

# リアルタイム流体シミュレーションとエージェントモデルを 統合した津波避難シミュレーション

立木晴<sup>†1</sup> 副田翔流<sup>†1</sup> 芝敏和<sup>†1</sup> 北山琉貴<sup>†1</sup> 川合康央<sup>†1</sup>

**概要:** 本研究では、神奈川県鎌倉市を対象に、高精度 3D 都市モデル PLATEAU をベースに、リアルタイム流体シミュレーションと避難エージェントモデルを統合した津波避難シミュレーションを構築した。津波高の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を検証した。さらに、VR を用いた一人称視点の体験型シミュレーションを導入し、津波が実在する都市にリアルタイムに迫る状況を直感的に理解できる環境を実現した。

## 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[4]。加えて、近年懸念される南海トラフ巨大地震や相模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[5][6]、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」[1]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[2]を用いて動的な津波挙動を再現するとともに、A\* Pathfinding Project Pro[3]によるエージェントモデルを適用し、より現実を反映した津波避難シミュレーションを構築する。対象地区として鎌倉を選定し、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。

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。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

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」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。本研究では神奈川県鎌倉市のモデルを取得し、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(プラトー)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LoD1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」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を可変とした(図1)。



図1 津波の設定画面

#### 3.3 対象地区

対象地区は神奈川県鎌倉市の沿岸部である(図2)。この地域は相模湾に面した沿岸部を有し、歴史的な観光地として知られる一方、低地部における津波被害リスクも抱えている。鎌倉市では南海トラフ巨大地震による直接的な津波被害想定は限定的であるが、相模トラフを震源とする地震の発生が想定されており、その被害は甚大なものになる可能性があること懸念されている[7]。特に、急峻な地形と海岸近接の市街地構造が、住民の迅速な避難行動を困難にする要因となりうる。さらに、鎌倉市は年間を通じて観光客が非常に多く訪れる地域であり、津波発生時には住民に加えて観光客の避難も想定しなければならない。特にゴールデンウィーク(GW)などの連休中、午前から昼過ぎにか

けては観光客が最も多く集まる時間帯であり、人的被害のリスクが一層高まることが予想される。このように、一時的に滞在する人々を含めた避難計画の検討が不可欠である。

近年、津波避難施設の整備や海拔表示の充実など、地域に応じた防災対策[12]が進められている。こうした特性は、津波災害時における防災インフラの有効性を定量的に評価するフィールドとして適している。さらに、PLATEAUによる高精度な3D都市モデルの公開が、地形・建物配置を忠実に再現したシミュレーション環境の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、鎌倉市における津波避難行動を詳細にシミュレートすることで、現行の防災対策や避難誘導計画の有効性を検証することを目的とする。

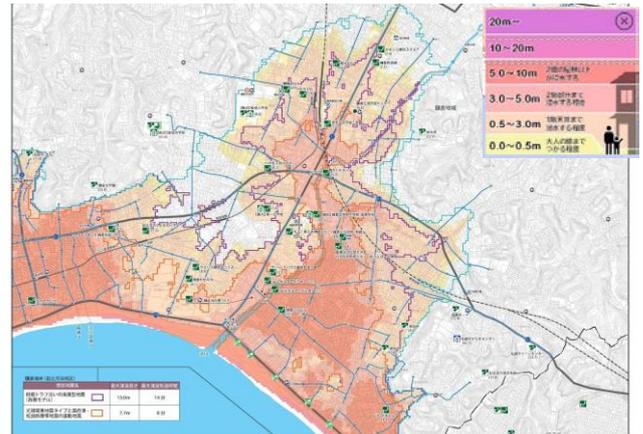


図2 鎌倉市の俯瞰視点  
(上: 鎌倉市津波ハザードマップ, 下: 本システム)

#### 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[8][9][10][11]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<br>(m/s) | 疾走速度<br>(m/s) | 回復率<br>(スタミ<br>ナ/秒) | 減少率<br>(スタミ<br>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 (以下、APP) 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 氏が開発した 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。

### 3.4.8 VR の詳細

本 VR 機能では、ユーザがシミュレーション空間内に一人称視点として配置され、津波襲来時の市街地環境を仮想的に体験することが可能である。VR 空間内では、FLOW によって計算された津波の流れや水位上昇がリアルタイムに反映され、建物や道路といった都市構造との相互作用を含む津波挙動を体感的に把握できる。これにより、俯瞰的な可視化だけでは把握しにくい、避難時の視認性の低下や空間的制約、心理的な圧迫感などを理解することが可能となる。

#### (1) グラフ構造

APP には GridGraph, RecastGraph, PointGraph など複数のグラフ構造が用意されている。本研究では、PLATEAU で取得した鎌倉市 3D 都市モデル上に広域かつ連続的な歩行可能面を自動生成できる RecastGraph を採用した。RecastGraph はシーン内ジオメトリからナビメッシュ

(NavMesh) を動的に構築するため、グリッド幅やセル分解能を手動で調整する必要がなく、複雑な道路網や起伏のある地形に対しても高い汎用性を持つ。

通行不可領域の定義には、APP の Geometry Tag と Navmesh Cut 機能を利用し、建物コライダーや河川・海面を障害物としてナビメッシュから切り抜いた。これにより、エージェントは建物内部や浸水域に進入せず、実際の都市構造を反映した経路探索が可能となった。

#### (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 ではコー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。

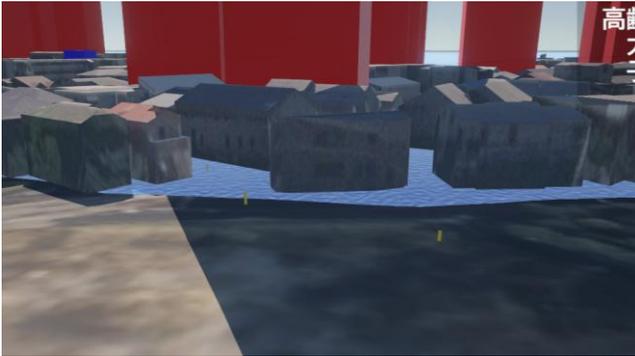


図4 津波から避難するエージェント

#### 4. 結果

本研究では、異なる津波高条件(10m, 13m)とそれぞれに新規避難所の追加した条件下でエージェントの被災者数を比較した。試行回数は各条件60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200人, 成人1000人, 高齢者500人の計1700人で, 2000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, 1700人程度が実用的な上限と判断した。

相模トラフ巨大地震による津波は、発生から最速で約14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1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8分後に津波が到達する条件を設定した。

津波高10mの条件における被災者数の平均値は、児童約86.1人(約41.1%)、成人約394.2人(約39.4%)、高齢者約232.7人(約46.5%)であった。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。

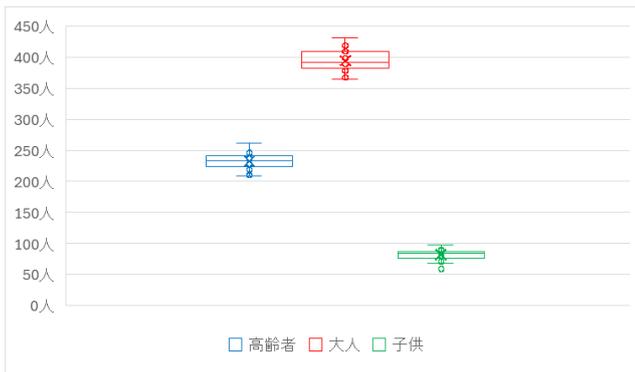


図5 津波高10mの場合における被災者数

津波高13mの条件における被災者数の平均値は、児童約89.6人(被災率約44.8%)、成人約428.0人(約42.8%)、高齢者約250.6人(約50.1%)であり、10m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。

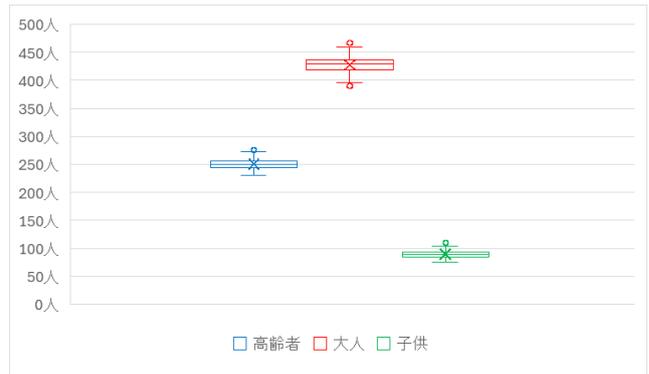


図6 津波高13mの場合における被災者数

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鎌倉市材木座西部付近に新規避難所を設置した(図7)。

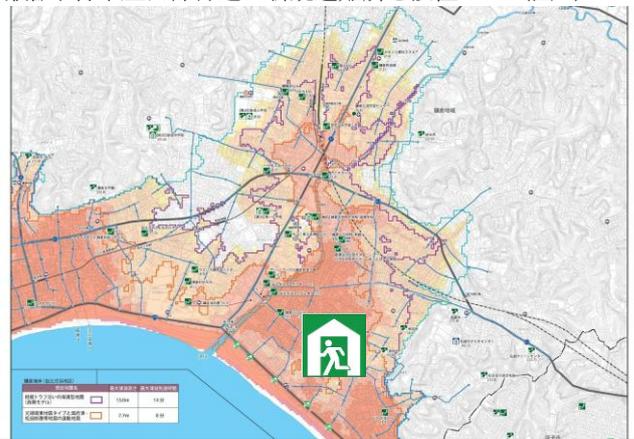


図7 新規避難所の位置

津波高10mの場合、エージェントの被災者数は平均的に児童86.6人、成人409.2人、高齢者226.5人という結果が得られた。被災率で表すと児童43.3%、成人40.9%、高齢者45.3%と、新規避難所の設置により2~3%の被災率減少が見られた。

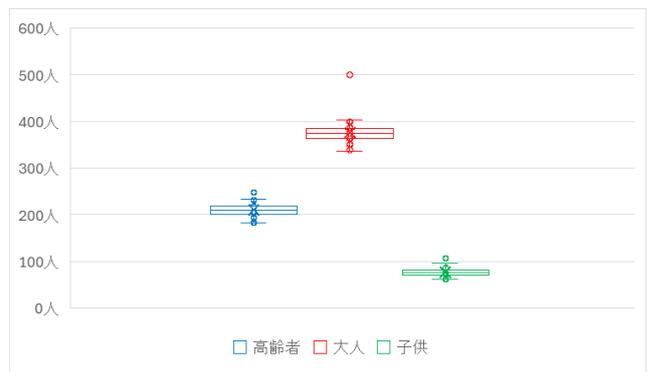


図8 津波高10m, 新規避難所を設置した場合における被災者数

次に、津波高13mの場合、エージェントの被災者数は平均的に児童76.8人、成人375.5人、高齢者211.1人という結果が得られた。被災率で表すと児童38.4%、成人37.4%、高齢者42.2%と、1~2%の被災率の減少が見られるが、新規避難所なしの津波高13mと比べ、被災者削減効果が限定的であると考えられる。

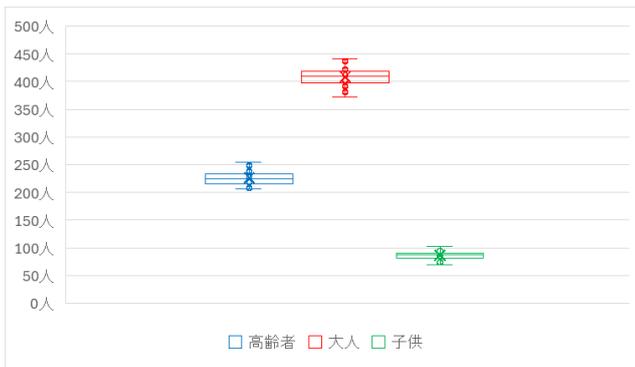


図 9 津波高 13m, 新規避難所を設置した場合における被災者数

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。

鎌倉市では、観光客の来訪数が 5～8 月および 12～1 月にかけて大きく増加する傾向にある。このような季節的な人口変動を考慮することは、災害時の被災リスクをより現実的に評価するうえで重要である。

本研究では、津波高 10m・13m における現状と新規避難所設置を想定した 4 つのシミュレーションを行い、その平均的な被災率をもとに、鎌倉市における被災人数の推定を行った。4 つのシナリオの平均被災率は、高齢者 46.025%、大人 40.175%、児童 41.9% となった。鎌倉市の人口構成比を児童：大人：高齢者 = 1：5：2.5 と仮定し、これに基づいて観光客を含む浸水予測地域の滞在人口を 10 万人と想定した場合、それぞれの被災人数は、児童：約 4930 人、大人：約 23640 人、高齢者：約 13530 人と推定される。

この結果から、津波高が上昇するほど全体の被災率が増加し、特に高齢者のような特性が脆弱な層は被災リスクが高いことが明らかとなった。さらに、被災者が集中する地域を視覚的に把握し、そこに新たな避難所を戦略的に配置することによって被災者数を減少させる効果が確認された。一方で、避難所を海岸付近に限定して設置した場合、内陸側の避難状況が改善されず、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となることも明らかになった。

これらの結果を踏まえ、今後の取り組みとしては、避難所の配置戦略や避難経路の特性を再検討するとともに、より多くのシミュレーションを通じてモデルの信頼性を高めていく必要がある。最終的には、こうした分析に基づいた科学的なアプローチによって、鎌倉市における被災リスクの最小化を目指すことが重要である。

## 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、神奈川県鎌倉市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。この体験型シミュレーションは、研究者による分析支援に加え、防災教育や住民・観光客への啓発を目的とした応用も想定している。実際の都市空間を再現した VR 環境で津波災害を疑似体験することは、津波リスクに対する理解を深め、迅速な避難行動の重要性を認識させる手段として有効であると考えられる。

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。また VR 体験中の行動履歴や視点移動の分析を通じて、避難行動特性の定量化やエージェントモデルへのフィードバックを行い、津波避難シミュレーションのさらなる高度化を目指す。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] “国土交通省 PLATEAU 公式サイト：  
<https://www.mlit.go.jp/plateau/>”，（参照日：2025 年 12 月 16 日）。
- [2] “FLOW 公式ドキュメント：  
<https://carloswilkes.com/Documentation/Flow#Buoyancy>”，（参照日：2025 年 12 月 16 日）。
- [3] “A\* Pathfinding Project Pro 公式サイト：  
<https://arongranberg.com/astar/>”，（参照日：2025 年 12 月 16 日）。
- [4] 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，  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jags/15/1/15\\_65/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jags/15/1/15_65/_article/-char/ja/)，（参照日：2025 年 12 月 16 日）。
- [5] “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.jma.go.jp/jma/kishou/known/jishin/n-teq/assumption.html>”，（参照日：2025 年 12 月 16 日）。
- [6] “地震調査研究推進本部 相模トラフ：  
[https://www.jishin.go.jp/regional\\_seismicity/rs\\_kaiko/k\\_sagami/](https://www.jishin.go.jp/regional_seismicity/rs_kaiko/k_sagami/)”，（参照日：2025 年 12 月 16 日）。
- [7] “鎌倉市津波ハザードマップ由比ガ浜・材木座エリア（鎌倉地域）：  
[https://www.city.kamakura.kanagawa.jp/sougoubousai/documents/4-1-2\\_tsunami\\_yuigahama\\_maps.pdf](https://www.city.kamakura.kanagawa.jp/sougoubousai/documents/4-1-2_tsunami_yuigahama_maps.pdf)”，（参照日：2025 年 12 月 16 日）。
- [8] 丸井義章，“スタミナを考慮した避難シミュレーション”，2010 年，P27～P30，<https://mas.kke.co.jp/wp-content/uploads/2019/06/20110331marui158.pdf>，（参照日：2025 年 12 月 16 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 年，P5，<https://www.bousai.go.jp/jishin/tsunami/hinan/6/pdf/2.pdf>，（参照日：2025 年 12 月 16 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年，  
vol. 25, no. 4, p. 513-516,  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/rika/25/4/25\\_4\\_513/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/rika/25/4/25_4_513/_pdf/-char/ja), (参照日：2025年12月16日).

- [11] [https://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/nihonkaiko\\_chisimajishin/pdf/kanmatsu5.pdf](https://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/nihonkaiko_chisimajishin/pdf/kanmatsu5.pdf), (参照日：2025年12月16日).
- [12] “鎌倉市防災情報ハンドブック：”  
<https://www.fujimichou.net/pdf/handbook2023.pdf> (参照日：2025年12月16日).
- [13] “松島 弘，アランニャ・クラウド，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”，  
[https://www.u.tsukuba.ac.jp/~kano.hitoshi.gb/paper/matsushima\\_2015.pdf](https://www.u.tsukuba.ac.jp/~kano.hitoshi.gb/paper/matsushima_2015.pdf)’ (参照日：2025年12月16日).