

浜松市を対象とした津波避難シミュレーションシステム

立木晴^{†1} 副田翔流^{†1} 芝敏和^{†1} 北山琉貴^{†1} 川合康央^{†1}

概要：本研究では、浜松市舞阪町を対象に、高精度 3D 都市モデル「PLATEAU」とリアルタイム流体シミュレーションプラグイン「FLOW」、さらに A* Pathfinding Project Pro を統合し、津波避難シミュレーションを構築した。津波高条件ごとにエージェントの避難行動と被災率を分析し、新規避難所設置の効果も検討した。本研究の成果は、現実的な防災対策策定や避難誘導戦略に資することが期待される。

1. はじめに

日本は地震多発地帯であり、歴史的に巨大地震や津波による甚大な被害を受けてきた。2011 年の東日本大震災を契機に、国内外で津波リスクへの関心が高まり、各自治体では避難計画策定や防潮堤整備などの防災対策が進展している[1]。加えて、近年懸念される南海トラフ巨大地震では、広域的な強震や大津波が想定されており[2]、これらを踏まえたより高度な防災計画が求められている。

従来の津波シミュレーション研究では、簡略化された地形モデルや静的な水位上昇モデルが一般的であった。しかし、近年は 3D 都市モデルの高度化とリアルタイム流体計算技術の発展により、実環境に近い津波伝播・浸水過程の再現が可能となり、人的行動を考慮した避難シミュレーションも実施できるようになってきている。

本研究は、国土交通省が推進するオープンデータプロジェクト「PLATEAU」[3] から取得した精密な 3D 都市モデルをベースに、Unity 上で動作する FLOW プラグイン[4] を用いて動的な津波挙動を再現するとともに、A* Pathfinding Project Pro[5] によるエージェントモデルを適用して、より現実的な津波避難シミュレーションを構築する。対象地区として浜松市沿岸部を選定し、津波発生時の人間行動や被災率を定量的かつ定性的に分析することで、地域特性を踏まえた防災計画やインフラ整備、避難誘導戦略への有用な知見の提供を目的とする。

2. 先行研究

2.1 災害避難シミュレーションにおける従来の取り組み

津波シミュレーションの研究分野は、地形や水理モデルを中心とするアプローチと、人的行動に焦点を当てた避難シミュレーションに大きく分かれてきた。前者は、津波の伝播や浸水範囲を把握することを主な目的とするため、地形の簡略化や静的な水位上昇モデルを用いたシミュレーション手法が一般的であった。一方、後者では、避難者の歩行速度や経路選択をモデル化し、被災リスクを定量化する研究へと発展している。

近年は 3D 都市モデルやリアルタイム流体計算技術の高度化に伴い、実環境に近い津波挙動を再現できるようになったほか、人的行動をより精密にシミュレートする取り組みも進展している。しかし、避難者同士の情報伝達やリアルタイムに変化する災害状況への適応行動などをどのように組み込むかについては、なお十分に解決されていない課題として指摘されている。

2.2 避難者間の情報伝達行動に関する研究

災害時の避難行動は、地形や交通インフラなどの物理的要因だけでなく、避難者同士のコミュニケーションや行政からの広報手段、SNS をはじめとする情報の伝播形態によっても大きく左右されると考えられている。松島ら(2015)は、地震や津波の避難行動シミュレーションにおいて、避難者間の情報伝達行動が十分に考慮されていない事例が多いことを指摘している。地震を対象としたシミュレーションでは、拡声器を用いた誘導員や防災行政無線などの要素を導入することが技術的に困難であり、津波避難を扱う研究においても、情報共有や避難所の受け入れ状況をリアルタイムに反映させるモデルはまだ限られているという。

こうした課題に対処するため、松島らは音声による避難者間の情報伝達をシミュレーションに導入するアプローチを提案している[6]。この方法を用いることで、防災行政無線の設置場所や災害発生後に刻々と変化する状況を考慮した避難行動をより現実的に再現できると報告している。

2.3 本研究の位置づけ

本研究では、上述の先行研究を踏まえ、物理的な津波挙動の高精度な再現と、避難者間の情報伝達要素を組み合わせた統合的な津波避難シミュレーションモデルを構築することを目的としている。具体的には、3D 都市モデルによる地形・建造物の詳細な再現や、リアルタイム流体計算プラグインを活用した津波伝播の動的表現に加え、エージェントベースモデルを用いた避難者の行動・情報共有プロセスを導入する。これにより、津波被害を受けやすい沿岸地域における避難行動を定量的かつ定性的に分析し、地域特性や既存の防災インフラ整備を踏まえた効果的な避難誘導戦

^{†1} 文教大学

略を検討するための基盤を提供することを目指す。

3. 研究方法

3.1 地理情報モデル

研究では、国土交通省による 3D 都市モデル整備・活用・オープンデータ化プロジェクト「PLATEAU」[3]を用いた。PLATEAU は詳細な建築物モデルや道路情報を含む高精度な 3D 都市データを提供し、実環境に近い市街地空間を再現できる。本研究では浜松市舞阪町のモデルを取得し、Unity 上にインポートしてシミュレーション環境を構築した。

3.1.1 PLATEAU の詳細

PLATEAU は、日本全国の 3D 都市モデルを整備し、オープンデータとして提供することで、防災、都市計画、観光など幅広い分野での活用を目指す国土交通省のプロジェクトである。PLATEAU のデータは、建物や道路だけでなく、地下構造や緑地、橋梁といった都市要素をも含む。これらは CityGML 形式の国際標準規格で公開され、GIS ソフトウェアやゲームエンジンなど多様なツールでの活用が可能である。また、データは Level of Detail (LoD) の概念に基づいており、利用用途に応じた詳細度を選択可能である。本研究では、LoD2 の建物モデルと LoD3 の地形モデルを用い、実空間の再現精度を向上させた。

3.2 津波挙動表現

津波挙動は Unity 向けリアルタイム流体シミュレーションプラグイン「FLOW」[4]を用いて再現した。FLOW は GPU を活用した高速な流体演算を可能とし、水面変動や流速分布を動的に表現できる。従来の静的な水位上昇モデルと異なり、FLOW を用いることで津波の伝播、建物衝突、内陸浸水過程を時空間的に再現できる。本研究では格子法を用いたシミュレーション手法を採用し、計算コストと精度のバランスを確保した。津波の設定は津波の高さ、津波が発生するまでにかかる時間、津波の速度、津波が発生し続ける時間を可変的なものとした(図 1)。



図 1 津波の設定画面

3.3 対象地区

対象地区は静岡県浜松市舞阪町である(図 2)。この地域は浜名湖と遠州灘に接する沿岸部であり、海拔が低く津波被害リスクが高い。また、南海トラフ巨大地震による津波被害想定があり、住民の迅速な避難行動が生存率を左右する。近年、全長約 17.5km の防潮堤整備や防潮林を活用した多重防御策が実施されている[7, 8]。こうした要因は、防災インフラの津波被害軽減効果を定量的に評価するための格好のフィールドとなる。また、PLATEAU による高精度な 3D 都市モデルの公開が、現実的なシミュレーション環境構築を可能にしている。本研究では、これらの特性を活用して舞阪町における津波避難行動を詳細にシミュレートし、現行の防災対策や誘導計画に対する有効性を検証することを目指す。

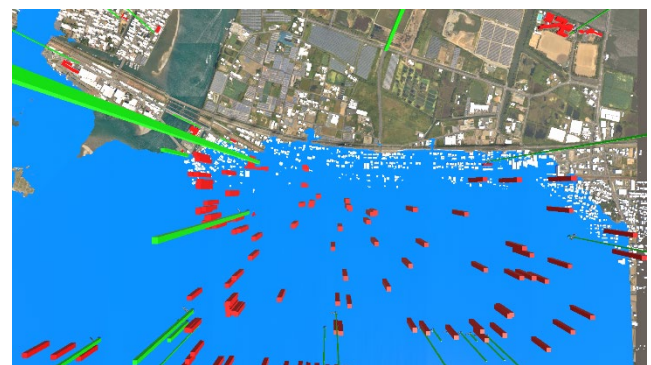
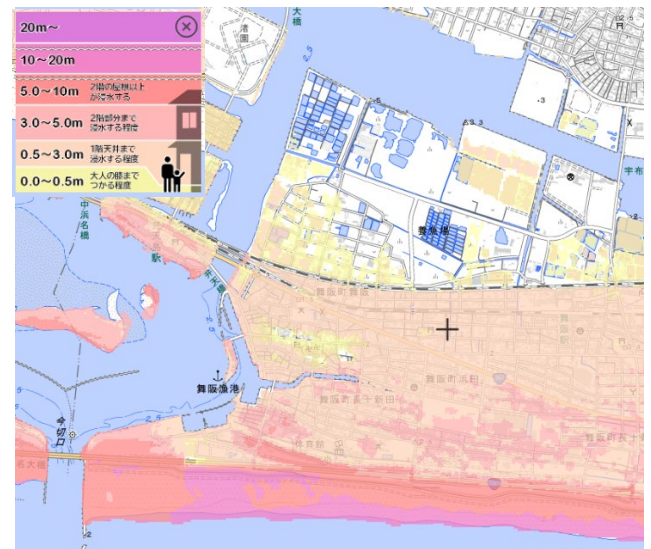


図 2 浜松市舞阪町の俯瞰視点
(上：重ねるハザードマップ，下：本システム)

3.4 エージェントモデルと避難行動

本研究では、津波避難シミュレーションにおいてエージェントベースモデルを用いて人間行動を再現する。エージェントは、生理的特性や情報状態に応じて避難所探索や情報共有、経路再計算などを行う。

3.4.1 エージェントの基本設定

エージェントは「高齢者」「成人」「児童」の3種類に分類し、歩行速度・走行速度・最大スタミナ・スタミナ減少率・回復率などのパラメータを種別ごとに設定する(図3)。これらの値は実際の人口特性や既存研究[9-12]を参考にし、個体差を示すため乱数的ばらつきを付与している。エージェントは初期状態で避難所情報を知っている場合と知らない場合があり、これが行動方針に影響する。パラメータ管理は AgentManager クラスが担当し、NativeArray による並列処理で大規模なエージェント数にも対応可能としている。



図 3 エージェントのパラメータ設定画面

3.4.2 動的なスタミナと移動速度

エージェントはスタミナ管理によって移動速度を動的に変化させる。スタミナが最大近くまで回復すると走行モードへ移行し、枯渇すると歩行モードに戻る。これにより、一定速度ではなく、状況に応じた速度変化が再現される。スタミナ値更新には UpdateStaminaJob を用いた並列処理を導入し、大量のエージェントが同時に存在する場合でも計算負荷を抑えられる。

3.4.3 避難所探索と再探索

エージェントは A* Pathfinding Project Pro を用いて動的な経路探索を行い、避難所へ移動する。避難所が満員の場合、その避難所を「満員リスト」に登録し、別の避難所を再探索するか、すべての避難所が不可能な場合は内陸方向へ移動する。エージェントは一定距離ごとに経路再計算を要求し、環境変化(避難所満員化)に即応することで、実際の災害発生時における流動的な避難状況を模擬する。

3.4.4 情報共有と協調行動

エージェント間で満員避難所情報を共有することで、群全体が非効率な経路選択を回避できる。情報を持たないエージェントは、情報を持つエージェントに追従し、間接的に有用な知識を活用する。これによりエージェント集団は時間経過とともに知識を共有・蓄積し、より合理的な避難行動が可能となる。

3.4.5 被災者・救助判定

エージェントが避難所または SafeZone に到達した場合は「救助状態」となり、シミュレーションから除外する。一方、浸水域に留まり続けるなど避難に失敗したエージェントは「被災状態」となり、同様に除外する。これらの状態遷移により、時間経過に伴うエージェント数や分布の変化、被災規模や避難成功率を時系列的に評価できる。

3.4.6 計算負荷分散

大量のエージェントから同時に経路再計算要求があると計算負荷が増大する。本研究ではパス計算要求をキューで管理し、Coroutine 処理で逐次計算を行うことでフレーム単位での負荷を平準化した。これによりリアルタイム性を維持しつつ多エージェントの取り扱いを可能としている。

表 1 エージェント特性パラメータ

種類	歩行速度 (m/s)	疾走速度 (m/s)	回復率 (スタミ ナ/秒)	減少率 (スタミ ナ/秒)
高齢者	1.0	2.0	0.5	1.0
成人	1.5	3.0	1.0	1.5
児童	1.2	2.5	0.8	1.2

3.4.7 A* Pathfinding Project Pro の詳細

本研究では、A* Pathfinding Project Pro[5] を使用して、避難所へ向かうエージェントの経路探索を実装した。APP は Aron Granberg が開発した Unity 向け経路探索ライブラリであり、A*アルゴリズムを基盤とした効率的な経路探索を提供する。

(1) グラフ構造

APP では、グリッドグラフ、ナビメッシュ、ポイントグラフなどの複数のグラフ構造を利用できる。本研究では、浜松市の市街地モデル上での通行可能領域(道路や歩道)の指定が容易であることから、グリッドグラフを採用した。進入不可エリアを再現するため、コライダーのみのオブジェクトと建物に障害物レイヤーを設定し、建物と川や海を障害物として登録した。これにより、エージェントが進入できないエリアを明確に区別する仕組みを構築した。

(2) 動的障害物と浸水エリア

本研究では、津波の浸水エリアを APP に伝達する機能や建物崩壊のシナリオは実装していない。したがって、動的な障害物は扱わず、あらかじめ定義された固定的な障害物(建物、防潮堤)を利用して経路探索を行った。この選択により、災害シナリオ全体のシンプルなモデリングを維持しつつ、初期段階の避難シミュレーションを実現した。

(3) リアルタイムの経路再計算

APP ではコルーチンを用いて非同期的に経路探索を実行可能であり、本研究ではエージェントが避難所満員などの状況変化に応じて動的に経路を再計算する仕組みを実装した(図4)。大量のエージェントが存在する状況でも負荷を抑えるため、再計算要求をキューで管理し、フレーム単位で逐次処理を行う設計を採用した。

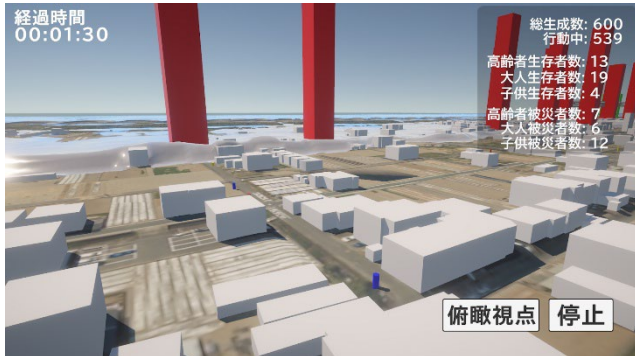


図 4 津波から避難するエージェント

4. 結果

本研究では、異なる津波高条件(13m, 15m, 17m)下でエージェントの被災者数および浸水域を比較した。試行回数は各条件において限定的であり、16回とした。計算環境はXeon Silver 4210(2.20GHz)×2、メモリ 32GB を搭載したデスクトップ PC である。エージェント数は児童 250 人、成人 1600 人、高齢者 900 人の計 2750 人で、この 2750 人は舞阪町の総人口約 10,968 人の約 25% (約 2,742 人) に近い規模に相当する。3000 人以上のエージェント生成時にはシミュレーションが著しく重くなり、2750 人程度が実用的な上限と判断した。

南海トラフ巨大地震による津波は、発生から約 18 分後に海岸へ到達することが想定されている。また、平均的な地震の揺れ時間を約 3 分、避難開始までに約 5 分を要すると考え、本研究ではシミュレーション開始から 10 分後に津波が到達する条件を設定した。なお、現段階では各条件下での試行回数は 16 回であり、結果のばらつき評価には今後さらなる反復実験が必要となる。

津波高 13m の条件における被災者数の平均値は、児童約 18.0 人(被災率約 7.2%)、成人約 105.4 人(約 6.6%)、高齢者約 74.2 人(約 8.2%)となった。高齢者の被災率が特に高く、エージェント特性(歩行速度・スタミナ)による避難能力差が反映されていると考えられる。

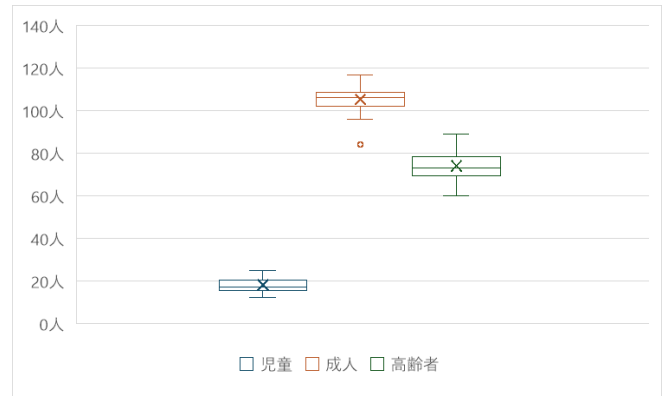


図 5 津波高 13m の場合における被災者数

津波高 15m の条件における被災者数の平均値は、児童約 18.3 人(約 7.3%)、成人約 112.6 人(約 7.0%)、高齢者約 83.0 人(約 9.2%)であり、13m 条件より被災率は全般的に上昇した。このことから、津波高の増加が避難困難性を高め、全エージェント層で被災リスクを引き上げる傾向が示唆された。

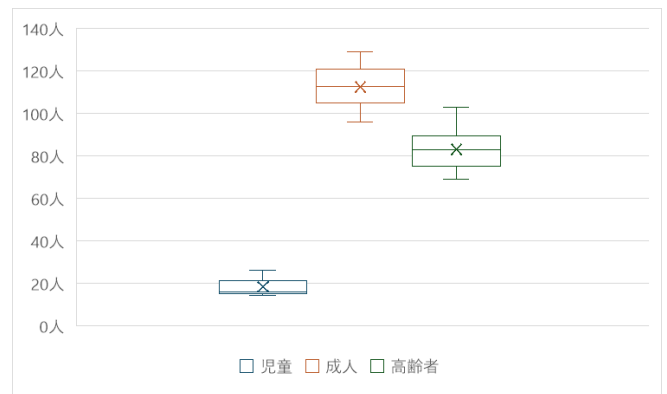


図 6 津波高 15m の場合における被災者数

津波高 17m の条件における被災者数の平均値は、児童約 21.4 人(約 8.6%)、成人約 118.6 人(約 7.4%)、高齢者約 83.6 人(約 9.3%)で、津波高がさらに上昇すると被災率が一段と増大することが確認された。

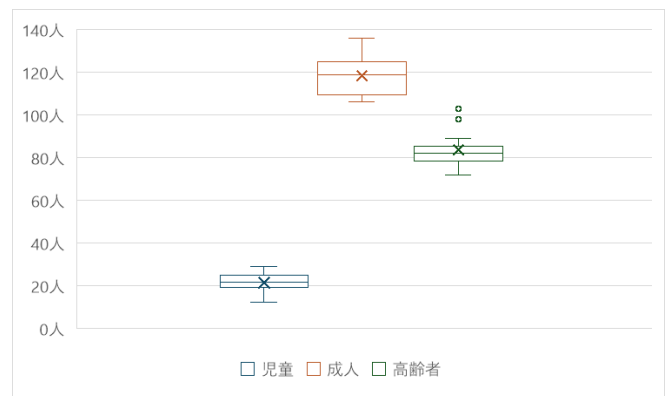


図 7 津波高 17m の場合における被災者数

次に、上記のシミュレーション結果から、被災者が多い地域に新規避難所を設置し、再度シミュレーションを行った。今回のシミュレーションでは、被災者が密集していた舞阪町舞阪 4603 の国道 1 号線沿い付近に新規避難所を設置した（図 8）。



図 8 新規避難所の位置

津波高 13m の場合、エージェントの被災者数は平均的に児童 13.7 人、成人 84.9 人、高齢者 62.3 人という結果が得られた。被災率で表すと児童 5.5%、成人 5.3%、高齢者 6.9% と、新規避難所の設置により 2～3%の被災率の減少していることがわかる。

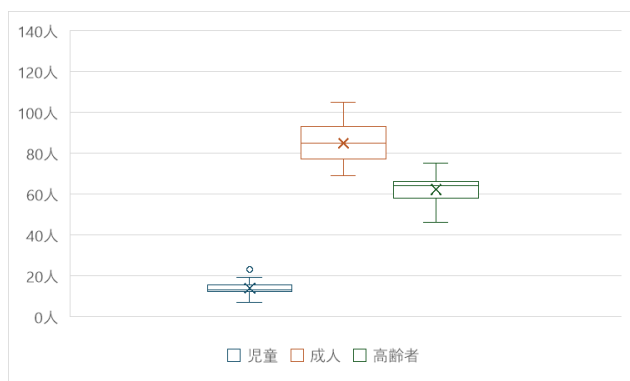


図 9 津波高 13m, 新規避難所を設置した場合における被災者数

次に、津波高 15m の場合、エージェントの被災者数は平均的に児童 17.8 人、成人 97.3 人、高齢者 67.2 人という結果が得られた。被災率で表すと児童 7.1%、成人 6.1%、高齢者 7.5%と、1～2%の被災率の減少が見られ、津波高 13m と比べ、被災者削減効果が薄いと考ええる。

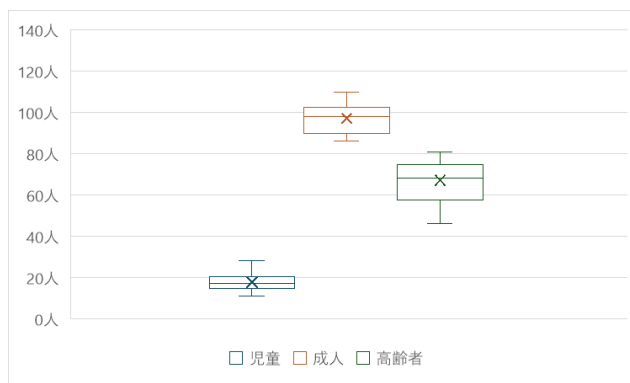


図 10 津波高 15m, 新規避難所を設置した場合における被災者数

最後に、津波高 17m の場合、エージェントの被災者数は平均的に児童 17.1 人、成人 95.8 人、高齢者 67.0 人という結果が得られた。被災率で表すと児童 6.8%、成人 6.0%、高齢者 7.4%と、津波高 15m と比べ被災率が減少するという結果が得られた。本来、津波高が高くなると被災率が大きくなるはずだが、うまくいかなかった。試行回数が少ないことが理由として考えられる。

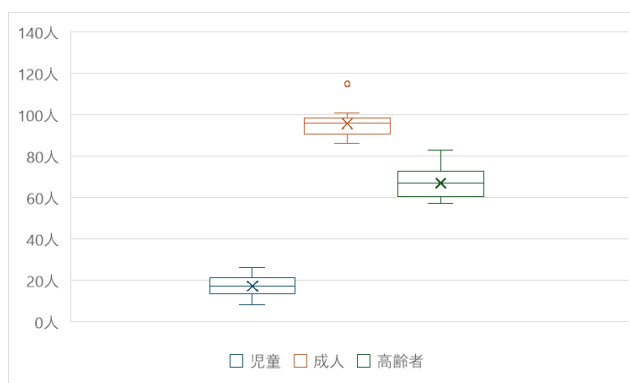


図 11 津波高 17m, 新規避難所を設置した場合における被災者数

以上のシミュレーションの結果から、津波高が上昇するほど被災率が増加し、特性が脆弱なエージェント（高齢者など）ほど被災リスクが高いことが分かった。また、被災者が多い地域を視覚的に割り出し、新規避難所を設置することで被災者数を減少させる効果が確認された。しかし、避難所を海岸付近に設置した場合、内陸側の避難状況が変わらないため、津波高が極めて高いシナリオでは被災者削減効果が限定的になる場合があることが明らかになった。これらの結果を踏まえ、避難所配置戦略や避難経路特性の見直し、さらには試行回数の増加を含む検証を進めることが、被災リスク低減のための手法の最適化に不可欠であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、PLATEAU による高精度 3D 都市モデル、Unity 上で動作するリアルタイム流体シミュレーションプラグイン「FLOW」、および A* Pathfinding Project Pro によるエージェントベースモデルを統合し、浜松市沿岸部を対象とした津波避難シミュレーションを試作した。これにより、津波襲来時の現実に近い水理挙動と人間行動を再現し、人的被害分布や避難成功率に関する知見を得るための基盤が構築できた。

今後の課題としては、エージェント処理のさらなる効率化や、実データに基づくパラメータ最適化、車両エージェントや都市空間構成要素（建物崩壊、漂流物）の導入による避難路障害の検証などが挙げられる。引き続き現実的な災害状況を再現し、地方自治体の防災計画策定に資するシミュレーションデータの拡充を目指す。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP23K11728 及び文教大学情報学部共同研究費の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 佐野浩彬, 岩井優祈. 東日本大震災以降の地方自治体における津波対策防災の動向, 地理空間, 2022, vol. 15, no. 1, p. 65-78.
- [2] 国土交通省気象庁. “南海トラフ地震で想定される震度や津波の高さ”
<https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/nteq/assumption.html>, (参照日: 2024 年 12 月 17 日).
- [3] 国土交通省. “PLATEAU 公式サイト”:
<https://www.mlit.go.jp/plateau/>, (参照日: 2024 年 12 月 17 日).
- [4] “FLOW 公式ドキュメント”.
<https://carloswilkes.com/Documentation/Flow#Buoyancy>, (参照日: 2024 年 12 月 17 日).
- [5] “A* Pathfinding Project Pro 公式サイト”.
<https://arongranberg.com/astar/>, (参照日: 2024 年 12 月 17 日).
- [6] 松島弘, 狩野均. 避難者の情報伝達を考慮した地震・津波避難シミュレーションのためのマルチエージェントモデル. 研究報告数理モデル化と問題解決 (MPS), 2015, vol.2015, no. 4, pp.1-6.
- [7] “静岡県 浜松市沿岸域 津波対策事業”.
<https://www.pref.shizuoka.jp/machizukuri/dobokujimusho/hamamatsudoboku/1004267/index.html>, (参照日: 2024 年 12 月 17 日).
- [8] “静岡県 「みどりの防潮堤」づくり”.
<https://www.pref.shizuoka.jp/machizukuri/dobokujimusho/hamamatsudoboku/1004267/1047557/1034616.html>, (参照日: 2024 年 12 月 17 日).
- [9] 内閣府防災情報, “防災対策推進検討会議 津波避難対策検討ワーキンググループ 第 6 回会合: 自動車で安全かつ確実に避難できる方策 (補足資料)”, 2012,
<https://www.bousai.go.jp/jishin/tsunami/hinan/6/pdf/2.pdf>, (参照日: 2024 年 12 月 17 日).
- [10] 村田伸, 大田尾浩, 村田潤, 堀江淳, 八木原幸子, 甲斐健一郎, 大塚真. 虚弱高齢者における Timed Up and Go Test, 歩行速度, 下肢機能との関連, 理学療法科学, 2010, vol. 25, no. 4,

p. 513-516,

- [11] 内閣府防災情報, “巻末資料 5 避難シミュレーションについて”,
https://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/nihonkaiko_chisimajishin/pdf/kanmatsu5.pdf, (参照日: 2024 年 12 月 17 日).
- [12] “中区版避難行動計画”:
<https://www.city.hamamatsu.shizuoka.jp/documents/4353/nakakusyousai.pdf> (参照日: 2024 年 12 月 17 日).