOMIMATSU^{†1}

Abstract. In this research, we developed a simulation system for tsunami evacuation behavior that contributes to municipal disaster prevention planning using a game engine. Although local governments have created tsunami hazard maps based on the tsunami forecast data of the country and the prefecture, it is difficult to prepare evacuation plans at the street level using the these data. In this system, a large number of agents that autonomously evacuates to the nearest evacuation area is created, and the place where the disaster area is specified. As a result of the simulation using the proposed system, it became clear that there are street to evacuate to the seaside and street between the tsunamis. This system can be developed at low cost and can be used freely by local governments and residents. Furthermore, it will be an effective tool for discussing disaster prevention plans, such as new designation of tsunami evacuation building and evacuation route designation at the time of disaster.

1. はじめに

津波被害に対する防災計画の検討を行う際、地方自治体と住民の協働による合意形成が必要である。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ツールとして、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、開発環境としてゲームエンジンを用いることとし、特にエージェントによる避難行動に着目して、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製の基準となる国や県の津波予測シミュレーションは、正確に検討されたものではあるが、マクロな視点で作成されており、自治体が避難計画を策定する際に用いるものとしては、避難経路の選定などの細部の検討が不十分なものとなっている。しかし、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困難である。

これまでの津波シミュレーションでは、津波予測に対して格子法や粒子法などの流体シミュレーションによる津波の予測が行われてきた[1-3]。これらの手法は、地形、建物などによる影響を詳細に検討することが可能であるが、一方で大規模な計算を行うため、高速な演算が可能な計算機が必要であり、検討のために条件を変更してリアルタイムレンダリングを行うことは難しい。本システムは、国土地理院のオープンデータである標高データ、建物データ、道路データを組み合わせ、これに僅かな傾きを持った水面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することで、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、津波発生後に自身の座標から最も近い高台、広域避難所、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

^{†1} 文教大学
Bunkyo University.

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[4-6]。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予測の検証が可能となると考えられる。

2. 提案手法

2.1 地理情報

本システムの開発にあたり、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システム[7]を利用した。基盤地図情報は、国土地理院による基本測量成果であり、海岸線、道路縁、建物の外周線、数値標高モデルなどの位置を表す情報である。この Web サイトから、汎用性の高い地理情報の GIS データを、XML 形式でダウンロード可能である。

まず、基盤地図情報の基本項目と数値標高モデルの表示ソフトウェアである基盤地図情報ビューア (FGDV) [8]によって、ダウンロードした XML データを読み込み、道路縁、建築物の外周線をシェープファイル形式に変換してエクスポートを行った。変換した SHP データは、QGIS のプロジェクト内にベクタレイヤの追加として読み込んだ。

QGIS 上で、"TileLayerPlugin"[9]を用いて、基盤地図情報から標高情報を画像データとして取り込み、"Qgis2threejs"[10]を用いて、3次元で地形モデルの再現を行うこととした。建物モデルについても Qgis2threejs を使い、3次元モデル化を行った。さらに、TileLayerPlugin を用いて、国土地理院の地図・空中写真閲覧サービス[11]より、空中写真カラーからテクスチャデータを作成し、これを3次元モデルとは別にテクスチャ情報として用意した。QGIS 上で準備した3次元モデルを、STL 形式で書き出し、3次元 CG オーサリングソフトウェアである Blender 上に取り込んだ。

Blender 上では、不要な面を消去し、ポリゴン数を抑制す

るとともに、道路縁データをもとにして、道路の外周線から道路面を作成した。また建築物モデルについては、実際の写真をもとにして、建物高さを個別に調整した。また、QGIS 上で作成したテクスチャを地形モデルに適用することとした。地理情報のデータ変換の流れについて、以下に図示する (図 1)。

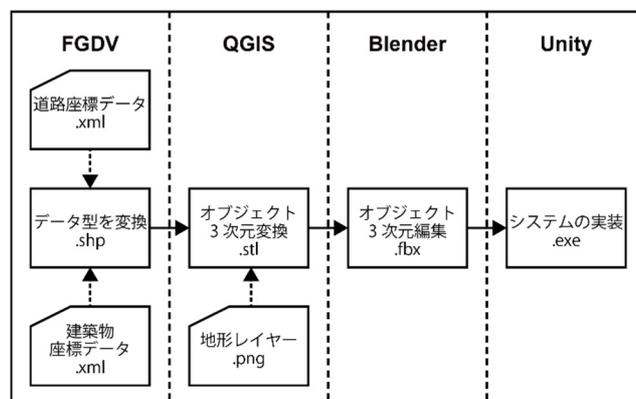


図 1 地理情報のデータ変換

Figure 1 The Data Conversion of Geographic Information.

2.2 ゲームエンジン上での実装

Blender で作成した3次元形状モデルを、地形、道路、建物の3要素ごとに、別ファイルとして FBX 形式で書き出し、ゲームエンジン UNITY 上に取り込んだ。また、高さ 0m の位置に、海面を平面オブジェクトとして用意した。

津波を表すオブジェクトとして、平面モデルを 0.10 度回転させたものを用意した。本システムでは、このごく緩やかに傾斜した平面を海面に挿入し、40km/h の速度で平行移動させることによって、簡易的に津波を再現することとした。このオブジェクトのアニメーションによって、標高値の低い箇所から段階的に浸水する状況を再現することができた。実際の津波は、地形や建物の影響を受けるため、メッシュ法や粒子法による精緻な流体シミュレーションが必要となるが、これらの手法は計算量が多く、リアルタイムでの演算は限界がある。今回のシステムにおいて実装した傾斜平面挿入による手法は、簡易な手法であるため計算量が少なく、リアルタイムでの処理に適しているとともに、県発表の津波予測と大きな差異は見られなかったため、今回は本手法を採用することとした。本システムでは、海面に対する津波の高さを 0~30m の範囲で可変的にシミュレーションができるものとした。一方で、津波の方向や速度については今後の課題として挙げられる。また、津波到着までの時間についても、シミュレーションによる再現速度を 1~10 倍までのタイムスケールでの再生が可能なものとして実装を行った (図 2)。



図 2 提案したシステムによる津波表現
(上：津波到達前，下：津波到達後)

Figure 2 Representation of Tsunami by Proposed System.
(Top: Before reaching the tsunami, Bottom: After reaching the tsunami).

本システムでは、避難者行動のシミュレーションとして、道路上に自律的に避難行動を行うエージェントを用意することとした。道路モデルは、地形、建物とは別途 GIS データから作成し、3次元情報として再構成したものを地形モデル上に配置した。この道路モデルの路面上を市域全体で結合したものを、避難行動エージェントの行動範囲として、ゲームエンジンで指定した。エージェントは、シミュレーション開始後、地域全体の路面上にランダムに配置される。エージェントの数は 0~数万人までの範囲で可変的なものとし、初期設定の画面で自由に数値入力が可能なものとした。数千人単位でのエージェントを用いたシミュレーションの動作を確認したが、エージェントが個別に探索行動を行うため、処理の遅延は見られなかった (図 3)。



図 3 津波避難エージェントの設定画面
Figure 3 Setting Screen of Tsunami Evacuation Agent.

エージェントモデルは単純な立方体で表され、種類によって色分けを施した。エージェントの種類としては「成人」、「高齢者」、「児童」の三種類を用意した。先行研究[12, 13]を参考にして、成人エージェントは歩行速度 1.5m/sec で移動し、津波浸水高が 0.6m となった段階で被災者とした。また、高齢者は明度が低い色で表示され、歩行速度 1.0m/sec とした。児童は明度が高い色で表示され、歩行速度 1.2m/sec、津波浸水高 0.3m で被災者とするよう判定を行うものとした。エージェントの行動パターンとして、「避難先を知っている」青色のエージェントと、「避難先を知らない」赤色のエージェントの二種類を用意した。「避難先を知っている」エージェントは、初期配置された場所から最も近い広域避難所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とした。また、避難行動時に、移動候補先の方向に津波が迫ってきた場合、その都度他の避難先の候補を選択し、移動方向を変更するものとした。一方、「避難先を知らない」エージェントは、周囲のエージェントの移動を参照して、これに従って移動し、避難行動を行うものとした (図 4)。



図 4 津波から避難するエージェント
Figure 4 Agent to Evacuate from the Tsunami.

3. シミュレーション

本稿では、提案したシステムによるシミュレーションの対象地区として、鎌倉市 (神奈川県) を選定した。本地域は、相模湾に面した人口密集地であり、海岸から近く標高の低い位置に中心市街地を持つ都市であり、大規模津波発生時に少なくない被害が想定されている。

本シミュレーションでは、対象範囲内に 1000 人のエージェントを路面上にランダムに配置した。災害時の避難者の分布は不確定であるため、ここではランダム配置によるシミュレーション結果を複数回実施し、その値を分析することによって、被害想定の評価と市域における危険個所の特定を行うこととした。

エージェントの割合は、鎌倉市の年齢別人口[14]に基づき、児童 8%、成人 61%、高齢者 31%とした。ここでは、児童は 5~14 歳、高齢者は 65 歳以上とし、また、5 歳未満

は成人とともに避難するものとしている。さらに、避難先を知っているエージェント 80%、避難先を知らないエージェント 20%とした。本シミュレーションでは、在住者は避難先を知っているエージェント、観光客は避難先を知らないエージェントとして設定している。この比率は、観光客の割合を鎌倉市観光客等地震・津波対策ガイドライン[15]を参考に、正月3が日の人出を除いた年間観光客数から、一日当たり平均観光客数を42578人とし、これを鎌倉市の人口172279人との比較から割合を算出したものを用いることとした。

本実験では、津波到達時間として、鎌倉市のハザードマップ[16]における津波予測の最短津波到達時間である10分を採用することとした。また、鎌倉市がハザードマップで想定している最大津波は14.5mであるが、本システムでは最大30mまでの津波を再現することが可能である。そこで、今回は津波高さとして5m, 10m, 15m, 30mの4パターンを用意し、それぞれ10回のシミュレーションを行うこととする。本システムにおいて、各シミュレーションの結果は、試行ごとに結果画面上で数字によって表示されるものとしたため、今回はこの値を集計したものをを用いることとした(図5)。



図5 シミュレーションの結果画面
Figure 5 Result Screen of Simulation.

4. 結果と考察

本シミュレーションによる津波高さ4パターンの条件におけるエージェントの被災率について見てみる。まず、津波高さ5mの場合、エージェントの被災者数は1000名あたり1~10名となった。本稿では、被災者数をエージェント数で除したものを被災率として求めることとする。本条件における全エージェントの被災率は、最小値0.1%から最大値1.0%となり、その平均値は0.390%となった。年齢別に見ると、児童は被災者数0~1名で被災率0.250%、成人は0~5名で0.246%、高齢者0~6名で0.710%となった。比較的高さの低い津波であっても、被災者が発生する可能性は高く、特に移動速度の遅い高齢者が被災する割合が高くなっている(図6)。

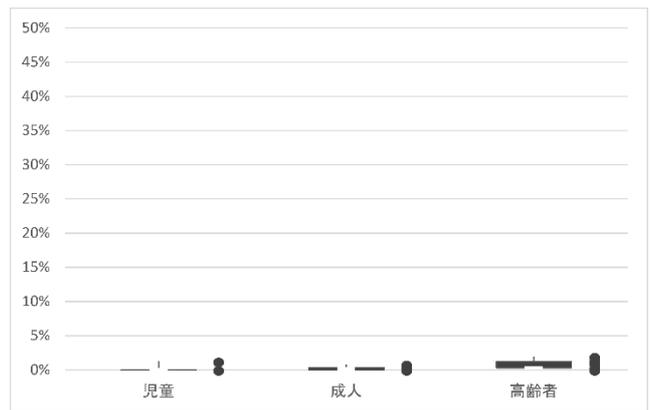


図6 津波高さ5mの場合における被災率
Figure 6 Damage Rate in Case of Tsunami Height 5m.

次に津波高さ10mの場合を見てみる(図7)。全体のエージェントの被災者数は1000名あたり40~73名となり、被災率の平均値は5.030%となった。属性別被災率は、それぞれ児童3.125%、成人2.934%、高齢者9.645%となった。津波高さ10mは大規模地震時に、当該地区で発生する可能性の高い津波高さであり、この時には少なくない被災者が生じることとなる。特に高齢者の被災率が1割弱あることも注意が必要である。また、児童についても初期配置の状況次第では、高い被災率となる。

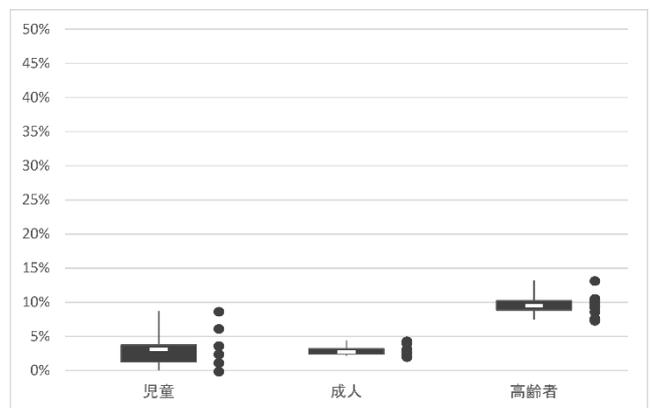


図7 津波高さ10mの場合における被災率
Figure 7 Damage Rate in Case of Tsunami Height 10m.

さらに津波高さ15mの場合は、全体の被災率が12.420%となり、被災率が児童8.625%、成人7.426%、高齢者23.226%となった(図8)。鎌倉市のハザードマップにおいて予測される最高津波高さは、神奈川県が想定する慶長型地震のケースの14.5mである。この津波高さに近い値を用いた本津波モデルでは、山側を含む市域全体で、人口全体の1割以上に被害が及ぶものとなった。また高齢者の被災率も非常に高いものとなり、避難時の移動速度が被災率に大きい影響を与えていると考えられる。

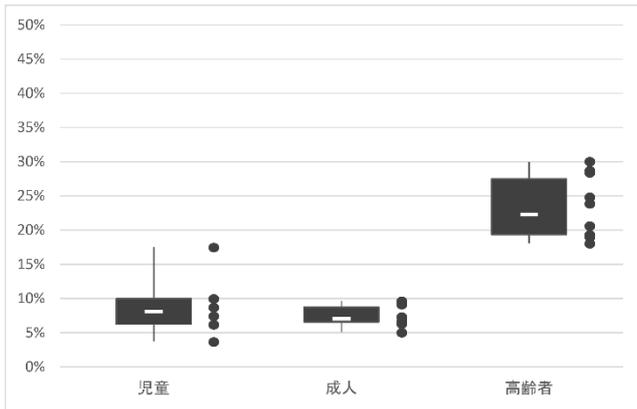


図 8 津波高さ 15m の場合における被災率

Figure 8 Damage Rate in Case of Tsunami Height 15m.

最後に津波高さ 30m の場合をしてみる (図 9)。市域全体での被災率は 23.890% となった。属性別被災率の平均値は、それぞれ児童 15.375%、成人 16.918%、高齢者 39.806% である。この規模の津波が発生する確率は現在のところ極めて低いとされているが、仮に 30m 規模の津波が発生した際には甚大な被害が想定される。

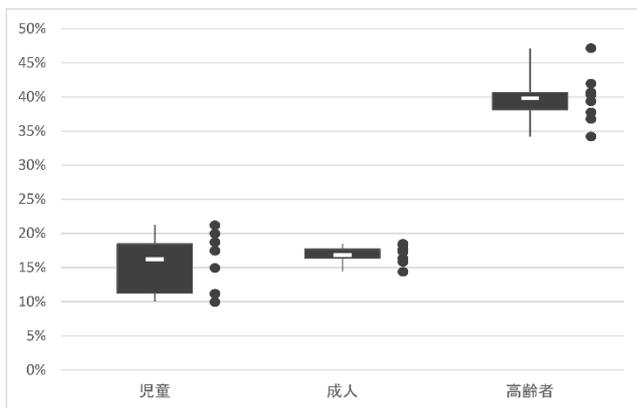


図 9 津波高さ 30m の場合における被災率

Figure 9 Damage Rate in Case of Tsunami Height 30m.

今回のシミュレーションによる避難行動の予測モデルでは、津波高さ 10m の場合でも相当の被害が出る事が分かった。標高が低い土地が市街地中心部までなだらかに連続する鎌倉市では、内陸部まで津波が浸水することが予想される。一方で、避難完了したエージェントは、市街地に位置する津波避難ビルに避難して被災を逃れたものも多くみられた。今後、市街地における津波避難ビルの指定とともに、避難者を適切に誘導するサインの必要性があると考えられる。特に避難先を知らないエージェントは、周囲に避難先を知っているエージェントがいない場合、その場に留まることとなり、被災するケースが多い。住民に対する避難先の周知とともに、観光地でもある鎌倉市においては、来街者に対する適切な防災サイン計画も考慮する必要

がある。

また、津波の動きを見てみると、河川を遡上する津波が内陸部まで早期に到達し、海からの津波と挟まれる道路があることが分かった (図 7)。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。



図 7 津波に挟まれる道路

Figure 7 Street that was Caught in the Tsunami

5. 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、計算量を軽量化し、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、住民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、津波高さ 10m であって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。

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。

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

- [1] 森信人, 千田優, 安田誠宏, 間瀬肇. 解適合格子法を用いた津波シミュレーションとメッシュ分割法について. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 2014, vol.70, no.2, p.286-290.
- [2] Tanabe, S. et al.. Numerical evaluation of tsunami impact force acted on a bridge girder during tsunami by using a particle method. In Joint 11th World Congress on Computational Mechanics, WCCM 2014, the 5th European Conference on Computational Mechanics, ECCM 2014 and the 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics, ECFD 2014. International Center for Numerical Methods in Engineering. 2014. p.4066-4076.
- [3] Murotani, K, et al.. Development of hierarchical domain decomposition explicit MPS method and application to large-scale tsunami analysis with floating objects. Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering, 2014, vol.1, no.1, p.16-35.
- [4] 齋藤崇, 鏡味洋史. 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: 奥尻島青苗地区を例として. 日本建築学会計画系論文集, 2005, vol.70, no.597, p.229-234.
- [5] 渡辺公次郎, 近藤光男. 津波防災まちづくり計画支援のための津波避難シミュレーションモデルの開発. 日本建築学会計画系論文集, 2009, vol.74, no.637, p.627-634.
- [6] 藤岡正樹, et al. 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, p.231-236.
- [7] “基盤地図情報ダウンロードサービス”.
<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>, (参照 2017-11-30).
- [8] “基盤地図情報ビューア”.
<https://fgd.gsi.go.jp/download/documents.html>, (参照 2017-11-30).
- [9] “QGIS Python Plugins Repository”.
<https://plugins.qgis.org/plugins/TileLayerPlugin/>, (参照 2017-12-06).
- [10] “QGIS Python Plugins Repository”.
<https://plugins.qgis.org/plugins/Qgis2threejs/>, (参照 2017-12-06).
- [11] “地図・空中写真閲覧サービス”.
<http://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1>, (参照 2017-12-05).
- [12] 岡本睦, 目黒公郎. 避難行動シミュレーションに基づく津波避難困難度マッピングシステムの開発. 生産研究, 2007, vol.59, no.3, p.295-298.
- [13] 源貴志, et al. 津波避難シミュレーションシステムの開発と地区の避難安全性評価への適用. 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 2009, vol.65, no.1, p.757-767.
- [14] 鎌倉市. 年齢 (各歳・5歳階級) 別, 男女別人口, 2017,
https://www.city.kamakura.kanagawa.jp/soumu/toukei/nenreibetu1_1/documents/nenreibetsu29.pdf, (参照 2017-12-20).
- [15] 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, 2013,
https://www.city.kamakura.kanagawa.jp/kamakura-kankou/documents/jisin_tsunami_guideline.pdf, (参照 2017-12-20).
- [16] 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 (平成 25 年 3 月改定) 材木座から稲村ガ崎, 2013,
<https://www.city.kamakura.kanagawa.jp/sougoubousai/documents/01tsunamih-m-yui-sakanosita.pdf>, (参照 2017-12-23).