

大規模エージェント群を用いた 津波災害時の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} 吉田周生^{†1} 大野つばさ^{†1}

概要: 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、対象地区を鎌倉市としたシミュレーションによる評価を行った。避難行動を行うエージェントを作成し、自律的に避難先を検索し定められた速度で避難行動させることで、避難場所の配置に関する現状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。津波については、傾斜平面挿入による表現を用いることで、リアルタイムでの検討と3次元でのビジュアライゼーションを可能とした。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する箇所が存在することが明らかとなった。

1. はじめに

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海水への衝撃波によって、津波が発生する。津波は、波の高さが低いものであっても非常に強い水の圧力を持ち、沿岸地域の広範囲にわたって大きな被害を与える[1]。これまでの津波シミュレーションでは、主として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、多くの研究がなされてきた[2-4]。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、津波ハザードマップなど、地域住民にとって身近な防災情報においては、地方自治体が主となり防災計画が立てられている。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が行われている。地方自治体では、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。鎌倉市では、東日本大震災以前と以後による津波浸水域データの大規模な更新のため、ハザードマップの再作成が行われた(図1)[5,6]。また、地方自治体レベルでは、これまでの津波シミュレーションシステムそのものの構築や運用が、コスト面から不可能であるため、市単位での詳細なシミュレーションを、避難者や避難場所の数や種類など、様々な条件で試行することが難しいものとなっている。

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、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。これまで本研究では、国土地理院のオープンデータを用いた津波避難行動の可視化に関する研究を行ってきた[7,8]。本稿では、避難行動のアルゴリズムを再検討し、1万体制の大規模エージェントによるシミュレーションシステムの開発と、同システムを用いたシミュレーション結果について報告する。

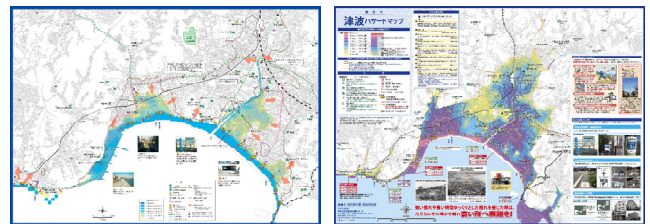


図1 鎌倉市における津波ハザードマップの推移
(左：平成21年作成，右：平成25年作成)

2. システムの開発

2.1 地理情報

本システムでは、地理情報を取得するため、国土地理院の基盤地図情報ダウンロードサービスを使用した[9]。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[10]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[11]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”[12]と、WebGLとthree.js JavaScriptライブラリを使用した3D視覚化プラグイン”Qgis2threejs”[13]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

^{†1} 文教大学
Bunkyo University

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[14]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 の統合環境である blender[15]上に読み込んだ。道路縁データは、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。建築物の外周線は、対象地域の都市計画地図の用途地域[16]を参照し、容積率から想定される建物高さを、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、これを統合開発環境であるゲームエンジン UNITY[17]に読み込み、種々のインタラクションを施すこととした。一連の開発の流れとデータフォーマットを以下に示す(図 2)。

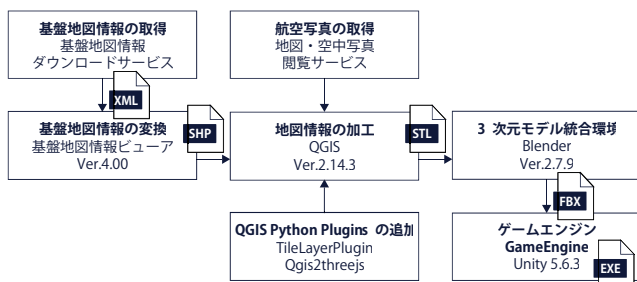


図 2 開発の流れとデータフォーマット

2.2 津波表現

内閣府、農林水産省、国土交通省によって作成された津波・高潮ハザードマップ[18]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ことが課題である。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 3 次元地形モデルに挿入するこ

とで、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。

2.3 避難行動エージェント

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、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、基本的に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、定められた速度で移動することとした。津波避難ビルには収容定員が設定されているため、避難したエージェントが到着した時に、津波避難ビルが収容定員を超えていた場合、そのエージェントは津波避難ビルには入れない。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。

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 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[19]。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(図 3)。

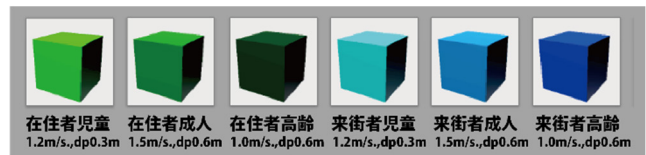


図 3 避難行動を行うエージェントの種類

本システムでは、シミュレーション開始後、設定画面(図 4)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(図 5)。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

に設定された夫々の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。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6）。

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。

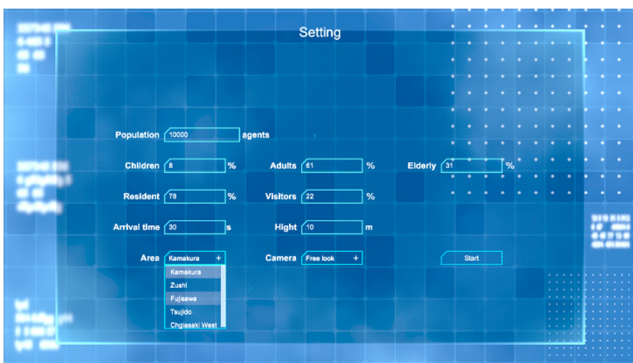


図4 各種条件の設定画面

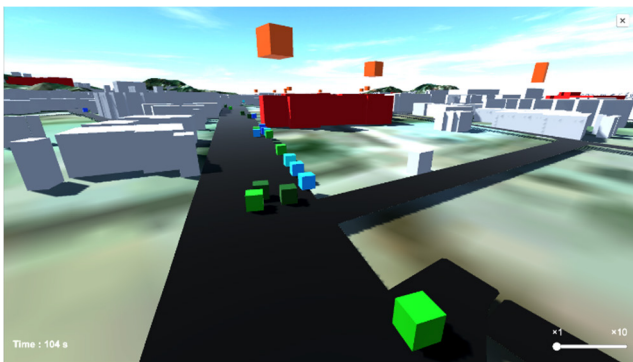


図5 避難行動を行うエージェント

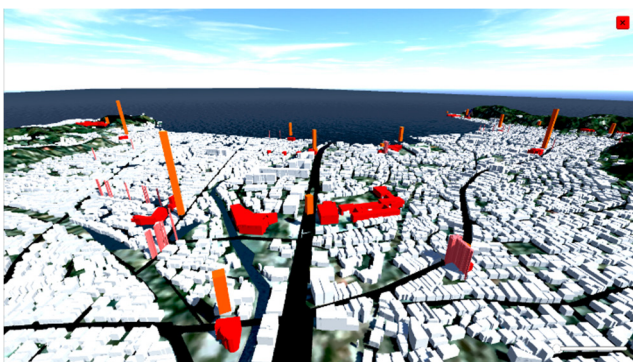


図6 津波避難ビル（赤）、収容者数（オレンジ）とエージェント被災箇所（ピンク）

3. システムによる評価

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、由比ガ浜に面する凡そ 2 km²の範囲とした。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、避難行動を行わせる。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[20]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、資料の入込観光客調査[21]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うこととした（図7）。

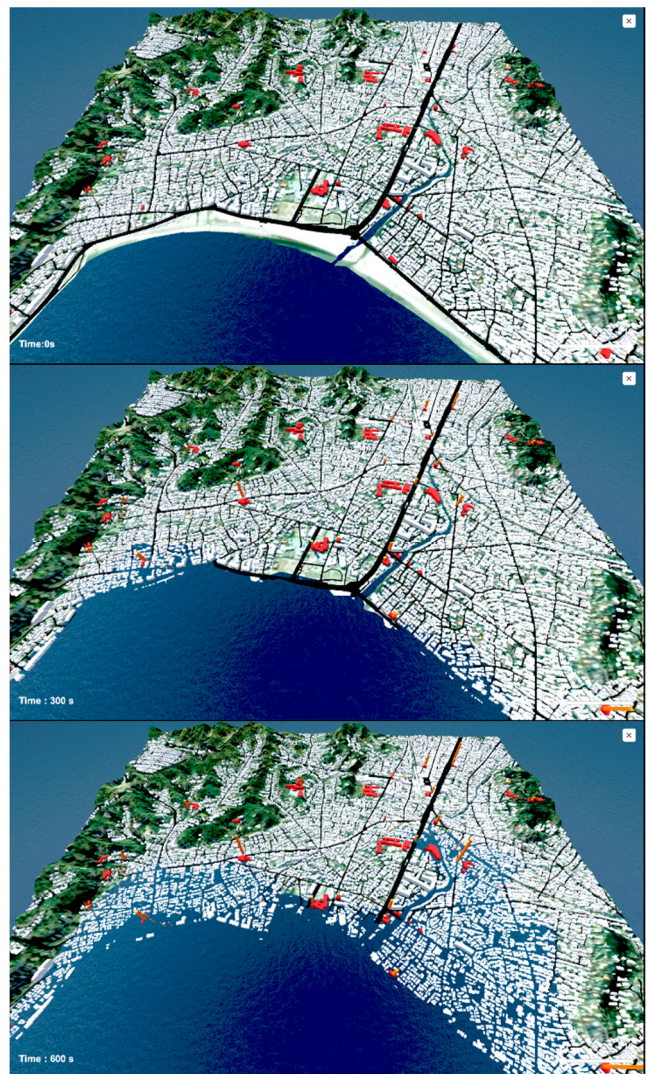


図7 鎌倉市における津波シミュレーション（上段から津波到達 0 秒、300 秒、600 秒後）

シミュレーションを津波高さごとに各 50 回試行し、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。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。いずれのケースにおいても、成人に比して、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 (図 8)。

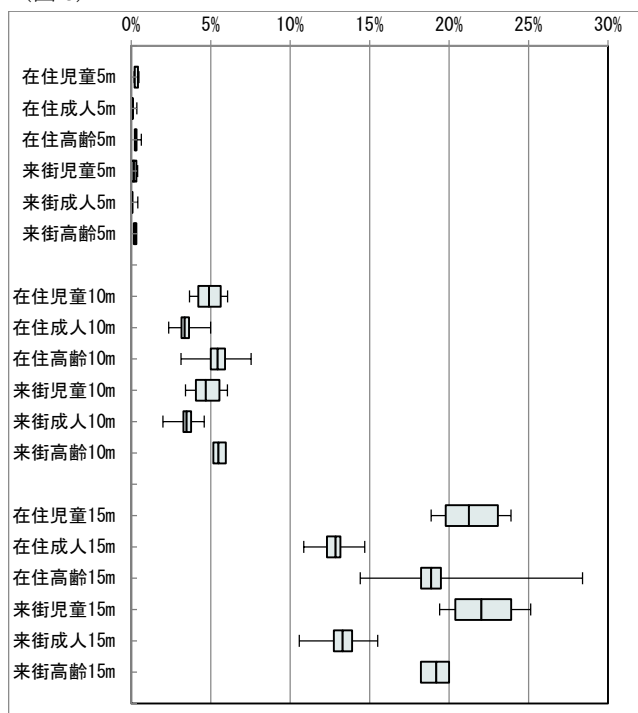


図 8 津波高さとエージェント属性別の被災率

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箇所が見られた。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[21]や風致地区[22]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。

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

- [1] 松富英夫, 首藤伸夫. 津波の浸水深, 流速と家屋被害. 海岸工学論文集, 1994, vol.41, p. 246-250.
- [2] 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. 地震研究所集報, 1977, vol.52, p.441-460.
- [3] 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, 1994, vol.14, no.52, p.2-6.
- [4] 小谷美佐, 今村文彦, 首藤伸夫. 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, 1998, vol.45, p.356-360.
- [5] “(参考) 鎌倉市津波ハザードマップ (平成 21 年 7 月作成) -材木座から稲村ガ崎”.
<https://www.city.kamakura.kanagawa.jp/sougoubousai/documents/kamakurabver4.pdf>, (参照 2018-12-16).
- [6] “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”.
<https://www.city.kamakura.kanagawa.jp/sougoubousai/documents/01tsunamih-m-yui-sakanosita.pdf> (参照 2018-12-16).
- [7] 川合康央, 海津ゆりえ, 河原健太, 大淵遥平, 大塚哲史, 富松栞里. 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. 情報処理学会インタラクシオン 2018 論文集, 2018, p.1099-1104.
- [8] Kawai, Y., Kaizu, Y., Yoshida, S. Visualization system for tsunami evacuation behavior. In SIGGRAPH Asia 2018 Posters, 2018, 2p.
- [9] “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 2018-12-16).
- [10] “基盤地図情報ビューア”.
<https://fgd.gsi.go.jp/otherdata/tool/FGDV.zip>, (参照 2018-12-16).
- [11] “QGIS”. <https://www.qgis.org/>, (参照 2018-12-16).
- [12] “TileLayer Plugin - QGIS Python Plugins Repository”.
<https://plugins.qgis.org/plugins/TileLayerPlugin/>, (参照 2018-12-16).
- [13] “Qgis2threejs - QGIS Python Plugins Repository”.
<https://plugins.qgis.org/plugins/Qgis2threejs/>, (参照 2018-12-16).
- [14] “地図・空中写真サービス”.
<https://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1>, (参照 2018-12-16).
- [15] “blender”. <https://www.blender.org/>, (参照 2018-12-16).
- [16] “鎌倉市都市計画情報等提供サービス (WebMap 版)”.
https://www.city.kamakura.kanagawa.jp/plan/service_ver2_0100.html, (参照 2018-12-16).
- [17] “Unity” <https://unity3d.com/>, (参照 2018-12-16).
- [18] 内閣府 (地震・火山対策担当), 他. 津波・高潮ハザードマップマニュアル, 2004
- [19] 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.
- [20] “第 1 表 年齢(各歳・5 歳階級)別, 男女別人口(平成 30 年)”.
https://www.city.kamakura.kanagawa.jp/soumu/toukei/nenreibetu1_1/documents/5saikaikyuu.pdf, (参照 2018-12-18).
- [21] “鎌倉市観光客等地震・津波対策ガイドライン”.
https://www.city.kamakura.kanagawa.jp/kamakura-kankou/documents/jisin_tsunami_guideline.pdf, (参照 2018-12-18).
- [22] “鎌倉市景観計画について”.
<https://www.city.kamakura.kanagawa.jp/keikan/keikaku.html>, (参照 2018-12-18).
- [23] “鎌倉市風致地区条例”.
<https://www.city.kamakura.kanagawa.jp/fuuchi/huutitiku.html>, (参照 2018-12-18).