

最適な津波避難行動を学習可能な新たな 津波防災技術の開発と有効性の検証

高畠知行

近畿大学 理工学部 社会環境工学科

日本国土開発未来研究財団 学術研究成果発表会

1. 研究背景・目的

- 津波災害から多くの命を守るためには、**避難者一人ひとりが適切な避難行動を学習・理解し、発災時にその行動を実行**することが重要
- しかしながら、地域住民一人ひとりにとって、最適な津波避難行動（ここでは、「最適な避難経路の選択」を意味する）を特定し、それを効果的に学習できる形で提供することは容易ではない

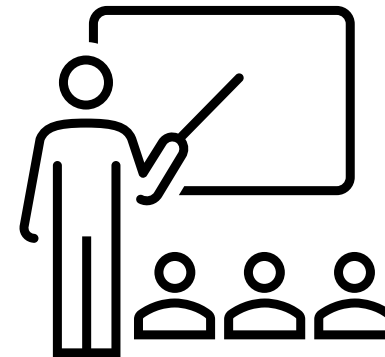
最短経路 ≠ 最適経路（津波に遭遇しない経路）



どこに避難する？
どんな経路で??



どうやって学ぶ？
効果的な学習とは??



1. 研究背景・目的

【本研究の目的】 個々の住民にとって最適な津波避難経路を特定するとともに、その経路を住民が疑似体験によって学習できるシステムを開発する



×



×



マルチエージェントシステム

強化学習技術

3次元都市モデル
構築技術

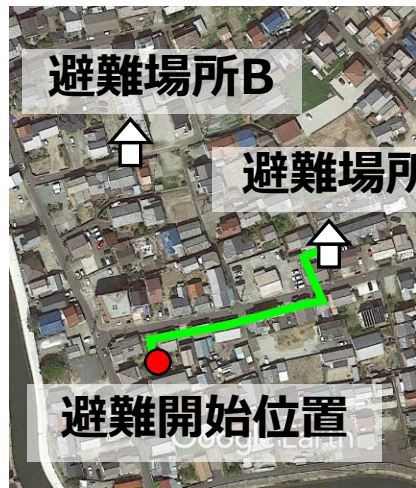
これらの技術を融合し、目的を達成する

1. 研究背景・目的



初期位置・状況を入力

最適避難経路探索技術
(マルチエージェントシステム+強化学習技術)

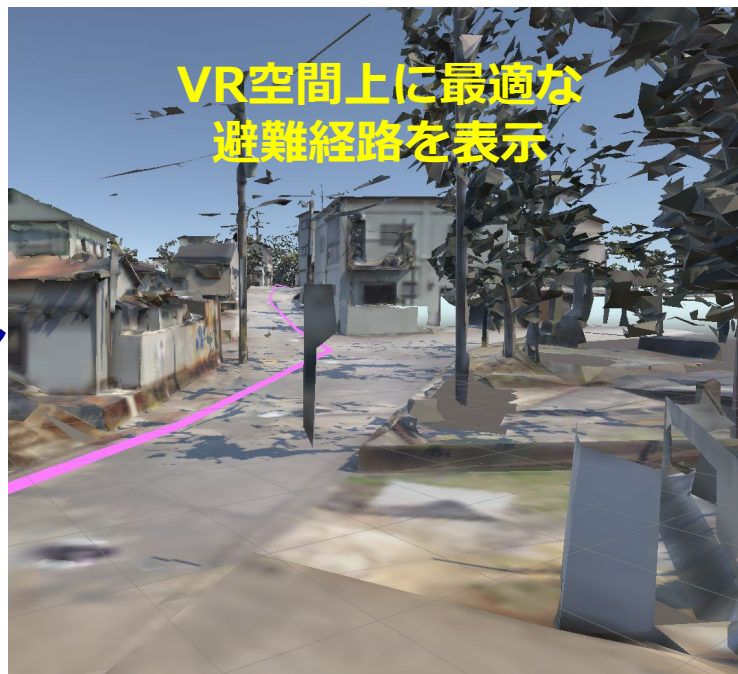


最適な避難経路を推定

3次元都市モデル
構築技術

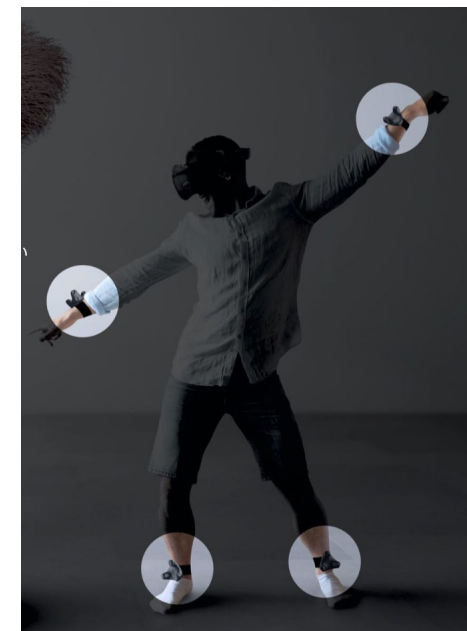


3次元都市モデル
構築技術



VR空間での
仮想避難体験

最適な避難経路を学習
災害への備えの向上



<https://www.vive.com/jp/accessory/tracker3/>

2. 研究計画・進捗状況

研究初年度

- 最適避難経路の推定技術の開発
- 様々な条件下における解析の実施
- 強化学習のパラメタに関する感度分析
- 最適避難経路の確認
- 論文執筆

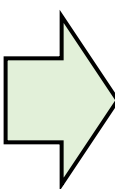
研究2年度

- 3次元LiDARの購入
- 3次元LiDARの使用法の習得
- 対象地域の点群データの取得
- 対象地域の3次元都市モデルの構築
- 対象地域のVR空間の構築
- 論文執筆

研究3年度

- 実証実験用器具の購入
- 実証実験のための打合せ
- 実証実験の実施
- 実証実験のデータ整理・分析
- 論文執筆

2年度は当初計画を上回る進捗があった。具体的には、以下の3項目を実施することができた。

- 
1. 最適避難経路の推定技術の更なる有効性検証
 2. 3次元都市モデルの活用による津波避難誘導アプリの開発と有効性検証
 3. 3次元都市モデルの活用によるVR津波避難誘導システムの開発

3. 最適避難経路の推定技術の更なる有効性検証 | 初年度成果

- 津波による被災者を低減するためには、避難者一人ひとりが**津波に遭遇しない避難経路を辿る**ことは、非常に重要 (Aldahlawi et al. 2024; 平野ら, 2017)
- 津波避難においては、「**最短経路 ≠ 最適経路 (津波に遭遇しない経路)**」であることが知られている (Tamakloe et al. 2021; Kitamura et al. 2020; Takabatake et al. 2020a; 佐藤ら, 2016; 北原ら, 2013)

避難経路の設定時に、道路距離に加えて考慮すべき項目



道路混雑



避難場所の収容限界



道路の
浸水時間



階段



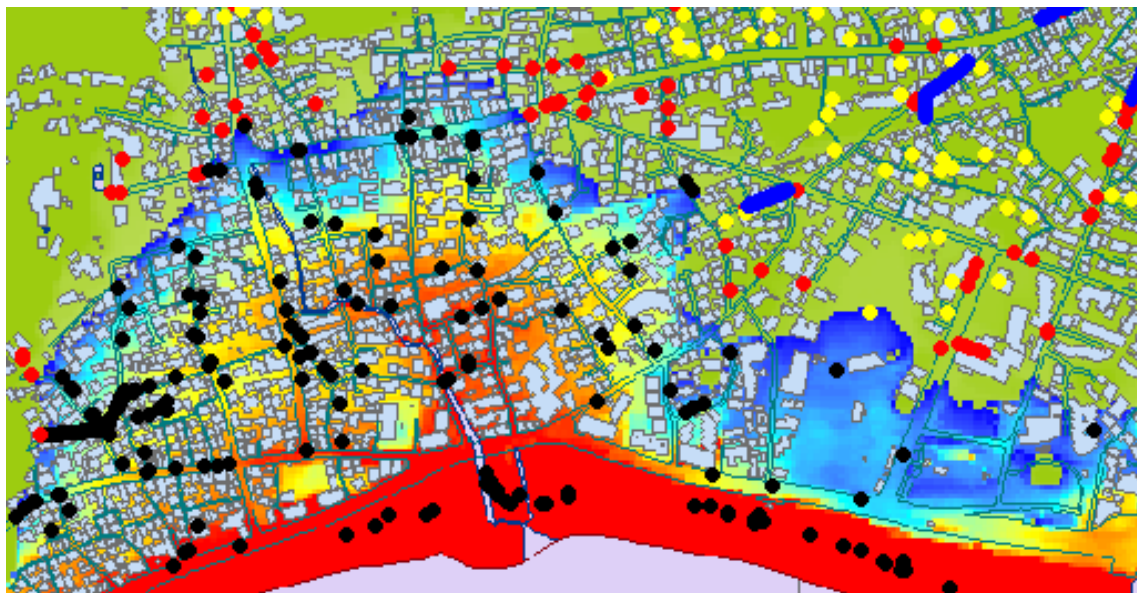
坂道



個々人の健康・精神状態

3. 最適避難経路の推定技術の更なる有効性検証 | 初年度成果

- 避難経路の最適化（災害に遭遇する避難者を最小化すること）を目的とした研究は、数多く行われている（Mizumura et al. 2024; Xue et al. 2021; Mas et al. 2021; Kitamura et al. 2020; 坂田ら, 2018）
- 本研究では、マルチエージェントシステムに基づく津波避難シミュレーションモデル（Takabatake et al. 2017, 2020a, 2020b, 2020c, 2022）と強化学習を組み合わせ、**避難経路の混雑状況・避難場所の収容限界・避難経路の浸水開始時刻**を考慮し、**避難者一人ひとりにとって避難経路を最適化する手法**を構築した

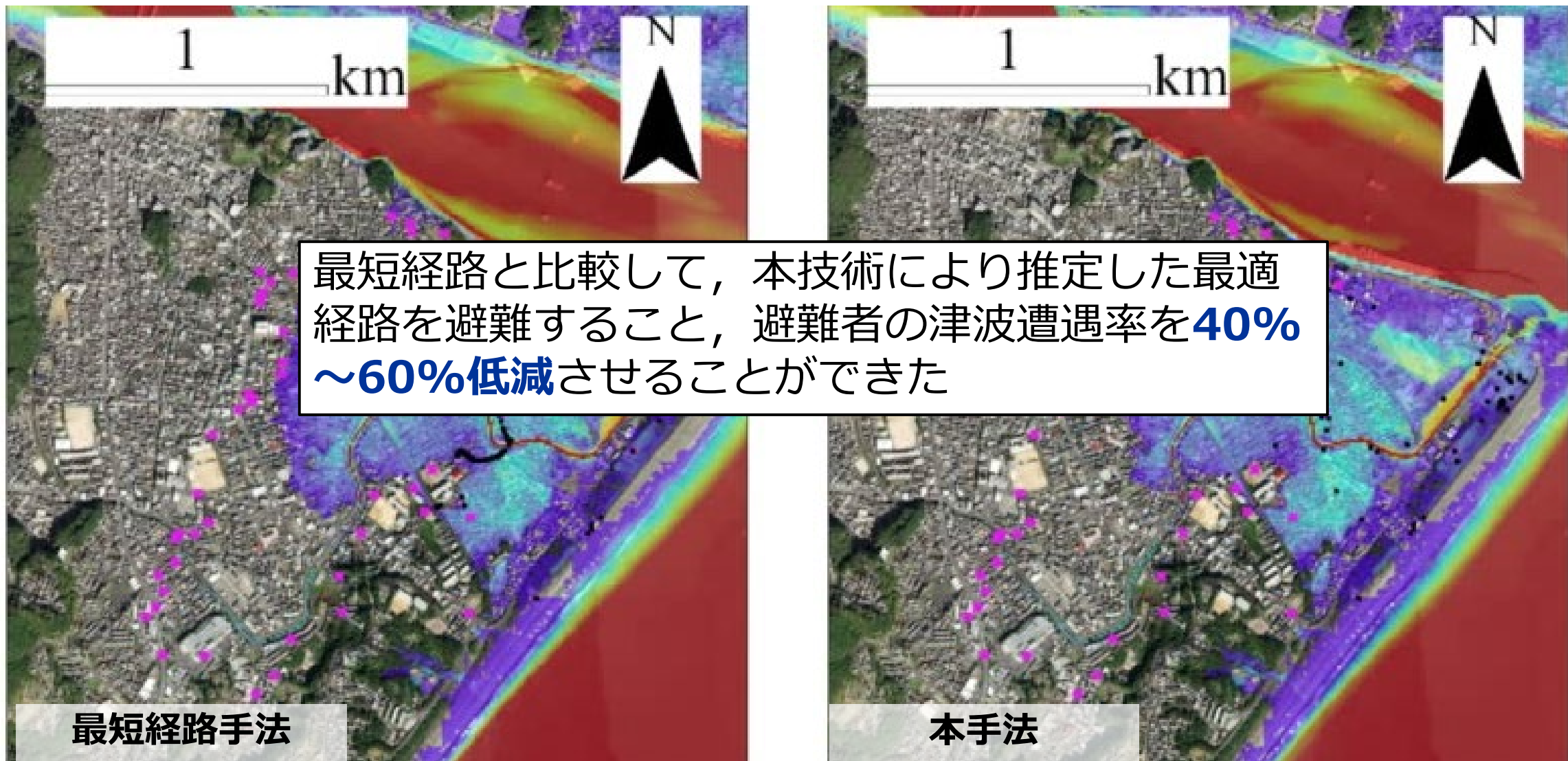


津波避難シミュレーションモデル

（Takabatake et al. 2017, 2020a, 2020b, 2020c, 2022）

- 道路状況，混雑度，避難者属性（年齢）に応じた避難速度の変化
- 避難場所の収容限界による再避難
- 津波浸水による被災判定
などを考慮可能なモデル

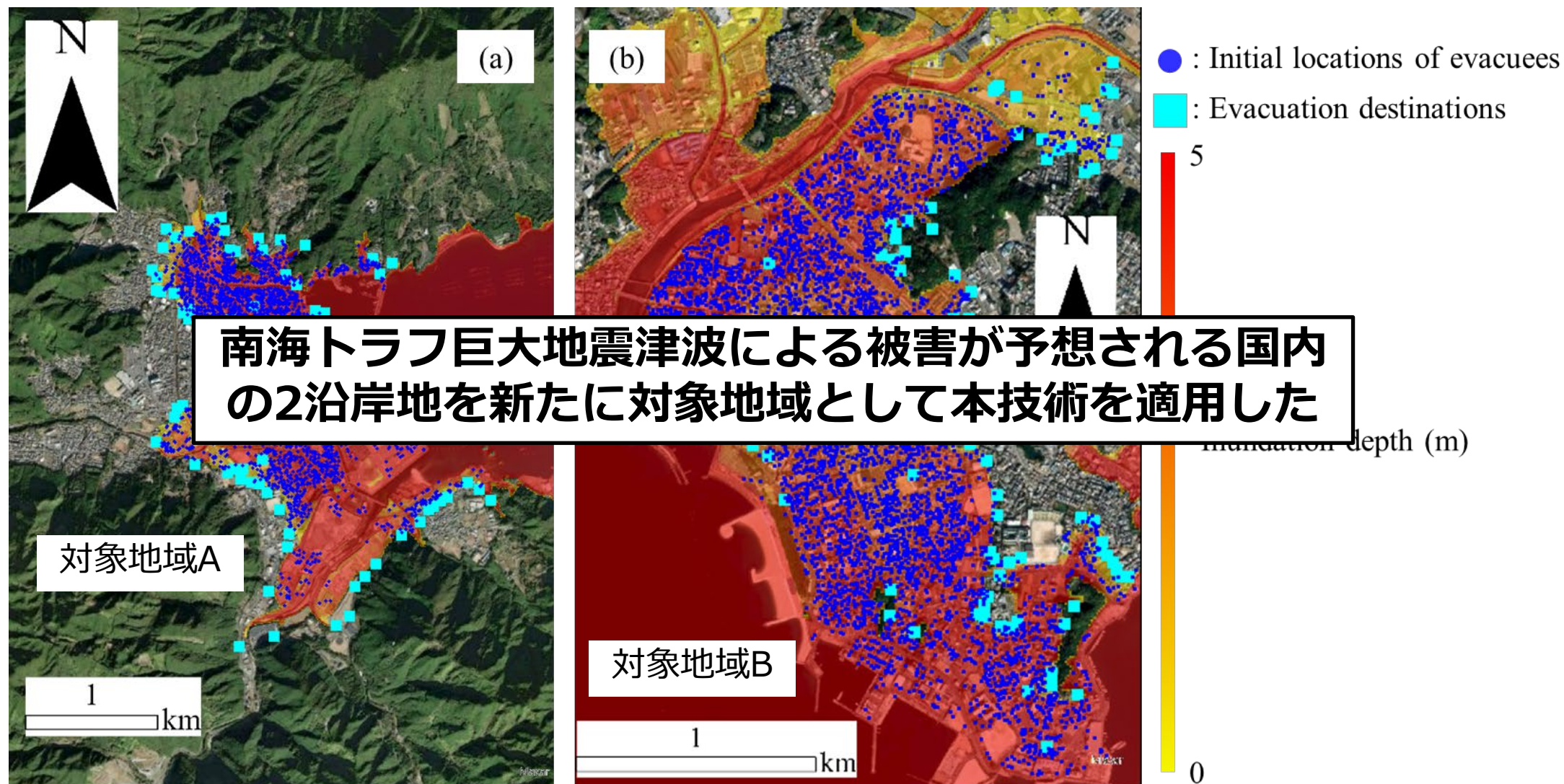
3. 最適避難経路の推定技術の更なる有効性検証 | 初年度成果



3. 最適避難経路推定技術の更なる有効性検証 | 目的

- 初年度の研究により，本技術の有効性が確かめられた
- 一方で，「他の地域（＝和歌山県新宮市以外）でも有効か？」「最適経路に従わなかった避難者がいた場合，最適経路に従った避難者に不利益が発生するのか？」については未解明のままであった
- そこで2年度には，初年度（和歌山県新宮市）とは異なる2つの国内沿岸地域に本技術を適用するとともに，最適経路に従わない避難者が一定数存在するケースを想定したシミュレーションを実施した
- これにより，**最適避難経路の推定技術の汎用性と実効性**をより明確に評価することを目的とした

3. 最適避難経路推定技術の更なる有効性検証 | 対象地域



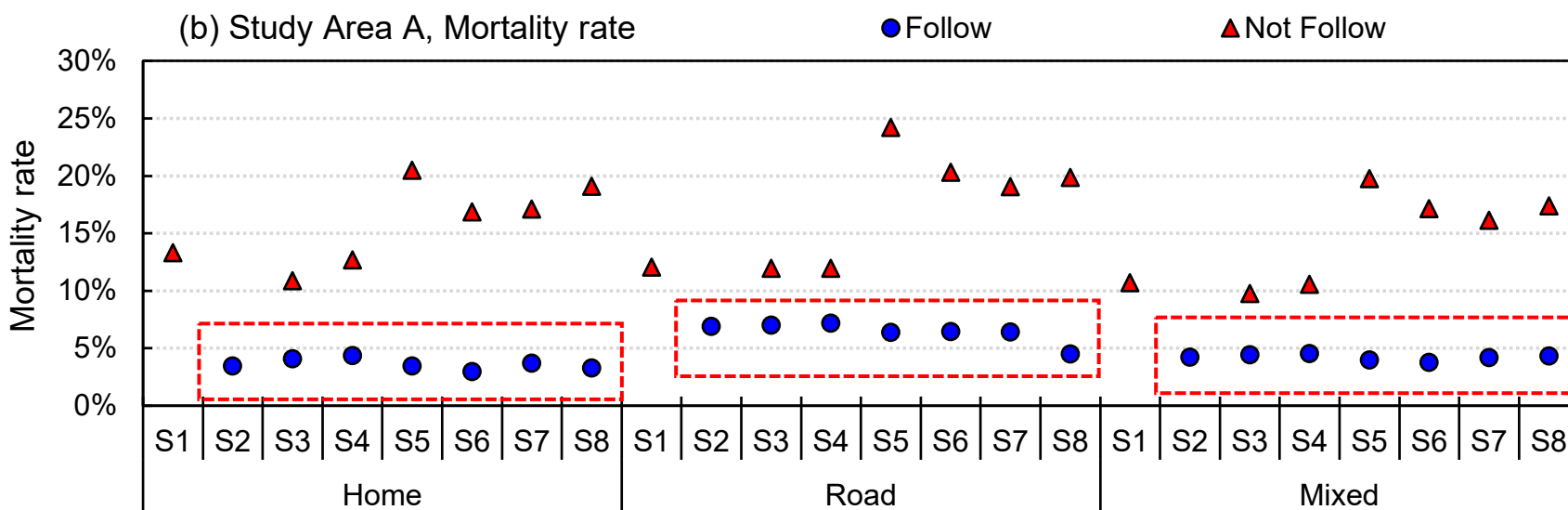
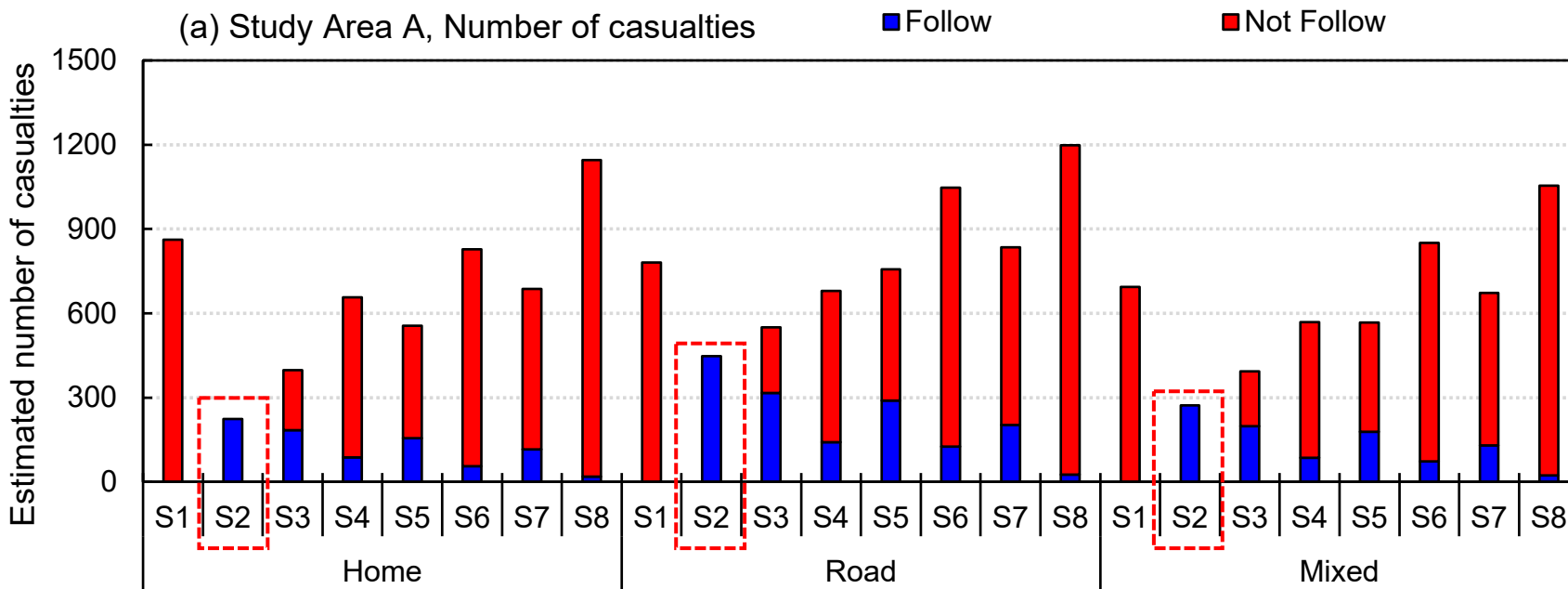
津波による最大浸水深の空間分布と避難者の初期位置の一例：(a) 対象地域A, (b) 対象地域B

3. 最適避難経路推定技術の更なる有効性検証 | 設定シナリオ

シナリオ	避難経路選択の仮定	避難開始時間の仮定
S1	全員が最短経路	地震発生5分後に一斉避難開始（即時避難）
S2	全員が最適経路	地震発生5分後に一斉避難開始（即時避難）
S3	70%が最適経路, 30%が最短経路	地震発生5分後に一斉避難開始（即時避難）
S4	30%が最適経路, 70%が最短経路	地震発生5分後に一斉避難開始（即時避難）
S5	全員が最短経路	70%が地震発生5分後, 30%が地震発生5分後を平均値とするレイリー分布に従い避難開始（遅延避難）
S6	全員が最適経路	30%が地震発生5分後, 70%が地震発生5分後を平均値とするレイリー分布に従い避難開始（遅延避難）
S7	70%が最適経路, 30%が最短経路	70%が地震発生5分後, 30%が地震発生5分後を平均値とするレイリー分布に従い避難開始（遅延避難）
S8	30%が最適経路, 70%が最短経路	30%が地震発生5分後, 70%が地震発生5分後を平均値とするレイリー分布に従い避難開始（遅延避難）

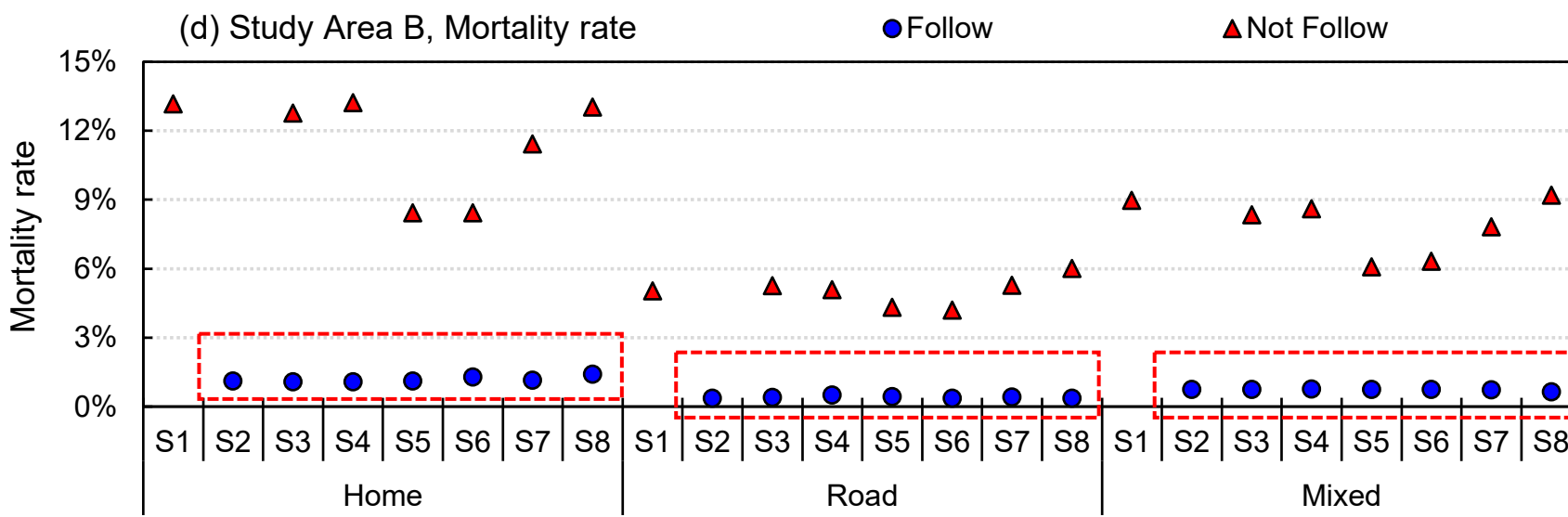
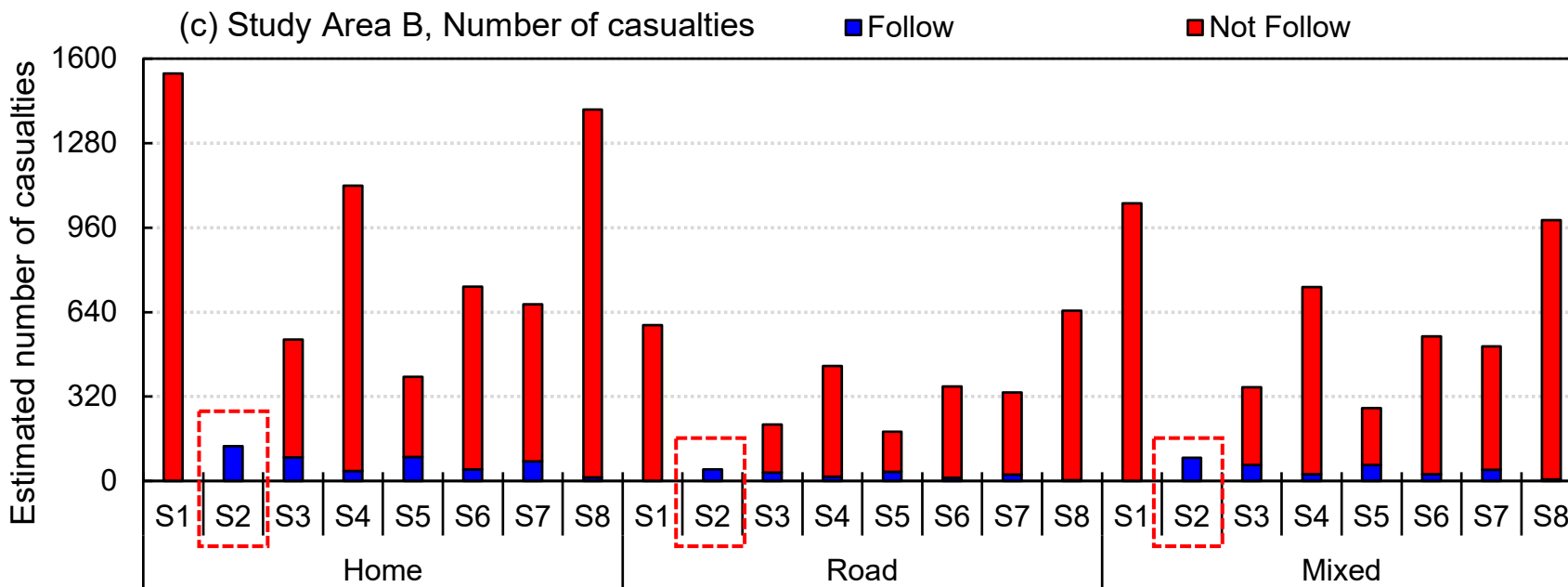
- 「地震発生5分後に避難開始・最適経路で避難」を行う避難者を従順避難者（Follow）と定義
- 上記に加え, 3通りの避難者の初期位置条件を設定した（Home, Road, Mixed）

3. 最適避難経路推定技術の更なる有効性検証 | 結果 (対象地域A)



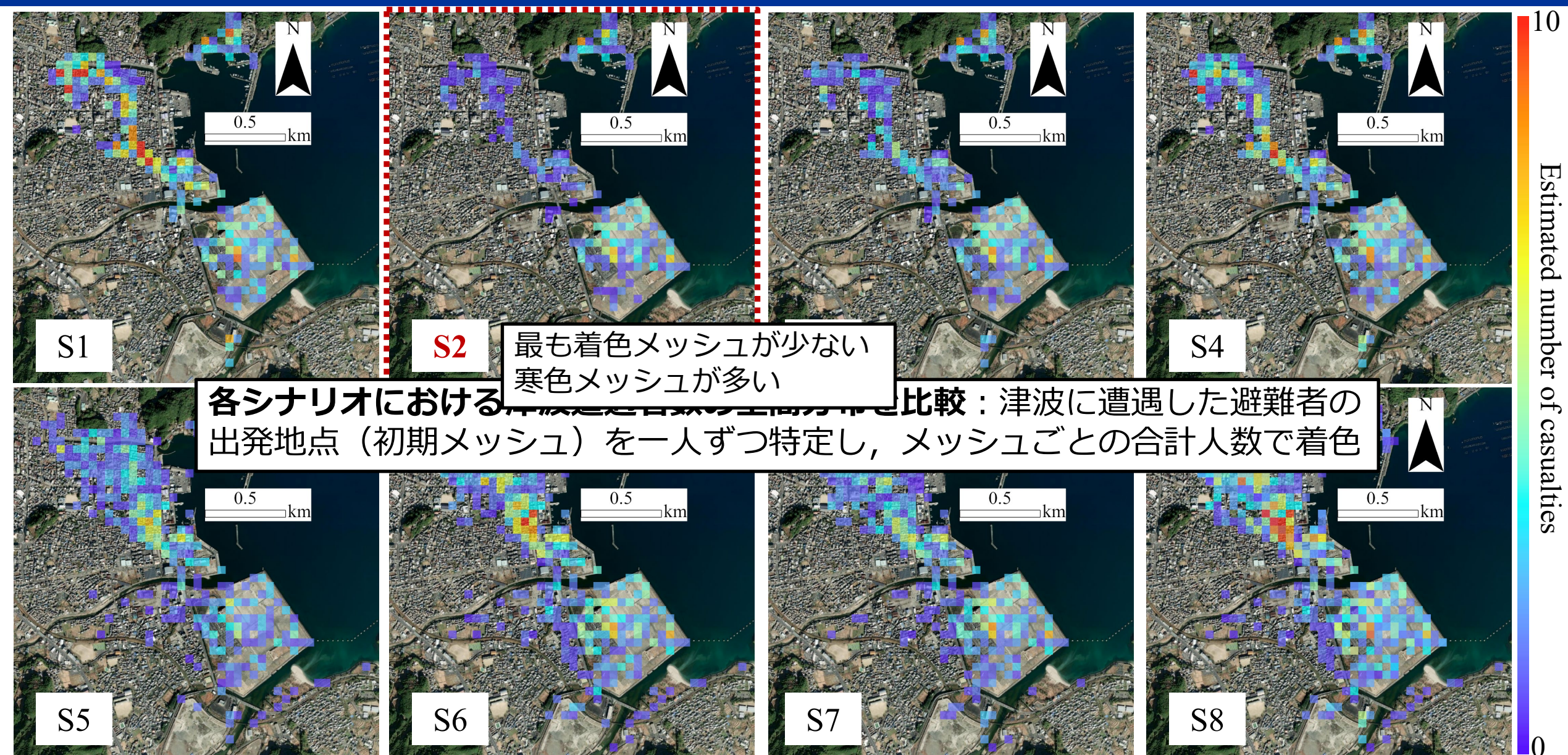
- 避難者の初期位置によらず、「全員が地震発生5分後に避難を開始し最適経路で避難をした場合 (S2)」に、津波遭遇者数が最小となった
- 従順避難者 (**Follow**) の津波遭遇率は、従わなかった避難者 (**Not Follow**) よりも一貫して低かった
- **Follow** の被災率は、周囲に **Not Follow** が存在しても、大きく上昇しなかった (= 周囲の避難行動に関わらず、自らが早く避難を開始し、最適経路を選べば、津波に遭遇する可能性は低くなる)

3. 最適避難経路推定技術の更なる有効性検証 | 結果 (対象地域B)

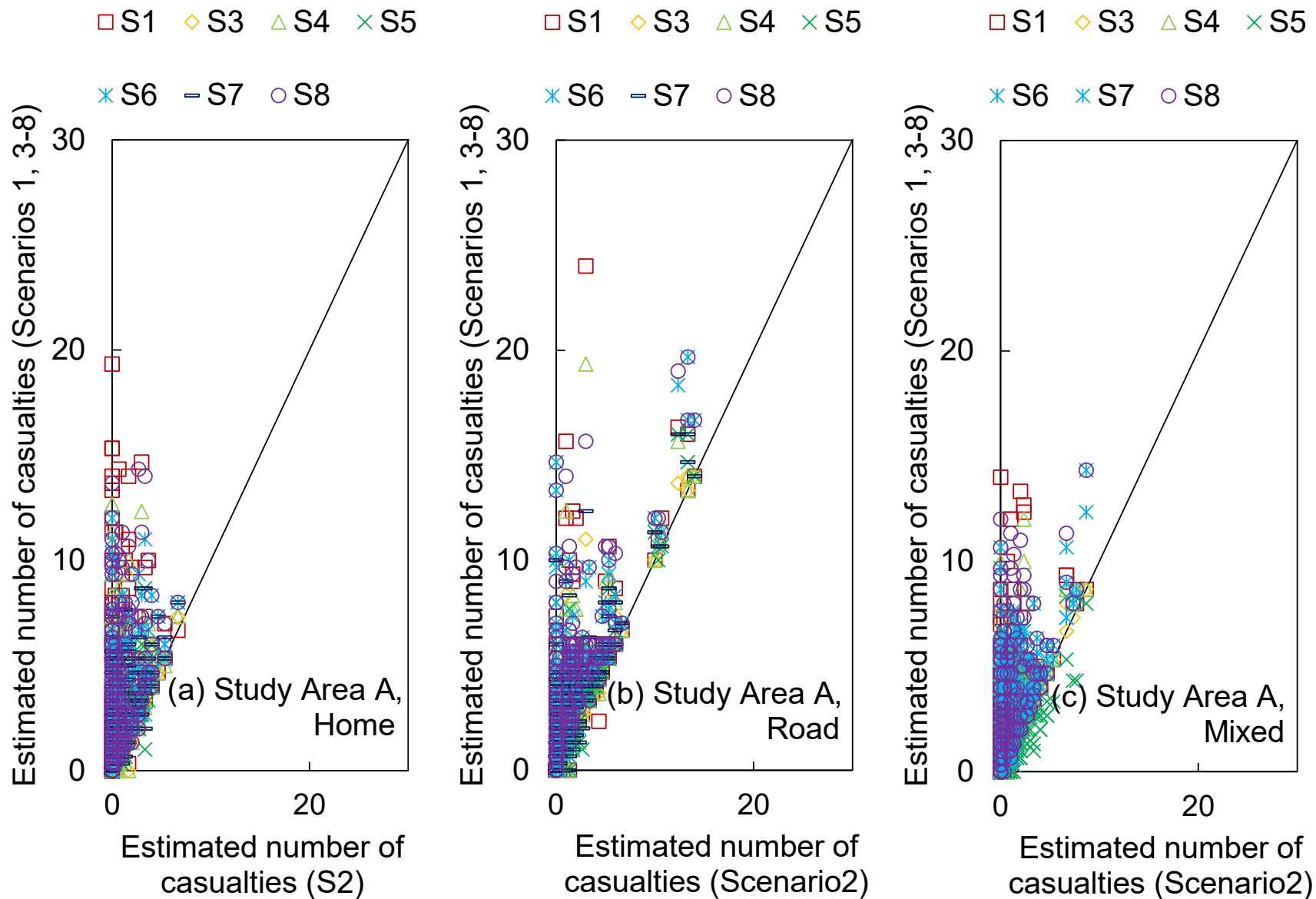


- 避難者の初期位置によらず、「全員が地震発生5分後に避難を開始し最適経路で避難をした場合 (S2)」に、津波遭遇者数が最小となった
- 従順避難者 (**Follow**) の津波遭遇率は、従わなかった避難者 (**Not Follow**) よりも一貫して低かった
- **Follow** の被災率は、周囲に **Not Follow** が存在しても、大きく上昇しなかった (= 周囲の避難行動に関わらず、自らが早く避難を開始し、最適経路を選べば、津波に遭遇する可能性は低くなる)

3. 最適避難経路推定技術の更なる有効性検証 | 結果 (対象地域A)



3. 最適避難経路推定技術の更なる有効性検証 | 結果 (対象地域A)



- 各メッシュの津波遭遇者数をS2と他シナリオで比較
- S2では、ほとんどのメッシュで津波遭遇者数が最小となった
- つまり「全員が地震発生5分後に避難を開始し最適経路で避難をした場合 (S2)」, 全体として遭遇者数が最小化されるだけでなく、ほぼすべての地域で遭遇者数が減少することがわかった
(= **特定の地域を犠牲にして他を守るような偏りは見られない**)

3. 最適避難経路推定技術の更なる有効性検証 | まとめ

- 初年度とは異なる2つの国内沿岸地を対象に、本技術を適用して最適避難経路を推定した。その結果、**避難者が最適経路に従って避難することで、津波遭遇者数を大きく低減できる**ことが確認された（最短経路で避難した場合と比較して、対象地域Aでは最大74%減、対象地域Bでは91%減）
- また、一部の避難者が最適経路に従わない場合でも、自身が最適経路を選択すれば、津波に遭遇する確率を大きく低減できることが明らかになった
- すなわち、「**周囲の避難行動にかかわらず、自分自身が迅速に避難を開始し、最適経路を選択すれば、津波に遭遇しづらくなる**」ことが確かめられた
- これらの成果は、第71回海岸工学講演会で発表するとともに、査読付き国際学術誌 International Journal of Disaster Risk ReductionおよびReliability Engineering and System Safetyに掲載された

4. 3次元都市モデルの活用による津波避難誘導アプリの開発と有効性検証 | 目的

- 本研究では、3次元都市モデルを活用し、VR空間内で津波避難を仮想体験できるシステムを構築し、その有効性を検証することを最終目的としている
- 一方で、3次元都市モデルの津波避難支援への活用は、VR空間の構築にとどまらない
- そこで2年度には、3次元都市モデルの津波避難支援へのさらなる活用可能性を検証するため、**3次元都市モデルを用いた津波避難誘導用のモバイルアプリケーション**を開発し、実際に避難者を誘導できるかを検証することとした



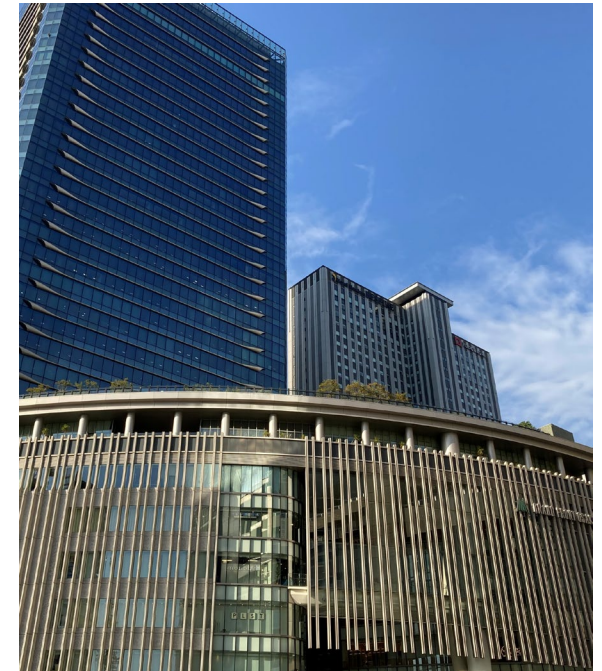
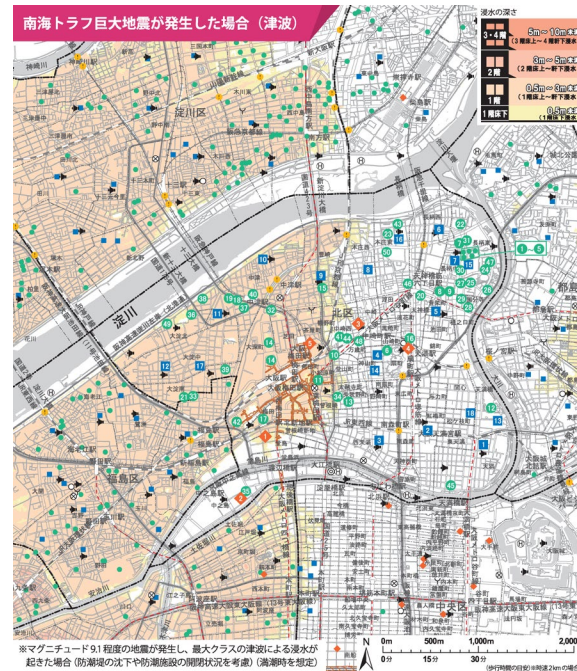
現地写真



3次元都市モデルによる再現

4. 3次元都市モデルの活用による津波避難誘導アプリの開発と有効性検証 | 対象地域

- 大阪府大阪市北区梅田地区を対象とした
- JR大阪駅を利用する人や買い物客など、一時来訪者が多く集まる地域であることに加え、津波による浸水リスクも有している
- 都市の大部分が海拔よりも低いゼロメートル地帯に位置しており、一度浸水すると長時間海水が滞留する恐れもある



左：梅田周辺の現地写真，中央：梅田地区の津波ハザードマップ，右：津波避難ビルの外観

4. 3次元都市モデルの活用による津波避難誘導アプリの開発と有効性検証 | 対象地域

- 「JR大阪駅中央南口前 ⇒ 三共梅田ビル前（想定浸水範囲外）」までの経路を誘導対象とした
- 津波到達時間と長時間の海水滞留を考慮し，津波避難ビルまでの誘導ではなく，想定浸水範囲外までの誘導とした（徒歩約20分の経路）
- 歩道橋や地下街，駅構内など，災害時に人が集中する場所や道幅が狭い道路の利用は制限した（＝最適経路を設定した）



4. 3次元都市モデルの活用による津波避難誘導アプリの開発と有効性検証 | 開発アプリ

【避難誘導アプリケーション】



- ゼンリン社が提供する3次元都市モデルを活用した
- ゲーム開発プラットフォームUnity上に、梅田周辺の建物や街路を現実に即して再現した
- 誘導経路や自動移動カメラなど、津波避難誘導に必要なを追加した

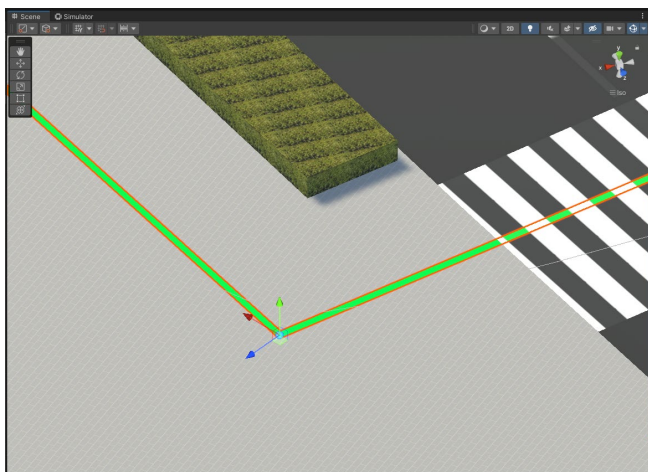
4. 3次元都市モデルの活用による津波避難誘導アプリの開発と有効性検証 | 開発アプリ

【1人称カメラの自動移動】

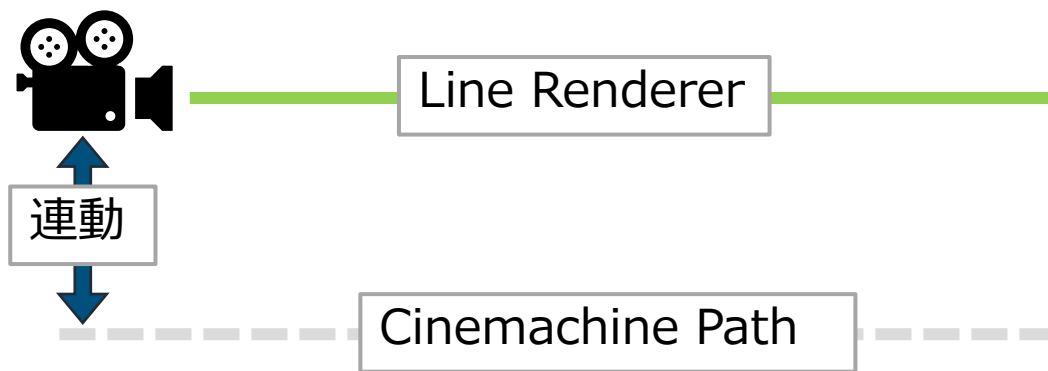
- 3次元都市データ内に描画した誘導経路(緑色の線)の上を, 1人称カメラが自動で移動する機能を実装した
- このカメラ映像を追従してもらうことで, 利用者を安全な場所まで誘導する

誘導経路 : Unityの機能のLine Rendererで描画

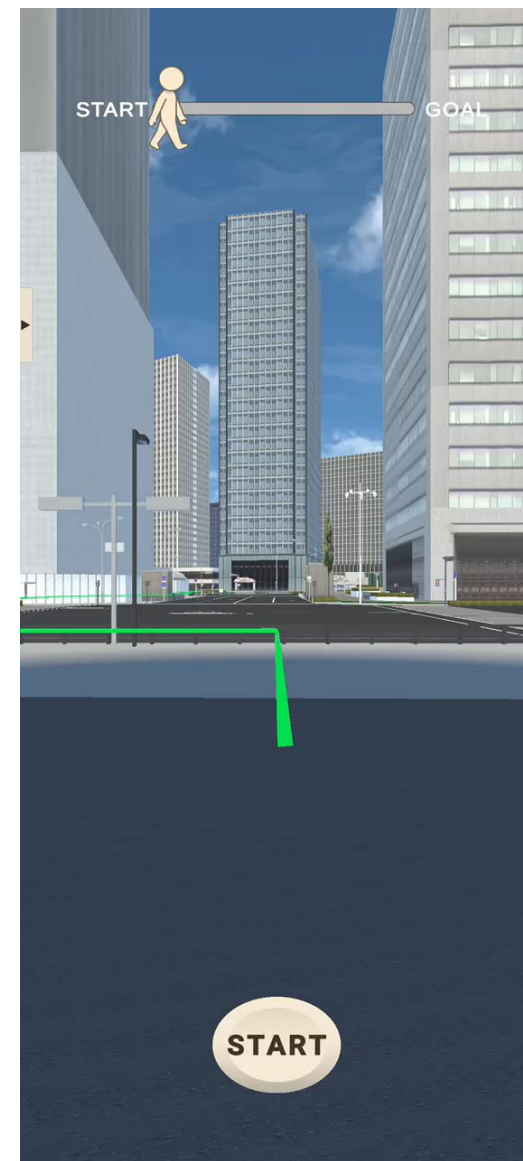
自動移動カメラ : Cinemachine PathとCinemachine Dolly Cartにより作成



描画の様子



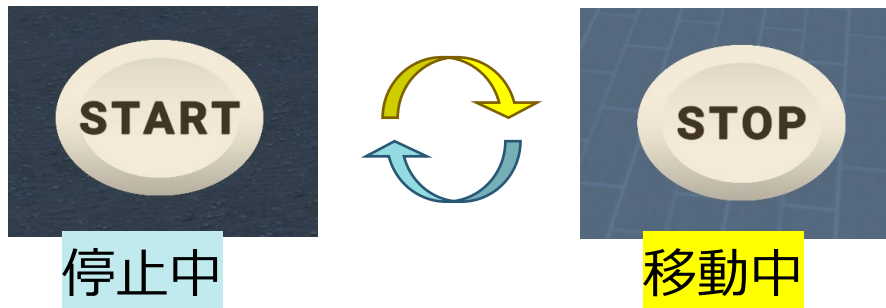
イメージ図



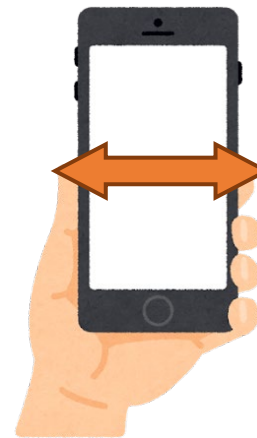
4. 3次元都市モデルの活用による津波避難誘導アプリの開発と有効性検証 | 開発アプリ

【カメラ映像の移動と停止の切り替え, 左右の確認】

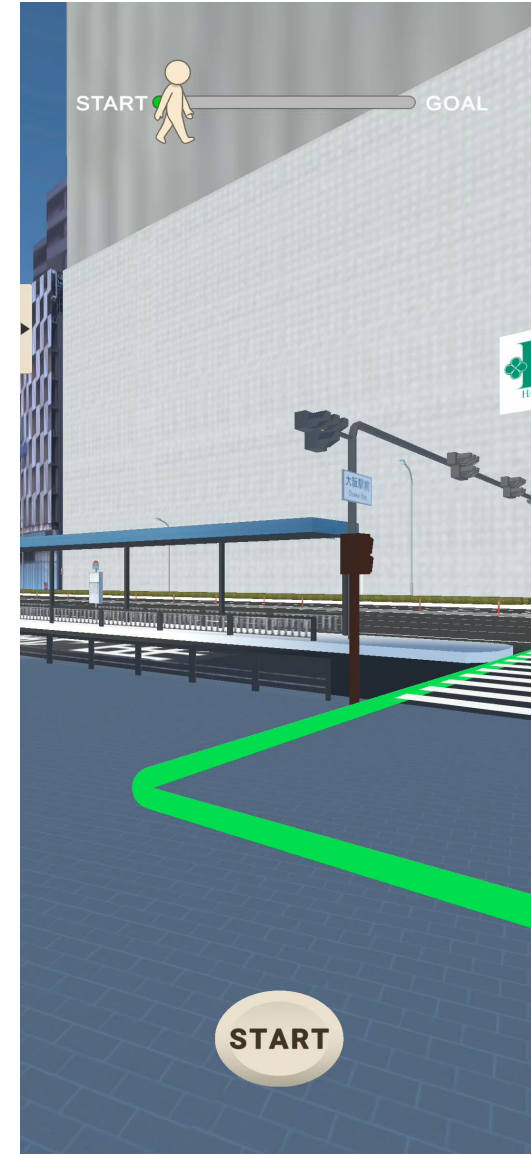
- アプリ内に設置したボタンを押すことで, カメラ映像の移動と停止を切り替え可能とした
- スマートフォンの画面を左右にスライドさせることで, 周囲の建物や道路, 看板を確認できる機能を追加した
- ボタン表示のテキストも, 状態に応じて自動で切り替わるように設定した



ボタンに付属したテキストも同時に切り替わるように設定



カメラ映像の左右の確認



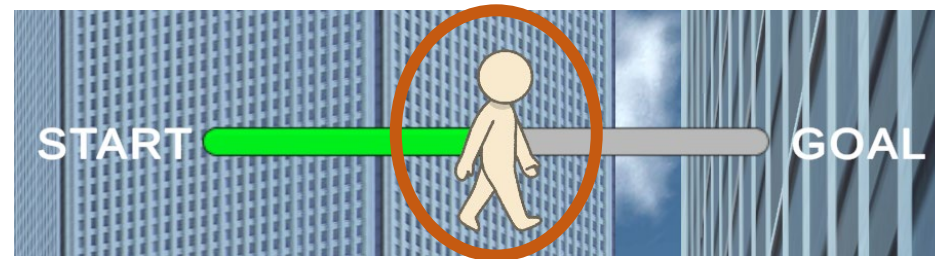
4. 3次元都市モデルの活用による津波避難誘導アプリの開発と有効性検証 | 開発アプリ

【経路や看板を見逃した場合の対応】

- 経路を見逃した場合は、画面上部に設置した距離メーター上の人型マークをスライドさせることで、カメラ映像を任意の場所に移動できる機能を設けた
- これにより、利用者が見逃した地点まで簡単に戻り、再確認することができる



見逃しちゃった！



4. 3次元都市モデルの活用による津波避難誘導アプリの開発と有効性検証 | 開発アプリ

【避難場所の詳細情報を提示】

- 避難場所を確実に確認できるように，誘導先の避難場所（写真や名称，住所）に関する詳細情報を表示するサイドパネル機能を追加した

【通信障害の対策】

- 災害発生時に考えられる通信障害を想定し，GPSなどのネットワーク情報を組み込まずに構築した
- そのため，オフライン環境でも利用可能である



4. 3次元都市モデルの活用による津波避難誘導アプリの開発と有効性検証 | 実証実験

【実証実験】



実施日

2024年7月15日～2024年11月21日の20日間



被験者

20代から60代の一般参加者50名（関西近郊在住）
（リサーチ会社を介して被験者を募集・収集）

〔実験ルール〕



時間

30分間

（避難場所まで約20分+10分）

30分経過時点で実験を強制終了



条件

- ・避難時は走らずに歩行
- ・信号などの交通ルールを遵守
- ・アプリを操作時は周囲の安全に注意

〔計測方法〕



経路

ルートヒストリー
（GPSロガーアプリ）



時間

ストップウォッチ



実験の様子

4. 3次元都市モデルの活用による津波避難誘導アプリの開発と有効性検証 | 実証実験結果

【実証実験結果】（20代から60代の計50名を対象に実施）

JR大阪駅中央南口前から想定浸水範囲外まで（約1.3km）、開発したアプリを用いて誘導できるかを確認した

〈年代別の避難成功率〉

20代の成功率：100%（10/10）

30代の成功率：100%（10/10）

40代の成功率：75%（6/8）

50代の成功率：77%（7/9）

60代の成功率：84%（11/13）

- 全被験者に対する成功率は、88%（44/50）であった
- 特に、本アプリはスマートフォン操作に慣れた若年層に対して有効性が高いことがわかった

4. 3次元都市モデルの活用による津波避難誘導アプリの開発と有効性検証 | まとめ

- 3次元都市モデルの応用的な活用として、津波避難誘導アプリへの組み込みを行った
- **開発したアプリは、津波避難経路の把握や最適経路の学習、災害発生時の誘導に効果的**であることが確かめられた。特にスマートフォン操作に慣れた若年層に対して有効であることがわかった
- これまでに3次元都市モデルの活用は幅広く進められているが、本研究は3次元都市モデルの有効性を実証実験により検証したものであり、極めて貴重な成果であると考えている
- これらの成果は、第43回日本自然災害学会学術講演会、12th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC2025) で発表し、第4回学生向けインフラDX技術コンテスト発表会（近畿建設協会）では、優秀賞（副賞：賞金10万円）を受賞した
- また、研究成果を取りまとめた論文は、査読付き国際学術誌Natural Hazardsに投稿中である

5. 3次元都市モデルの活用によるVR津波避難誘導システムの開発 | 目的

- **【2年度の主な目的】** 和歌山県新宮市を対象として、3次元都市モデルを構築し、それをを用いてVR空間内で津波避難の仮想体験および学習ができるシステムを開発する
- 3次元Lidarカメラ（Matterport3D）を用いて、新宮市の避難経路周辺の点群データを取得し、それをもとに3次元都市モデルを生成した。そのうえで、このデータを活用して、VR空間内で避難行動を体験できるシステムを構築した。また、梅田地区で開発したものと同様のモバイルアプリの構築にも取り組んだ



初年度に推定した最適避難経路の内の1つを、VR内で体験できるようにした

設定した避難経路（和歌山県新宮市）

5. 3次元都市モデルの活用によるVR津波避難誘導システムの開発 | 点群データの取得

- 3次元都市モデルは、都市部ではPLATEAU等により整備が進んでいるものの、新宮市を含め、地方では未整備の地域も多い。そこで、**自ら点群データを取得し、3次元都市モデルを構築**することとした。具体的には、2025年3月23日～25日の3日間に現地を訪れ、避難経路周辺の点群データを収集した
- Matterport Pro3によるデータ取得：LiDARセンサーを搭載したMatterport Pro3を用い、物体までの距離を正確に計測して高精度な点群データを収集した。これにより、PLATEAUではカバーされていない地域の忠実かつ高精度な3次元都市モデルを生成することができた



点群データの撮影状況



Matterport Pro3

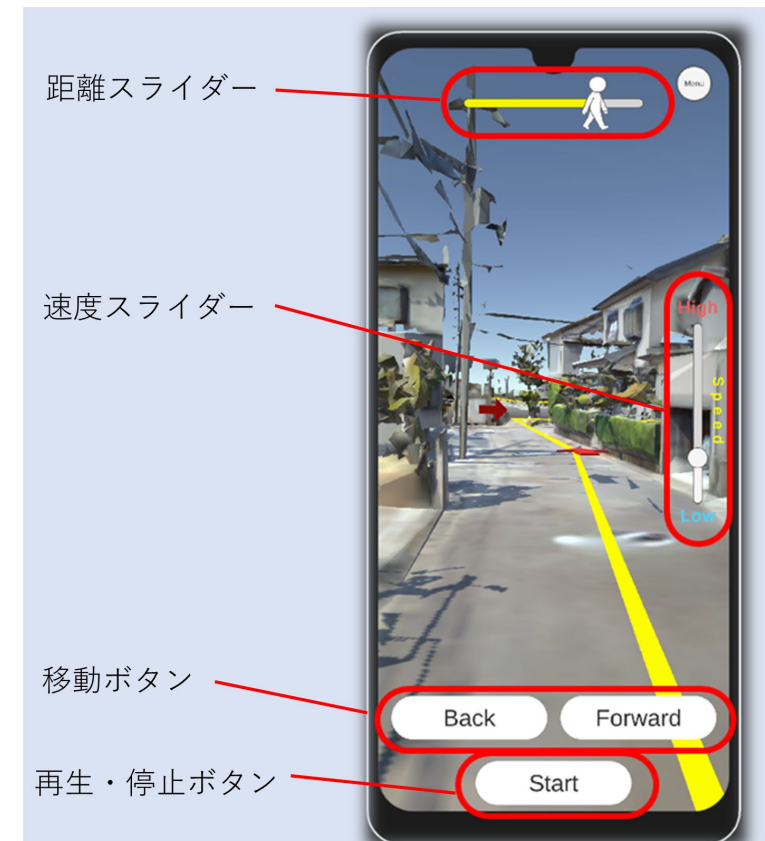
5. 3次元都市モデルの活用によるVR津波避難誘導システムの開発 | VRシステム/アプリの構築

- 取得した3次元都市モデルを、ゲーム開発エンジンUnreal Engineに組み込み、接触判定の設定や、VRゴーグル・モーションキャプチャーとの同期を実施した（当初はトレッドミル型VRを試行したが、操作が難しく動作再現性に課題があったため、モーションキャプチャー方式を採用）
- モバイルアプリについては、Unity3D上で開発した

UNREAL ENGINE



VRシステムの画面の一例



モバイルアプリの画面

5. 3次元都市モデルの活用によるVR津波避難誘導システムの開発 | 予備実験

- 3年度に予定している中高生を対象とした実証試験に先立ち、2025年8月25日・26日に当研究室のメンバー（7名）を対象として、**VR津波避難誘導システムの確認実験**を実施した
- 新宮市を訪れ、近畿大学附属新宮中学校・高等学校の教室内で、まずVRシステムを用いた避難経路の仮想歩行体験を行った。続いて、実際のスタート地点へ移動し、VRで学習した経路を頼りに、現実の環境で同じルートを歩いてゴール地点までたどり着けるかを確認した
- VR単体での成功率は2/3であったが、モバイルアプリと併用した場合、成功率は4/4であった
- VR内で目印となる建物や看板を強調表示することが、避難経路の記憶定着に有効であることが示唆された



予備実験の様子

5. 3次元都市モデルの活用によるVR津波避難誘導システムの開発 | まとめ

- 和歌山県新宮市の避難経路を対象にMatterportPro3を用いて点群データを取得し、3次元都市モデルを生成してUnreal Engineに組み込んだ
- Unreal Engine上でVRゴーグル・モーションキャプチャーと同期させ、VR空間内で津波避難を仮想体験できるシステムを構築した。また、津波避難誘導に有効なモバイルアプリの構築も行った
- 研究室メンバーを対象に、確認実験を行った結果、VR単体での成功率は2/3であったが、モバイルアプリを併用した場合は4/4の成功率であった。3次元都市モデルに避難経路を重ねただけでは、避難経路の記憶が残りにくく、VR内で目印となる建物や看板を強調表示することの有効性が示唆された
- 今後はVRシステムを改良し、近畿大学附属新宮中学校・高等学校の学生約50名を対象に、より大規模な実証実験を行い、同システムの有効性を検証する予定である
- 学校関係者との協議はすでに開始しており、実証実験は2026年3月末に実施予定である

6. 2年度の成果まとめ・3年度の予定

- 2年度は、主に以下3つの取り組みを遂行した。
 1. **最適避難経路推定技術の更なる有効性検証**：初年度とは異なる2つの沿岸地域に適用し、最短経路ではなく最適経路を用いることの有効性と実践的意義を確認した。
 2. **3次元都市モデルの活用による津波避難誘導アプリの開発と有効性検証**：3次元都市モデルを用いた津波避難誘導アプリを開発し、実証により有効な誘導手段となり得ることを確認した。
 3. **3次元都市モデルの活用によるVR津波避難誘導システムの開発**：3次元LiDARで点群を取得、3次元都市モデルを生成し、VR空間で最適経路に沿った仮想避難体験が可能なシステムを構築した。あわせて新宮市版の誘導アプリも構築した。
 - **和歌山県新宮市での3次元都市モデル取得とVR避難体験システムの開発は計画通り着実に実施**できた。さらに、最適経路推定技術の有効性の追加検証と、3次元都市モデルの実務的活用法について新たな知見を獲得した
- 【3年度の予定】** 新宮市の中高生約50名を対象に、システムの教育的効果を検証する実証試験を実施予定。学校関係者との協議は開始済みで、実証は2026年3月末を予定している。