

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

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

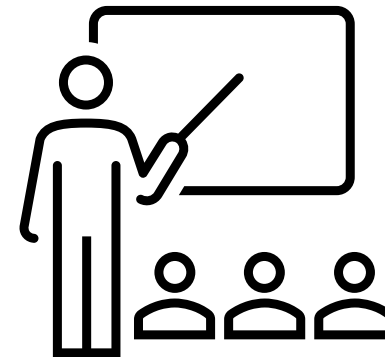
最短経路 ≠ 最適経路（津波に遭遇しない経路）



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

デジタルツイン
空間構築技術

これらの技術を融合し、目的を達成する

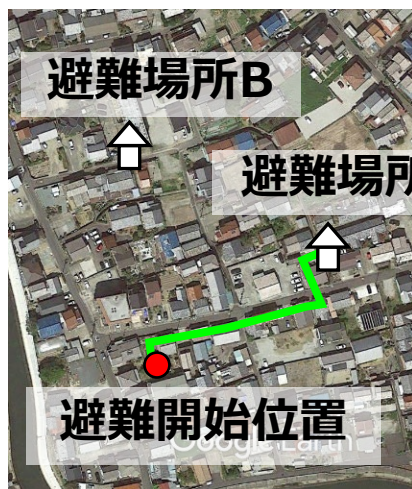
1. 研究背景・目的



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

デジタルツイン
空間構築技術



デジタルツイン
空間構築技術

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://katvr.jp/>

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

- 大型計算機へのプログラム移植
- プログラムの並列化による改良

□ 様々な条件下における解析の実施

- 避難開始時間を変化させた解析の実施
- 避難者の初期分布を変化させた解析の実施
- 避難者の移動速度を変化させた解析の実施

□ 強化学習のパラメタに関する感度分析

- 報酬の与え方を変化させた解析の実施
- 深層強化学習モデルの適用（深層学習を使わない強化学習モデルと比べて高速化ならず）
- △ ハイパーパラメタの感度分析（深層強化学習の適用により高速化が果たせなかったため、限定的に実施）

□ 最適避難経路の確認

- 現地調査の実施，実証試験に向けての打合せ

□ 論文執筆

- 査読付き国際学術誌に投稿済み（査読中）

研究2年度

□ 3次元LiDARの購入

- MatterportPro3の購入

□ 3次元LiDARの使用法の習得

□ 対象地域の3次元都市空間データの取得

□ 対象地域のデジタルツイン空間の構築

□ 構築したデジタルツイン空間の検証

□ 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

3. 研究初年度の目的・概要

- 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. 研究初年度の目的・概要

- 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

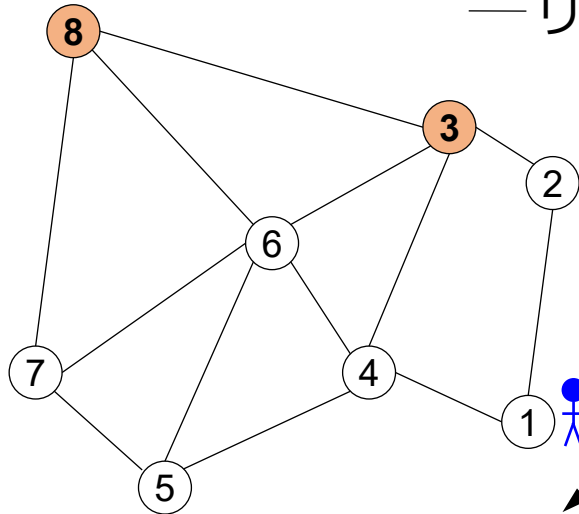
（Takabatake et al. 2017, 2020a, 2020b, 2020c, 2022）

- 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

4. 最適避難経路の推定手法

最短経路手法

○ ノード ● 避難場所
— リンク

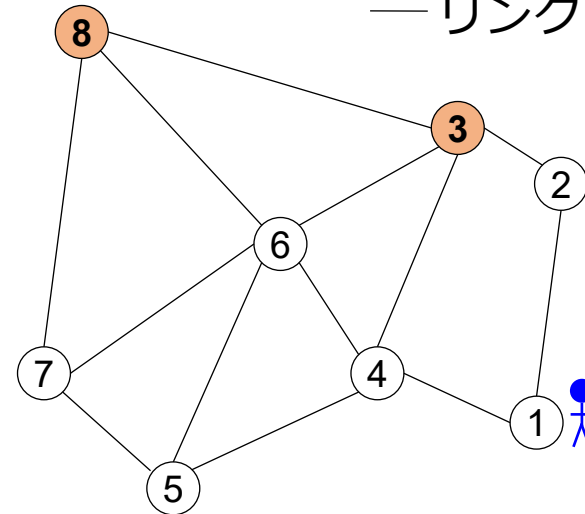


ノード間の**距離**によって、
テーブルを生成

		ノード番号							
		1	2	3	4	5	6	7	8
ノード番号	1	—	248	—	155	—	—	—	—
	2	248	—	91	—	—	—	—	—
	3	—	91	—	276	—	212	—	445
	4	155	—	276	—	244	145	—	—
	5	—	—	—	244	—	289	156	—
	6	—	—	212	145	289	—	297	314
	7	—	—	—	—	156	297	—	382
	8	—	—	445	—	—	314	382	—

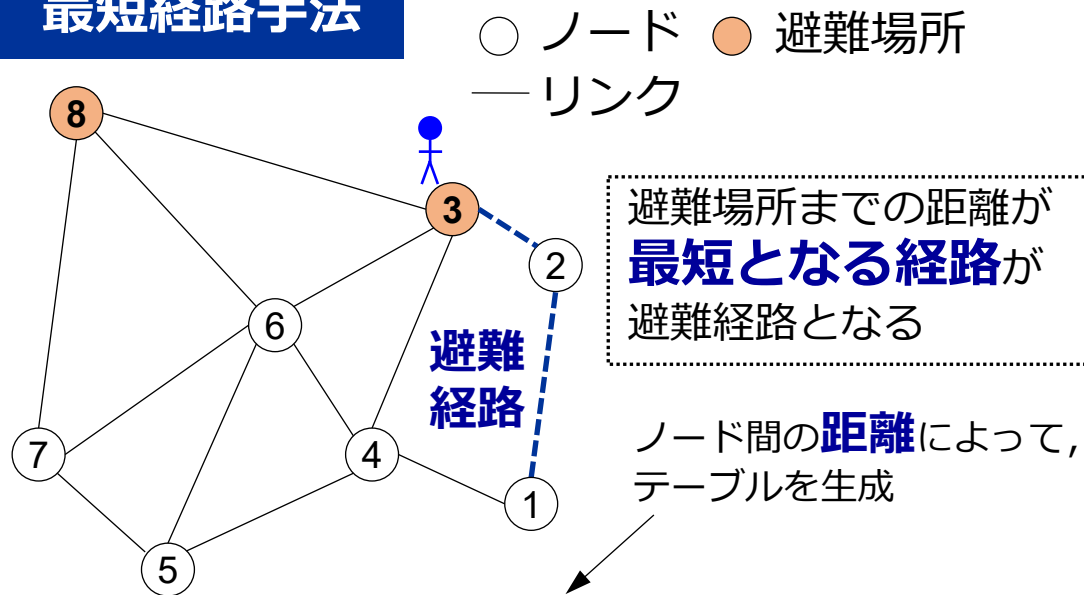
本手法

○ ノード ● 避難場所
— リンク



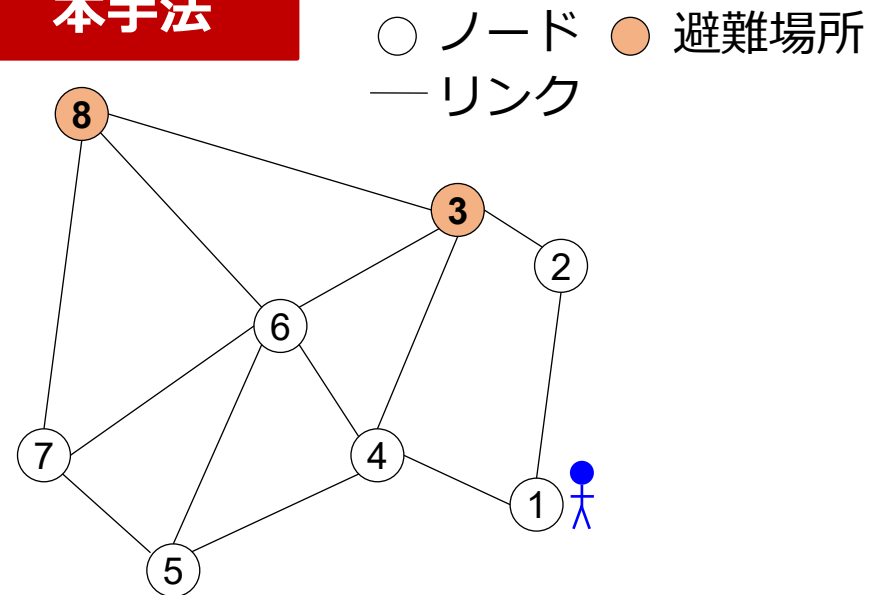
4. 最適避難経路の推定手法

最短経路手法



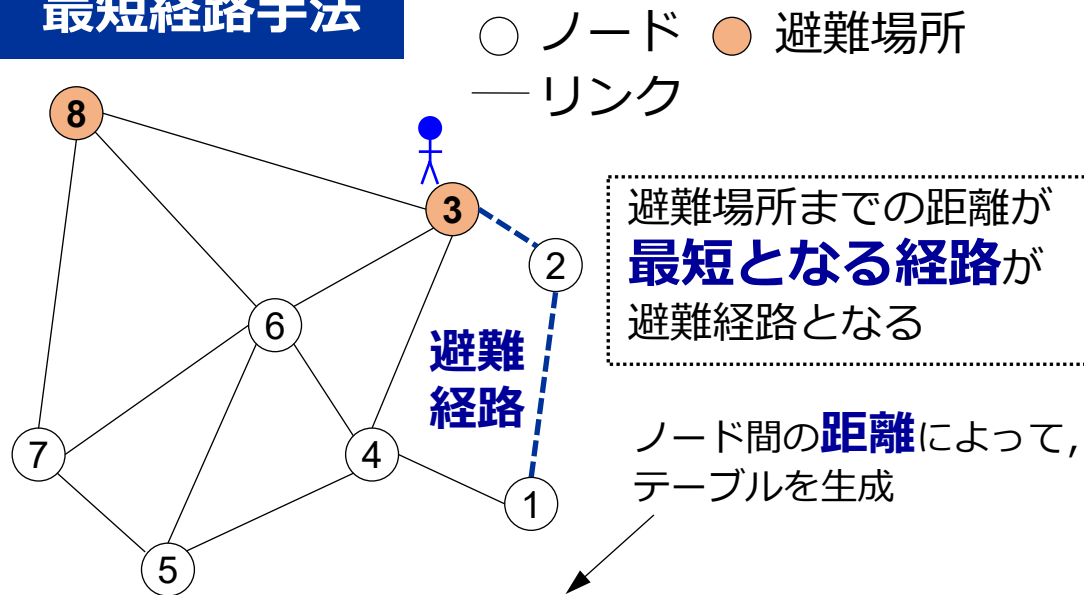
		ノード番号							
		1	2	3	4	5	6	7	8
ノード番号	1	—	248	—	155	—	—	—	—
	2	248	—	91	—	—	—	—	—
	3	—	91	—	276	—	212	—	445
	4	155	—	276	—	244	145	—	—
	5	—	—	—	244	—	289	156	—
	6	—	—	212	145	289	—	297	314
	7	—	—	—	—	156	297	—	382
	8	—	—	445	—	—	314	382	—

本手法



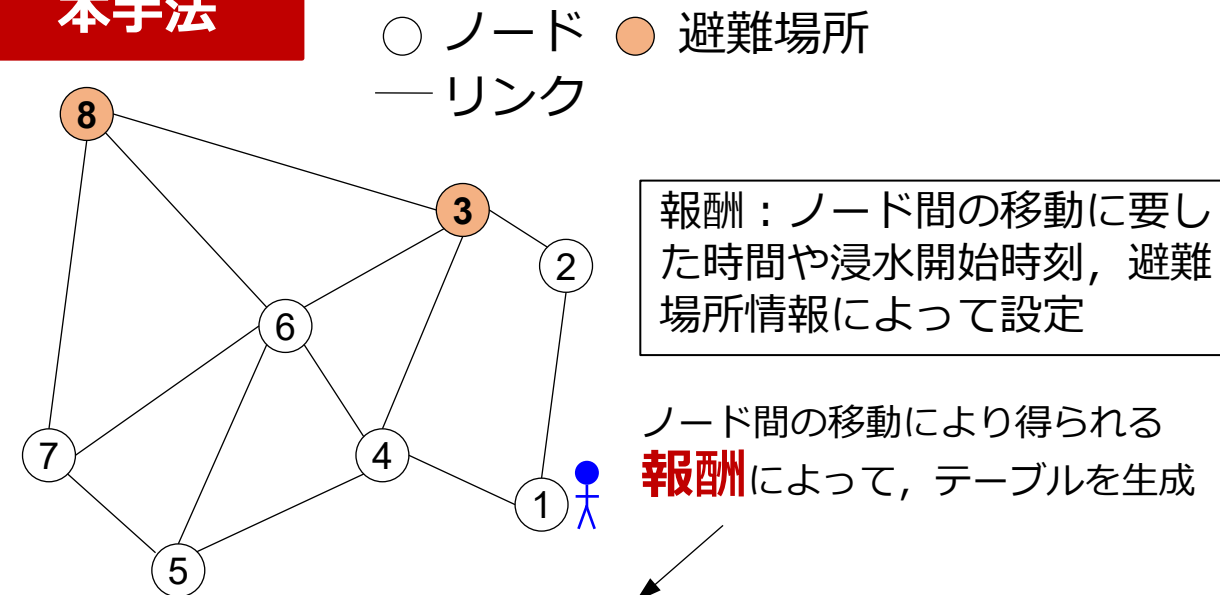
4. 最適避難経路の推定手法

最短経路手法



		ノード番号							
		1	2	3	4	5	6	7	8
ノード番号	1	—	248	—	155	—	—	—	—
	2	248	—	91	—	—	—	—	—
	3	—	91	—	276	—	212	—	445
	4	155	—	276	—	244	145	—	—
	5	—	—	—	244	—	289	156	—
	6	—	—	212	145	289	—	297	314
	7	—	—	—	—	156	297	—	382
	8	—	—	445	—	—	314	382	—

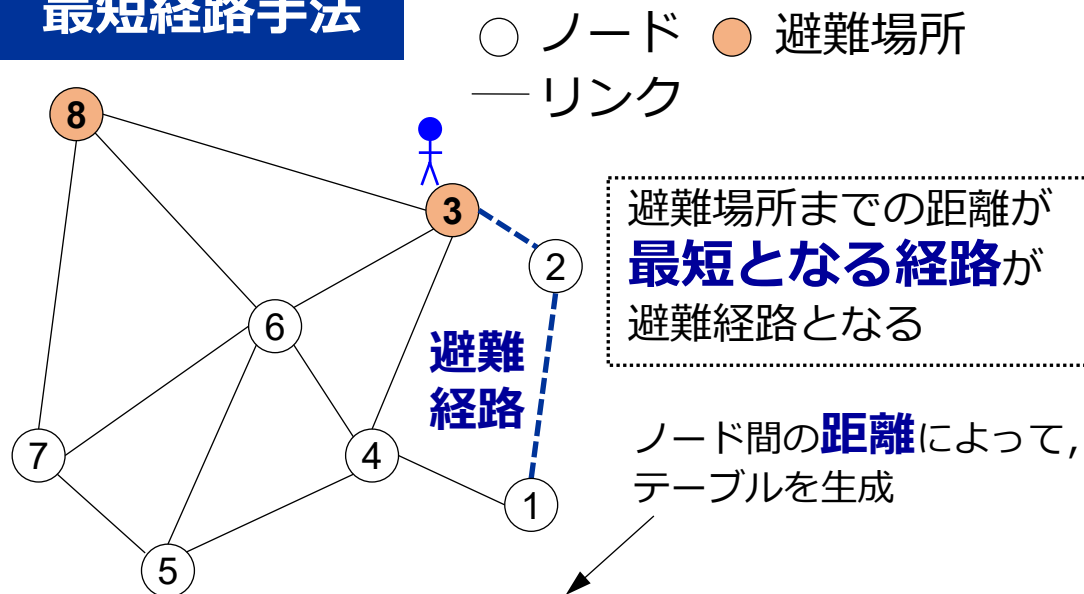
本手法



		ノード番号							
		1	2	3	4	5	6	7	8
ノード番号	1	—	10	—	60	—	—	—	—
	2	-20	—	40	—	—	—	—	—
	3	—	-30	10000	-50	—	-40	—	0
	4	-15	—	30	—	10	70	—	—
	5	—	—	—	-30	—	20	35	—
	6	—	—	5	-10	-15	—	5	80
	7	—	—	—	—	-20	40	—	50
	8	—	—	-10	—	—	-25	-50	10000

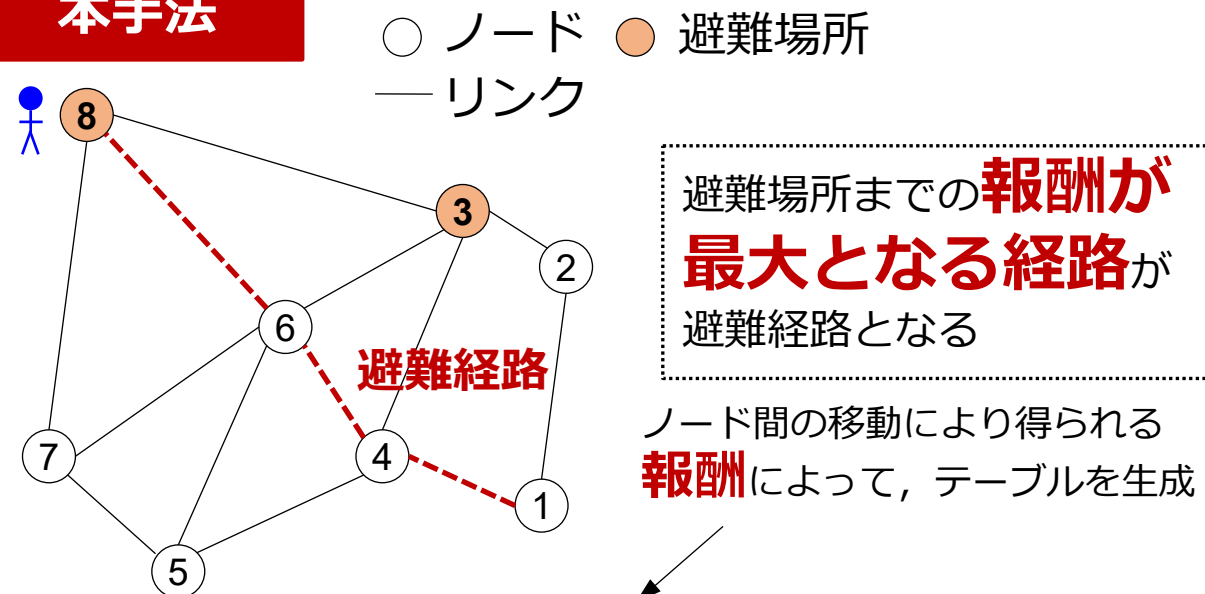
4. 最適避難経路の推定手法

最短経路手法



		ノード番号							
		1	2	3	4	5	6	7	8
ノード番号	1	—	248	—	155	—	—	—	—
	2	248	—	91	—	—	—	—	—
	3	—	91	—	276	—	212	—	445
	4	155	—	276	—	244	145	—	—
	5	—	—	—	244	—	289	156	—
	6	—	—	212	145	289	—	297	314
	7	—	—	—	—	156	297	—	382
	8	—	—	445	—	—	314	382	—

本手法



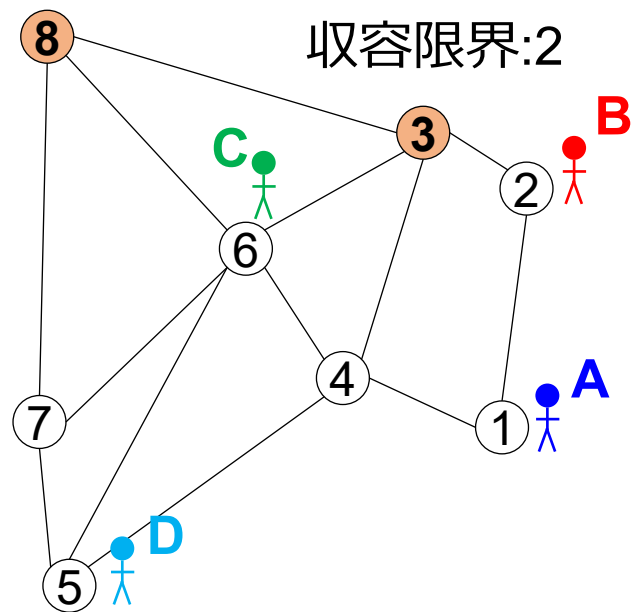
		ノード番号							
		1	2	3	4	5	6	7	8
ノード番号	1	—	10	—	60	—	—	—	—
	2	-20	—	40	—	—	—	—	—
	3	—	-30	10000	-50	—	-40	—	0
	4	-15	—	30	—	10	70	—	—
	5	—	—	—	-30	—	20	35	—
	6	—	—	5	-10	-15	—	5	80
	7	—	—	—	—	-20	40	—	50
	8	—	—	-10	—	—	-25	-50	10000

4. 最適避難経路の推定手法

① 基礎報酬表の作成

○ ノード ● 避難場所
— リンク

収容限界:100



各ノードの浸水開始時刻，各リンクを通過するのに要する時間（一定速度1.0m/sで計算）を用いてノード間の移動によって得られる報酬を，避難場所ノードには避難場所にたどり着くことで得られる報酬を設定することで，道路ネットワークを**報酬テーブル化**

		ノード番号							
		1	2	3	4	5	6	7	8
ノード番号	1	—	10	—	60	—	—	—	—
	2	-20	—	40	—	—	—	—	—
	3	—	-30	10000	-50	—	-40	—	0
	4	-15	—	30	—	10	70	—	—
	5	—	—	—	-30	—	20	35	—
	6	—	—	5	-10	-15	—	5	80
	7	—	—	—	—	-20	40	—	50
	8	—	—	-10	—	—	-25	-50	10000

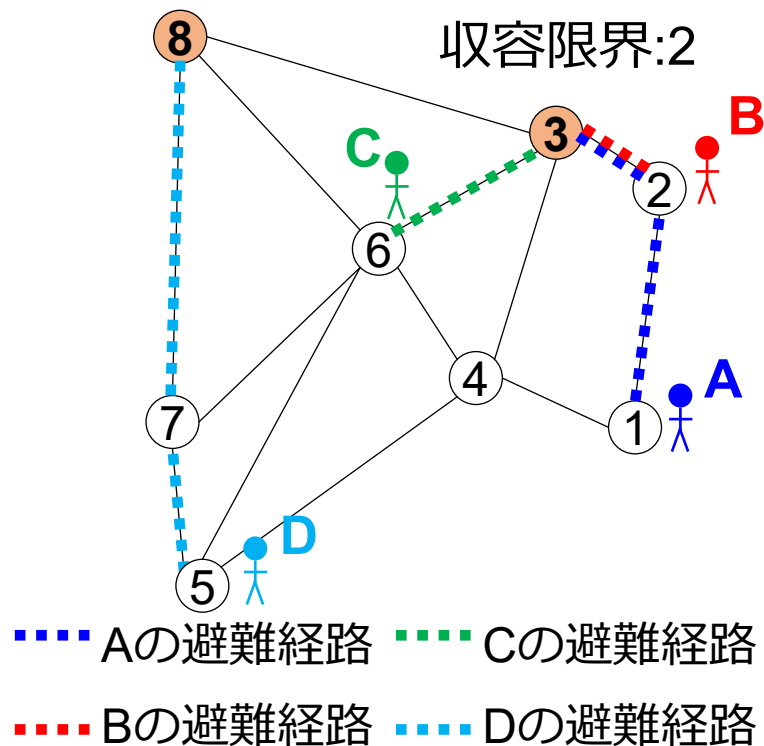
4. 最適避難経路の推定手法

② 最短経路の計算

最初の計算では、全避難者が**最短経路避難**を行うことを仮定する

○ ノード ● 避難場所
— リンク

収容限界:100



		ノード番号							
		1	2	3	4	5	6	7	8
ノード番号	1	—	10	—	60	—	—	—	—
	2	-20	—	40	—	—	—	—	—
	3	—	-30	10000	-50	—	-40	—	0
	4	-15	—	30	—	10	70	—	—
	5	—	—	—	-30	—	20	35	—
	6	—	—	5	-10	-15	—	5	80
	7	—	—	—	—	-20	40	—	50
	8	—	—	-10	—	—	-25	-50	10000

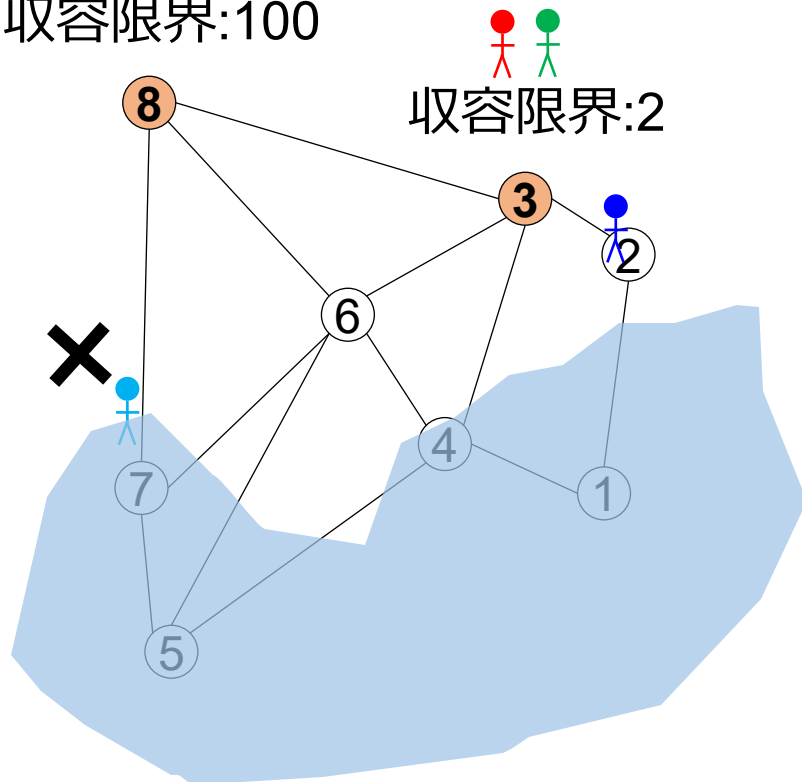
4. 最適避難経路の推定手法

③避難シミュレーションの実行

最短経路の仮定のもと、避難シミュレーションを実施する

○ ノード ● 避難場所
— リンク

収容限界:100



		ノード番号							
		1	2	3	4	5	6	7	8
ノード番号	1	—	10	—	60	—	—	—	—
	2	-20	—	40	—	—	—	—	—
	3	—	-30	10000	-50	—	-40	—	0
	4	-15	—	30	—	10	70	—	—
	5	—	—	—	-30	—	20	35	—
	6	—	—	5	-10	-15	—	5	80
	7	—	—	—	—	-20	40	—	50
	8	—	—	-10	—	—	-25	-50	10000

4. 最適避難経路の推定手法

③ 避難シミュレーションの実行

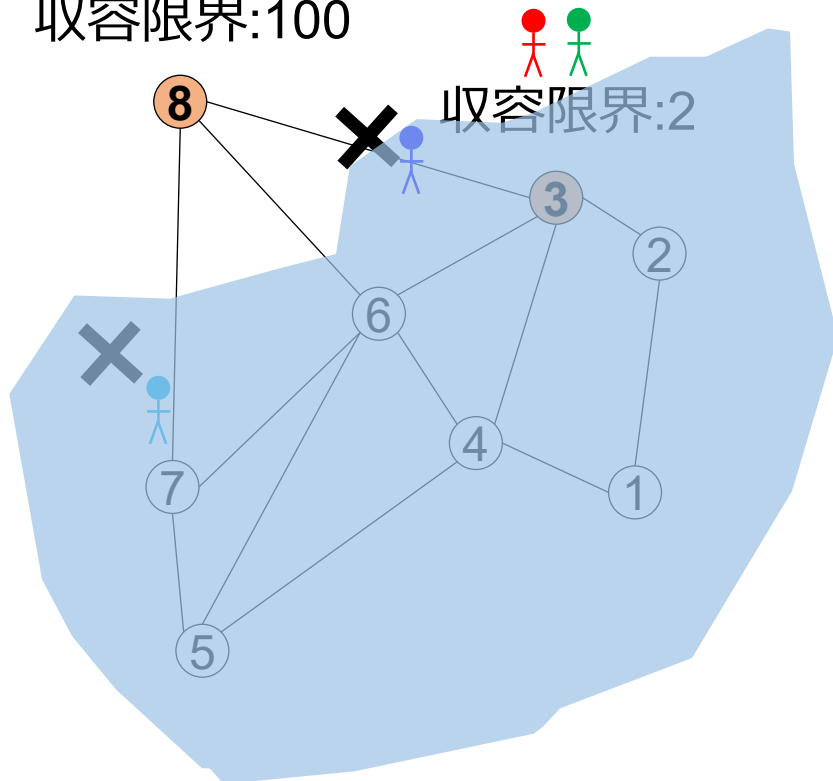
最短経路の仮定のもと、避難シミュレーションを実施する

○ ノード ● 避難場所
— リンク

避難者A・避難者Dが被災

報酬テーブルの更新

収容限界:100



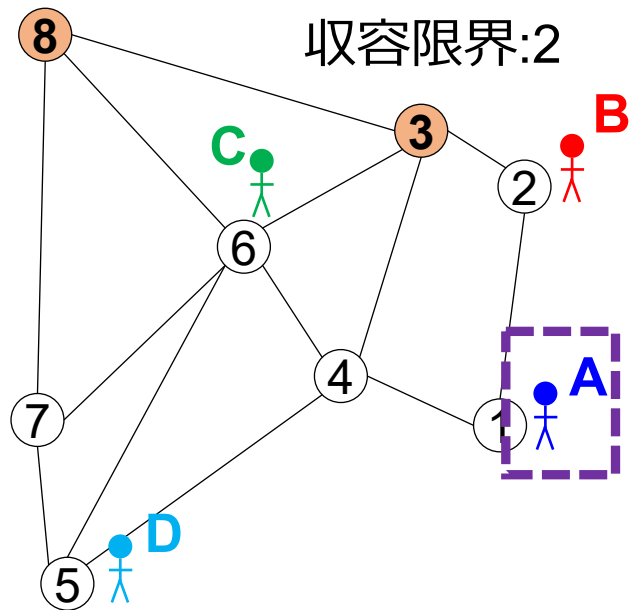
		ノード番号							
		1	2	3	4	5	6	7	8
ノード番号	1	-	10	-	60	-	-	-	-
	2	-20	-	40	-	-	-	-	-
	3	-	-30	10000	-50	-	-40	-	0
	4	-15	-	30	-	10	70	-	-
	5	-	-	-	-30	-	20	35	-
	6	-	-	5	-10	-15	-	5	80
	7	-	-	-	-	-20	40	-	50
	8	-	-	-10	-	-	-25	-50	10000

4. 最適避難経路の推定手法

④ 報酬表の更新

○ ノード ● 避難場所
— リンク

収容限界:100



被災した避難者の**報酬テーブルを更新**する

具体的には…ノード間の移動に実際に要した時間を用いて報酬を更新，収容限界であった避難場所の報酬をゼロに更新

避難者Aの新たな報酬テーブル

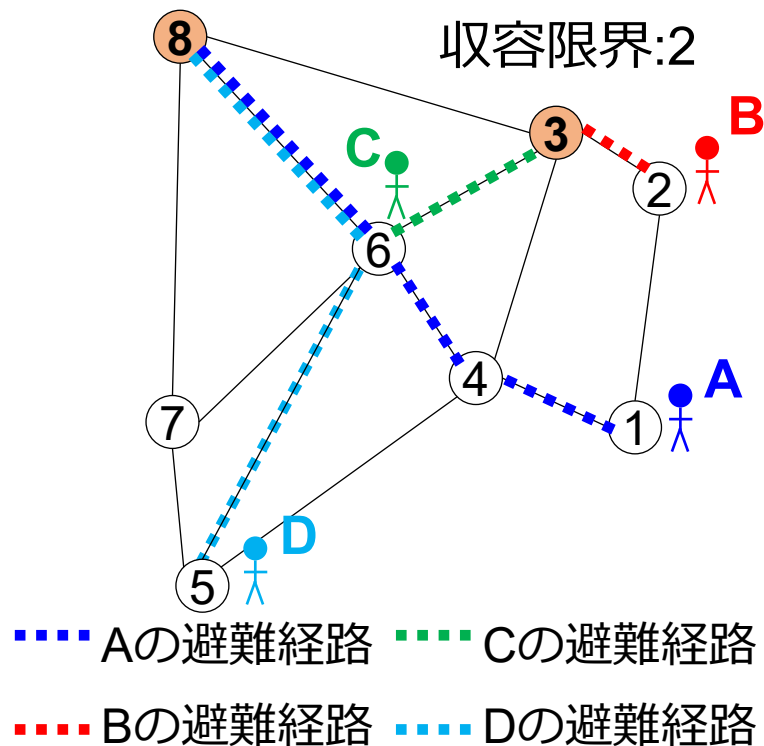
		ノード番号							
		1	2	3	4	5	6	7	8
避難者A	1	—	5	—	60	—	—	—	—
	2	-20	—	30	—	—	—	—	—
	3	—	-30	0	-50	—	-40	—	0
	4	-15	—	30	—	10	70	—	—
	5	—	—	—	-30	—	20	35	—
	6	—	—	5	-10	-15	—	5	80
	7	—	—	—	—	-20	40	—	50
	8	—	—	-10	—	—	-25	-50	10000

4. 最適避難経路の推定手法

⑤ 報酬最大経路の推定

○ ノード ● 避難場所
— リンク

収容限界:100



被災した避難者の**避難経路を更新**する

報酬テーブルを基に**Q学習（強化学習）**を行い，被災した避難者の初期位置から最大の報酬が得られる経路を高速に推定

避難者Aの新たな報酬テーブル

		ノード番号							
		1	2	3	4	5	6	7	8
避難者A	1	—	5	—	60	—	—	—	—
	2	-20	—	30	—	—	—	—	—
	3	—	-30	0	-50	—	-40	—	0
	4	-15	—	30	—	10	70	—	—
	5	—	—	—	-30	—	20	35	—
	6	—	—	5	-10	-15	—	5	80
	7	—	—	—	—	-20	40	—	50
	8	—	—	-10	—	—	-25	-50	10000

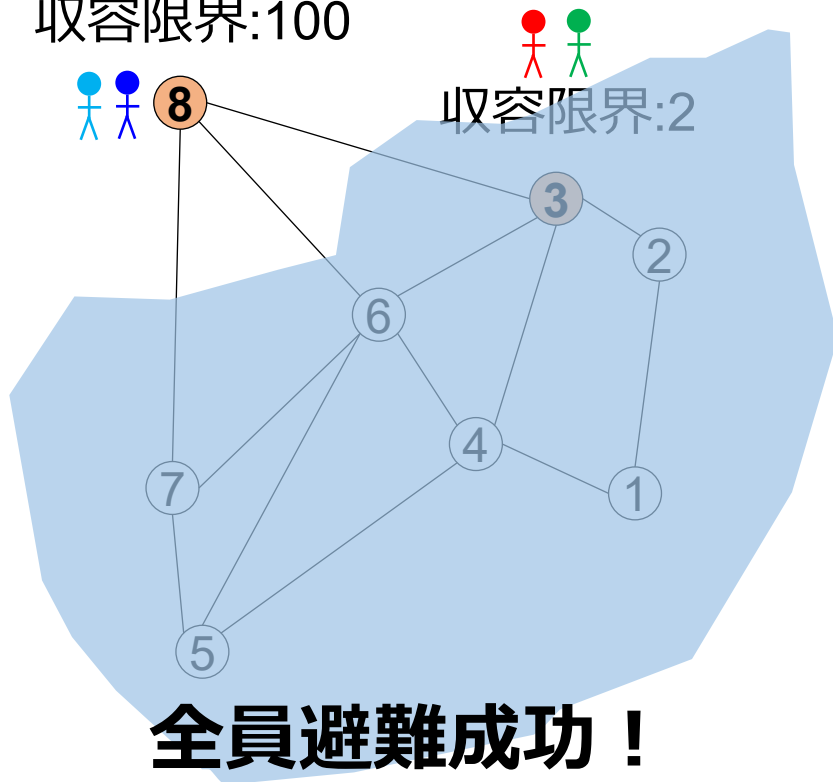
4. 最適避難経路の推定手法

⑥ 避難シミュレーションの実行

新たな避難経路の元，避難シミュレーションを実施する

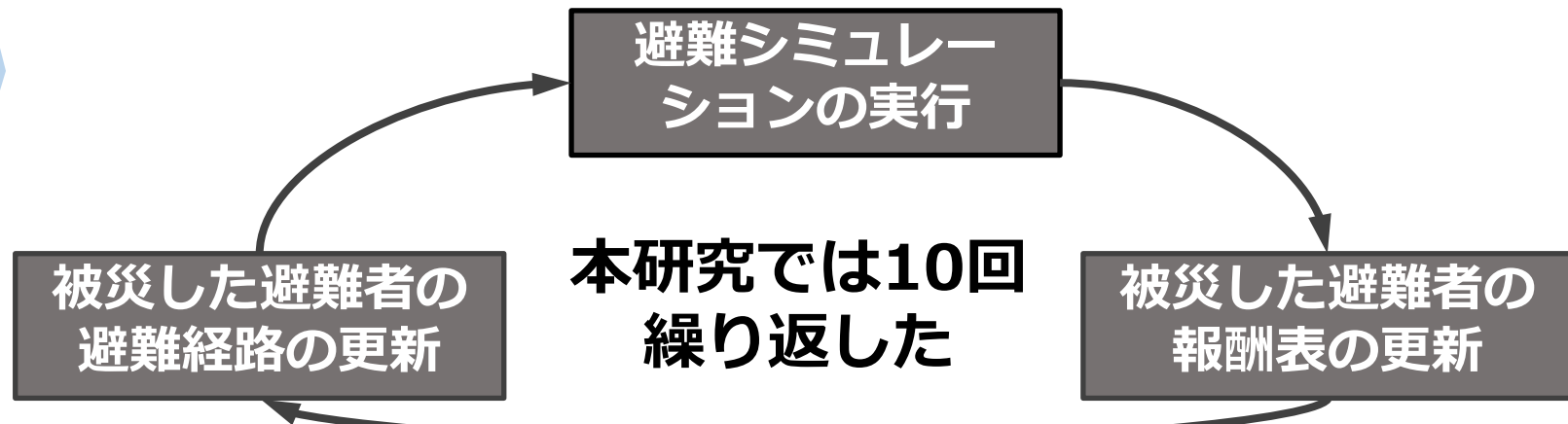
○ ノード ● 避難場所
— リンク

収容限界:100



実際には…

- 避難経路を変更する避難者が存在することで，混雑度が変化し，新たに被災する避難者が発生する可能性
- 避難経路を変更したとしても，被災する避難者が発生する可能性



4. 最適避難経路の推定手法（Q学習）

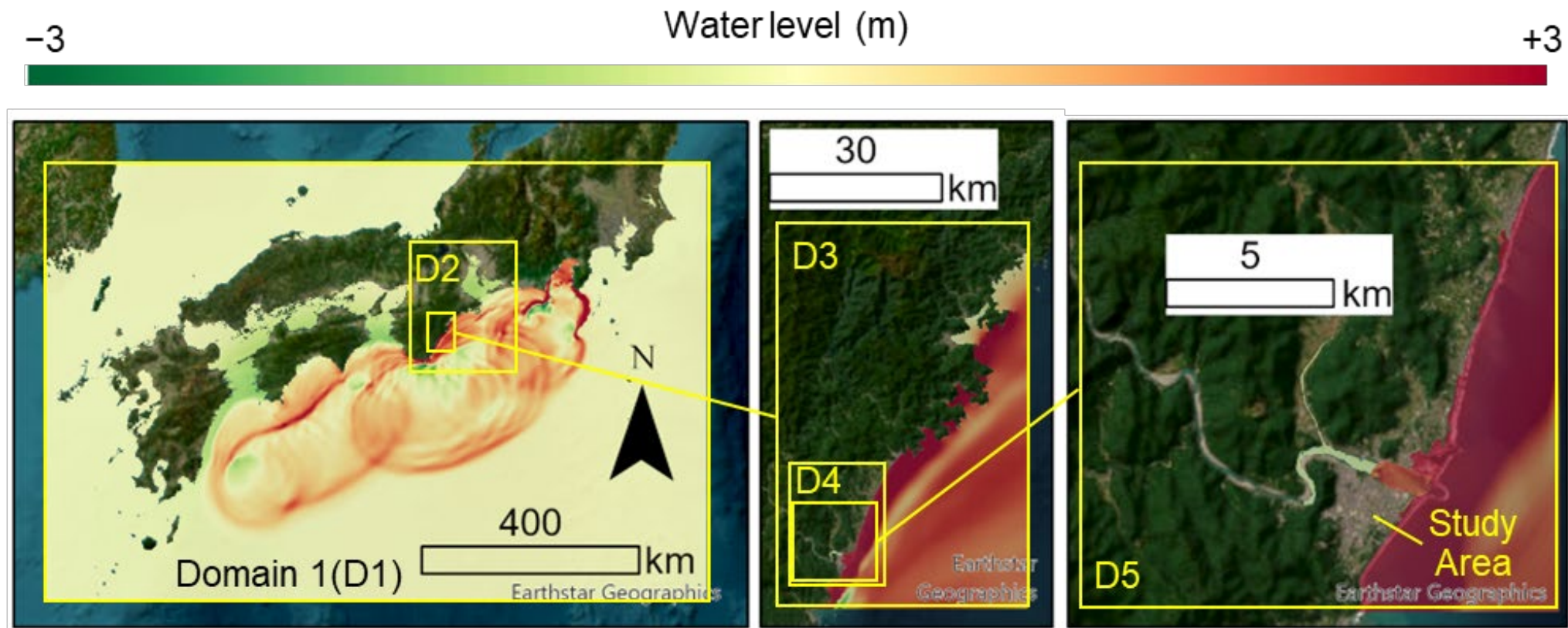
- 本研究では、更新した報酬表を基に、**Q学習**を用いて報酬が最大となる経路を推定した。
- Q学習は、以下の式を用いて定義されるQ関数（ある状態 s においてある行動 a を取った場合に対象エージェントが受け取れる総報酬の期待値）を更新する強化学習の手法である。

$$Q(s, a) \leftarrow (1 - \alpha)Q(s, a) + \alpha \left(r(s, a) + \gamma \max_{a'} Q(s', a') \right)$$

- ここで、 $r(s, a)$ はある状態 s からある行動 a をとった場合に得られる報酬、 γ は割引率（0.90と設定）、 α は学習率（0.01と設定）である。
- 本研究では、10000回の更新を行うことでQ関数を推定した。このとき、 ϵ -greedy法を用いて効率的にQ関数を推定した。
- 各状態（各ノード）で最大のQ関数を与える行動（次に向かうノード）を、初期状態（初期ノード）から避難場所に到達するまで抽出し続けることで、報酬が最大となる経路を推定した。

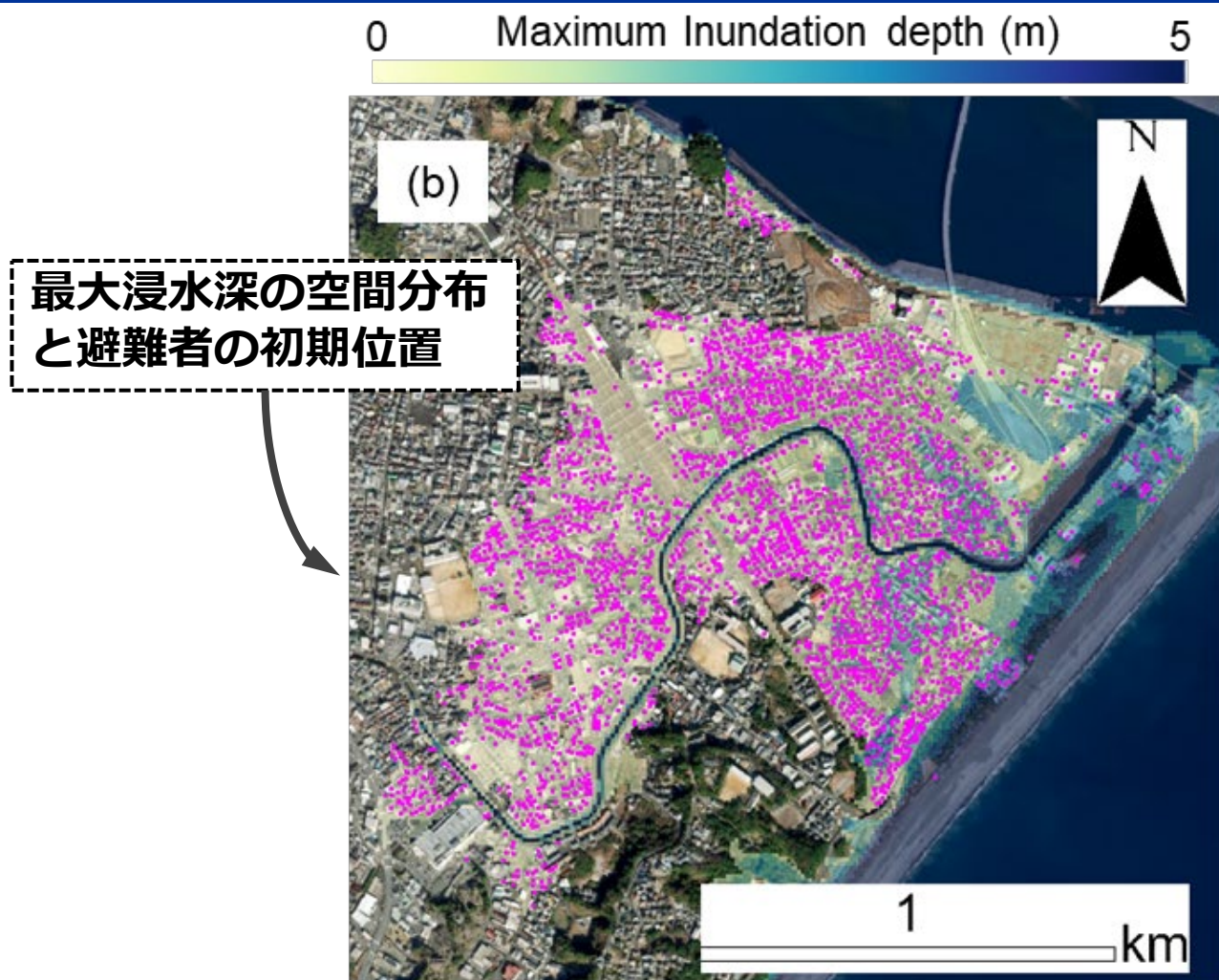
5. 解析対象地域

- 和歌山県の沿岸都市に適用（南海トラフ巨大地震津波の発生を仮定）
- 避難者数：6,553人（国勢調査より年齢分布を設定）



地震発生5分後の水位分布（対象地域には地震発生後約30分で最大波が来襲）

5. 解析対象地域



Initial locations of evacuees: ●



Node: ●

Node (outdoor evacuation destination): ●

Node (evacuation shelter): ●

Link: —

6. 解析シナリオ1

□ 被災した避難者の報酬表更新時における報酬の与え方：6ケース

◆ ノード間の移動により得られる報酬

(1) T : (目標ノードの浸水開始時刻) - (ノード間の移動に要した時間)

(2) DT : (目標ノードと現在ノードの浸水開始時刻の差) - (ノード間の移動に要した時間)

* (2)の方が、ノード間の移動時間（すなわち混雑度の影響）がより大きく報酬に反映される

◆ 避難場所に到着した時に得られる報酬：(1) 100, (2) 1000, (3) 10000

□ 避難開始時刻：3ケース

(1) 地震発生**5分後**に一斉避難, (2) **10分後**に一斉避難, (3) **15分後**に一斉避難

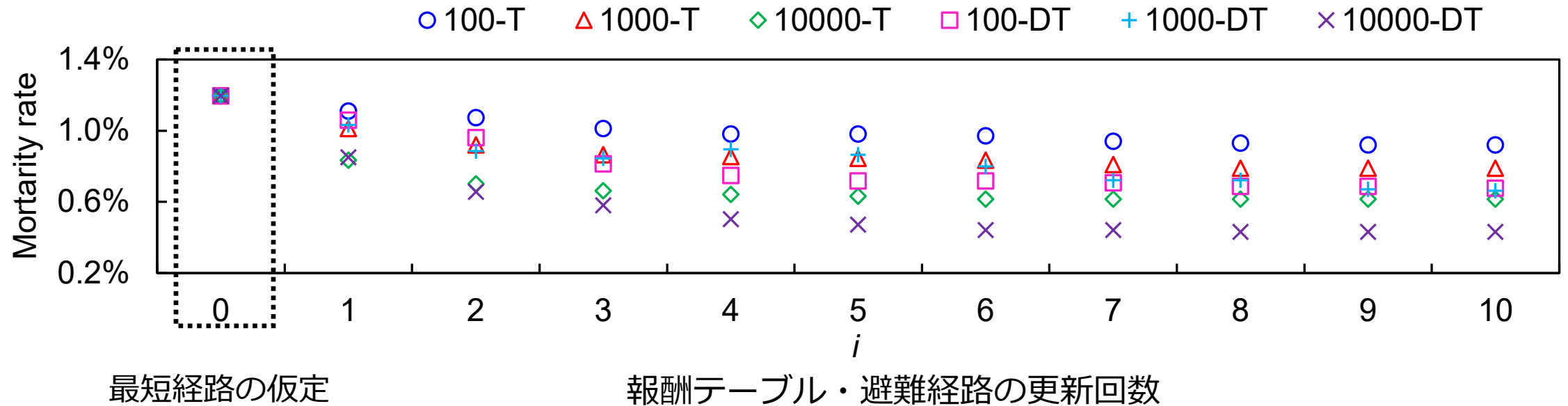
→ 組み合わせせて、合計18ケースの解析を実施

7. 解析結果：津波遭遇率の変化

(a) 地震発生**5分後**に一斉避難

100, 1000, 10000 : 避難場所到着時に得られる報酬

T : 浸水開始時間により報酬を設定 DT : 浸水開始時間の差により報酬を設定



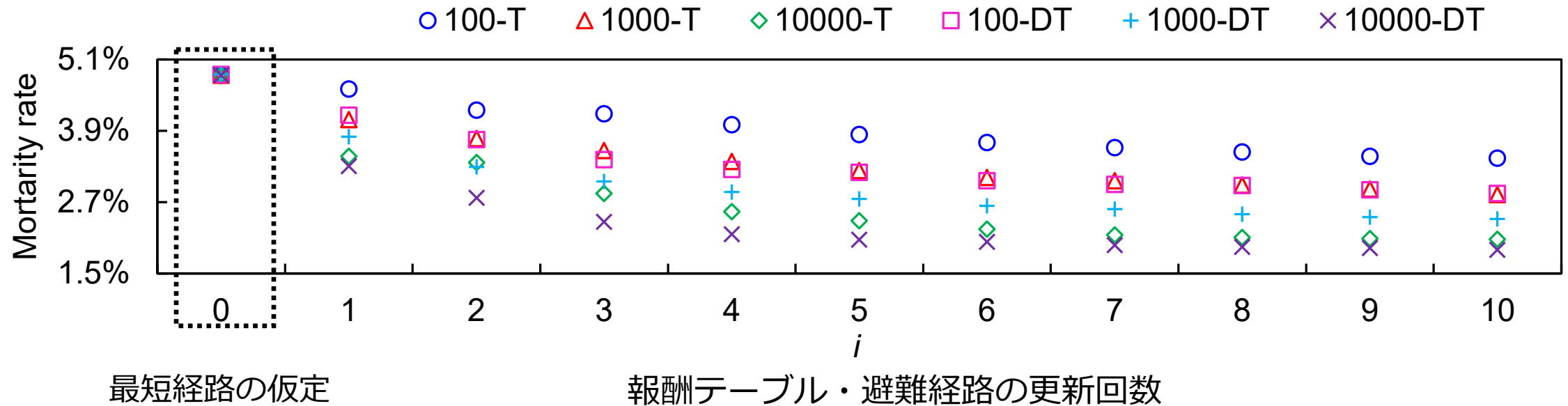
- 報酬の設定の仕方によらず，避難経路を更新するに従い，最短経路の仮定と比較して津波遭遇率が減少（**本手法の有効性**）
- 避難場所に到達した際の報酬を大きく設定するほど（10000），ノード間の移動によって得られる報酬を浸水開始時間の差を用いて設定する（DT）ほど，津波遭遇率の低減効果が大きい（**報酬設定の重要性**）

7. 解析結果：津波遭遇率の変化

(b) 地震発生10分後に一斉避難

100, 1000, 10000：避難場所到着時に得られる報酬

T：浸水開始時間により報酬を設定 DT：浸水開始時間の差により報酬を設定



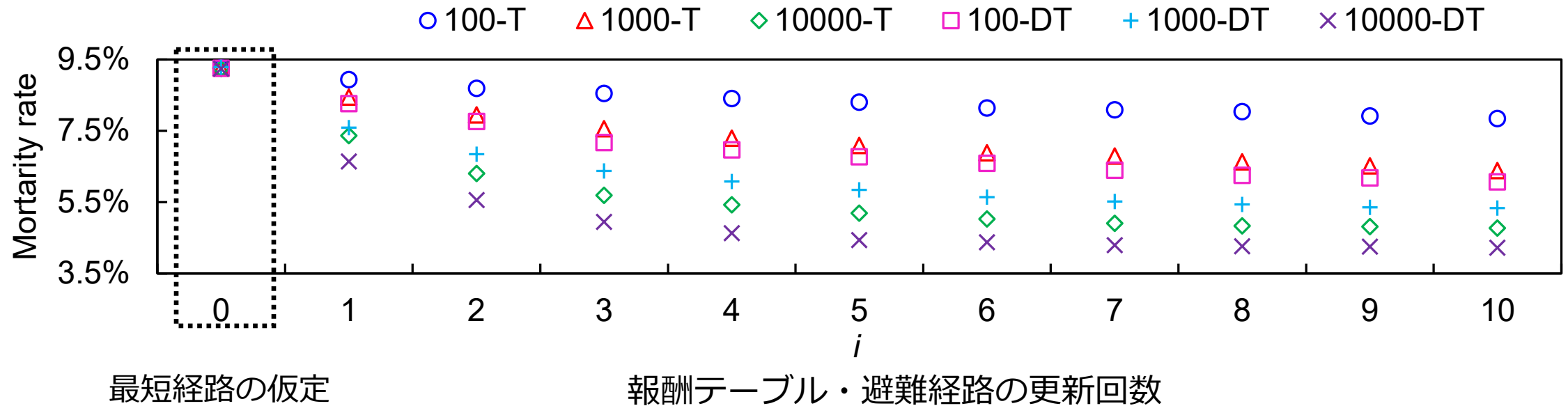
- 報酬の設定の仕方によらず，避難経路を更新するに従い，最短経路の仮定と比較して津波遭遇率が減少（**本手法の有効性**）
- 避難場所に到達した際の報酬を大きく設定するほど（10000），ノード間の移動によって得られる報酬を浸水開始時間の差を用いて設定する（DT）ほど，津波遭遇率の低減効果が大きい（**報酬設定の重要性**）

7. 解析結果：津波遭遇率の変化

(c) 地震発生15分後に一斉避難

100, 1000, 10000：避難場所到着時に得られる報酬

T：浸水開始時間により報酬を設定 DT：浸水開始時間の差により報酬を設定



- 報酬の設定の仕方によらず，避難経路を更新するに従い，最短経路の仮定と比較して津波遭遇率が減少（**本手法の有効性**）
- 避難場所に到達した際の報酬を大きく設定するほど（10000），ノード間の移動によって得られる報酬を浸水開始時間の差を用いて設定する（DT）ほど，津波遭遇率の低減効果が大きい（**報酬設定の重要性**）

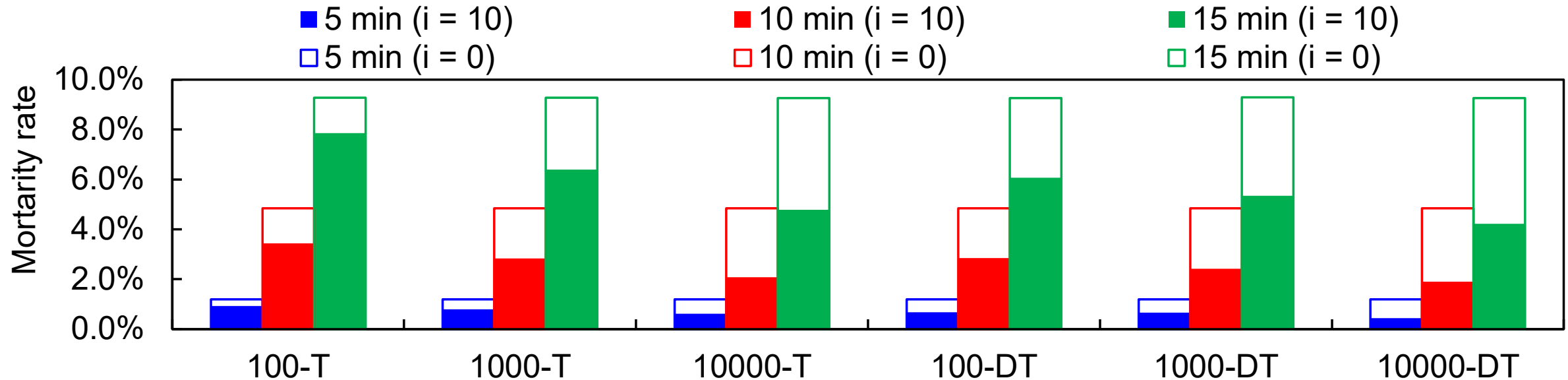
7. 解析結果：最短経路($i=0$)と本手法($i=10$)の津波遭遇率の比較

全ケースのまとめ

100, 1000, 10000：避難場所到着時に得られる報酬

T：浸水開始時間により報酬を設定 DT：浸水開始時間の差により報酬を設定

$i=0$ （最短経路）， $i=10$ （最適経路）



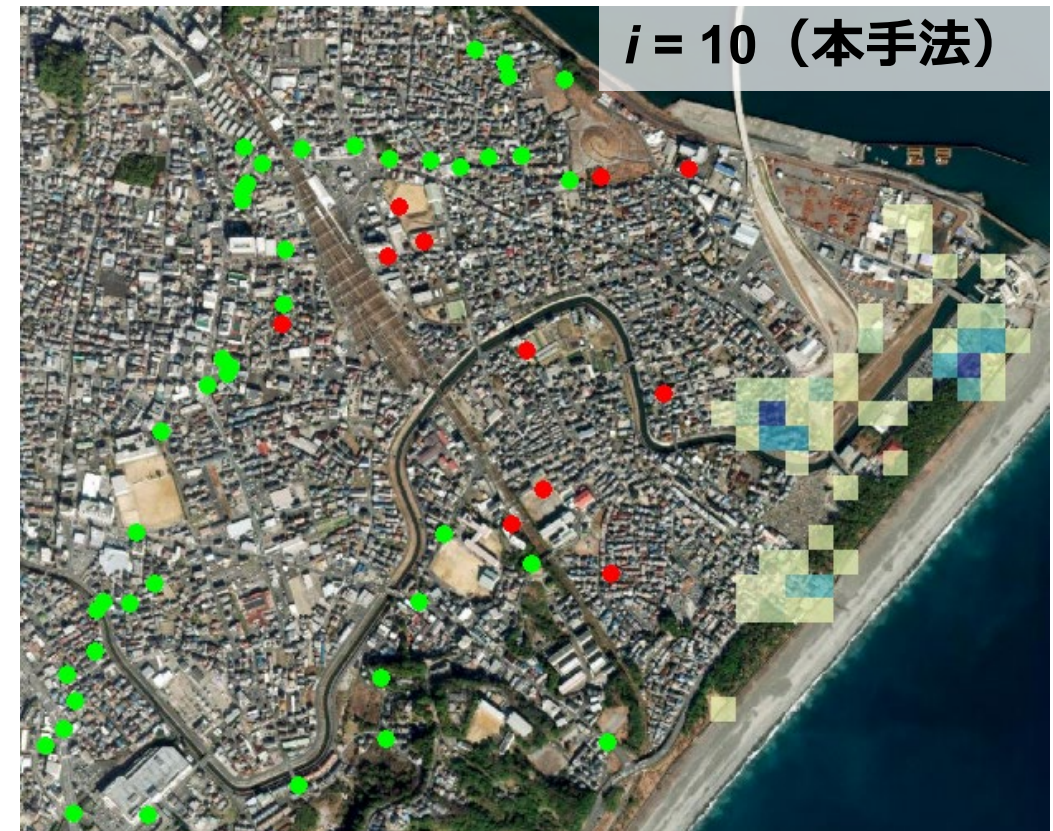
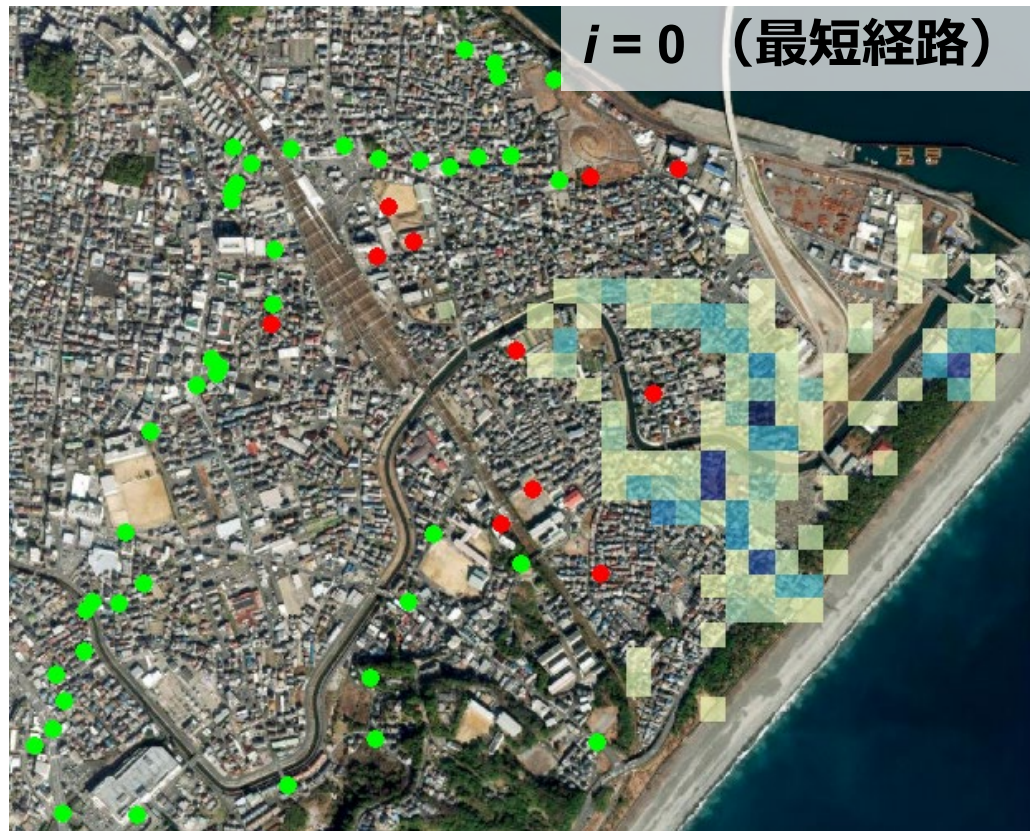
- 本手法の有効性・報酬設定の重要性を改めて確認
- 津波遭遇率を最も低減させたケース（10000-DT）では、最短経路の仮定と比較して、**40%~60%低減**させることができた

7. 解析結果：最短経路($i=0$)と本手法($i=10$)の津波遭遇者の空間分布の比較

地震発生10分後に一斉避難（10000-DT）

0 Estimated number of casualties 11

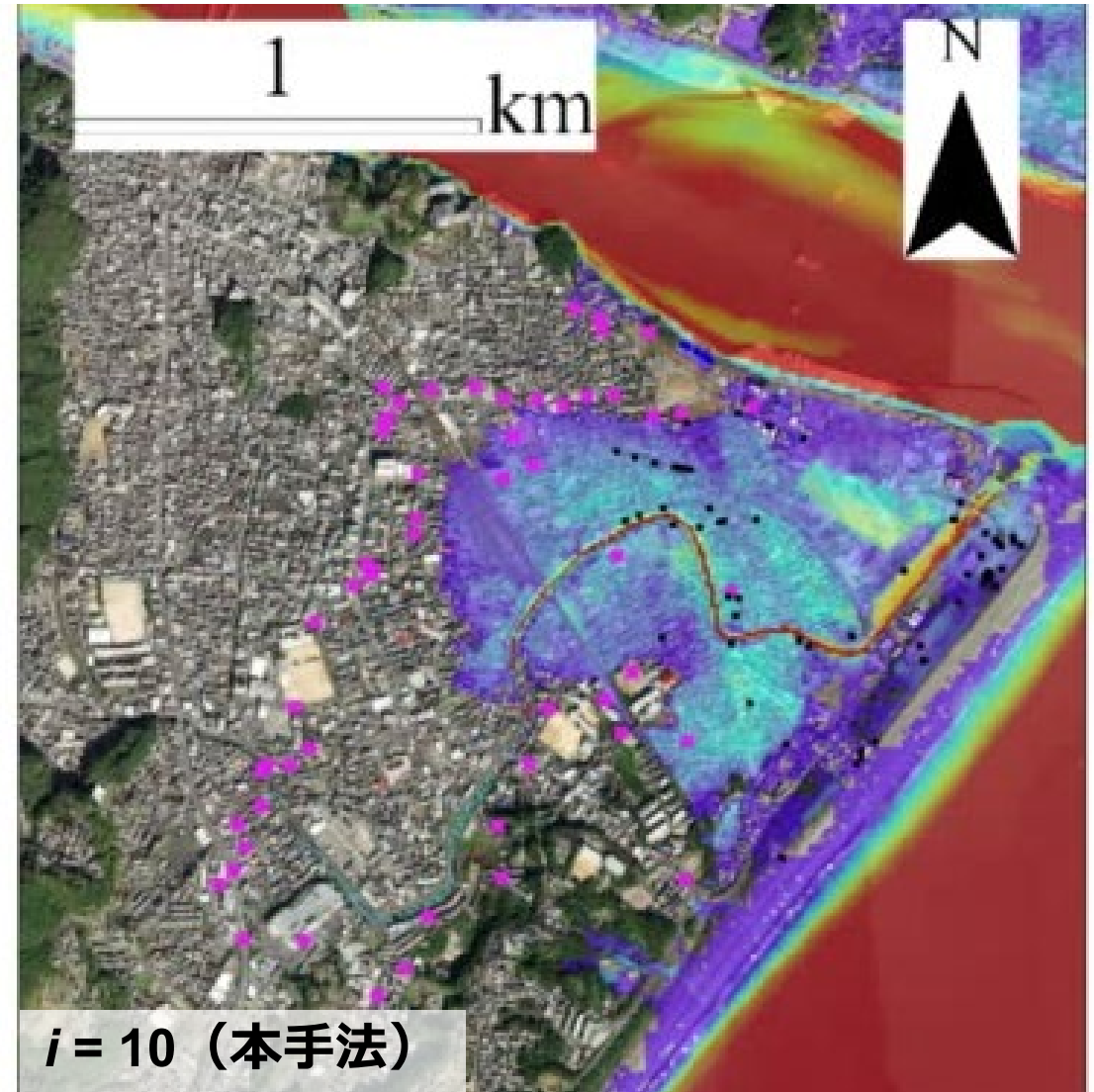
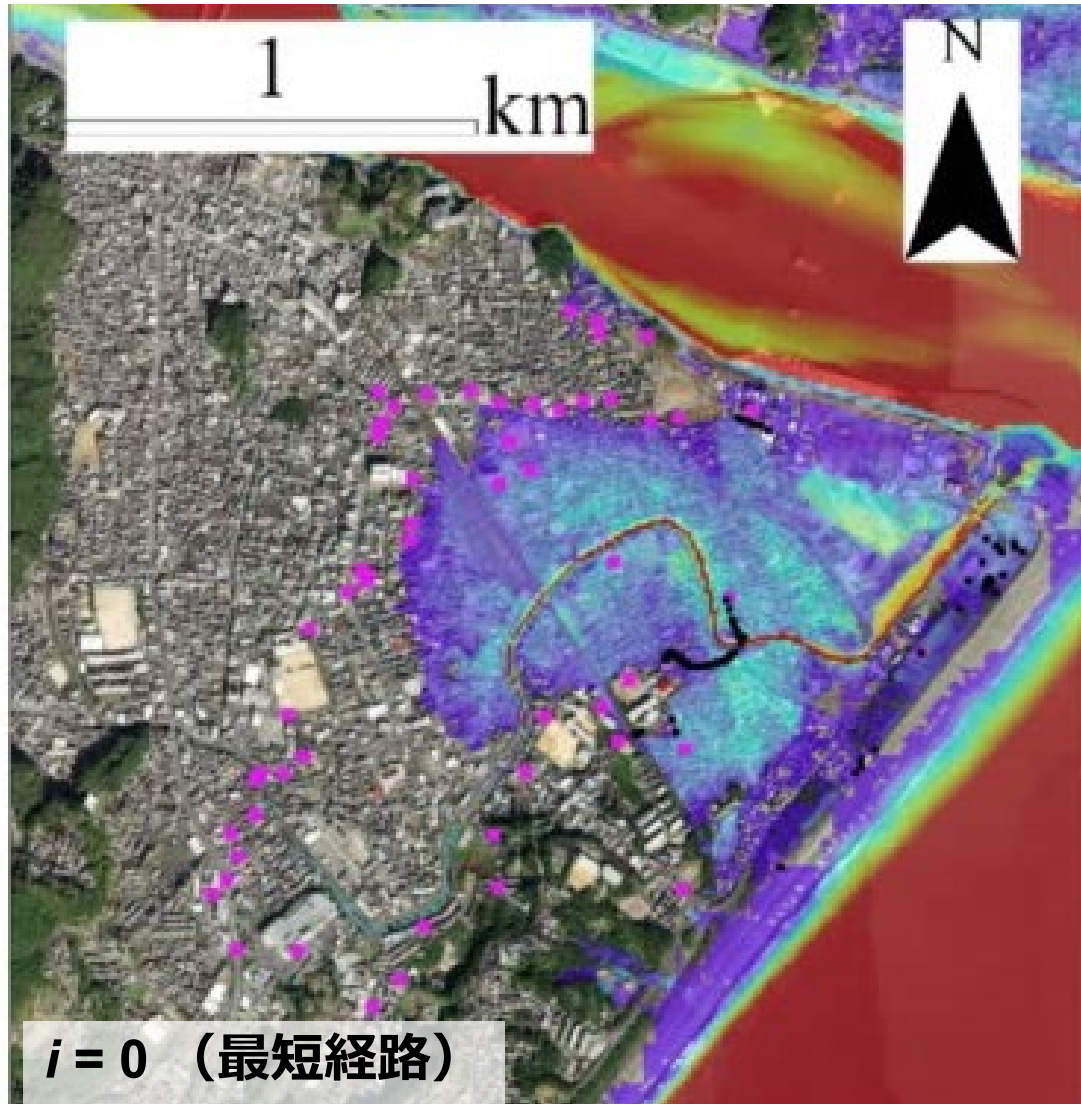
Outdoor evacuation destination: ●
Evacuation shelter: ●



- 津波遭遇者の初期位置を空間分布化，メッシュ内の津波遭遇者数で着色
- 町の中心部から避難を開始し津波に遭遇した避難者の数が減少したことが確認できる

7. 解析結果：シミュレーション動画の比較

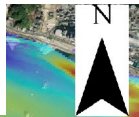
地震発生10分後に一斉避難（10000-DT）



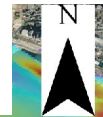
8. 解析シナリオ2

□ 避難者の初期位置：3ケース

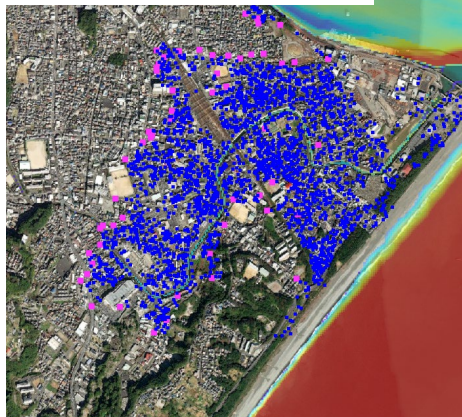
建物から避難
(Distribution1)



道路上から避難
(Distribution2)



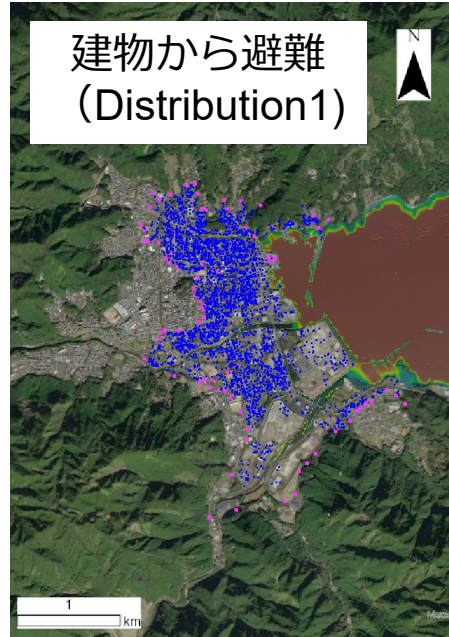
建物・道路上から避難
(Distribution3)



Study Area A

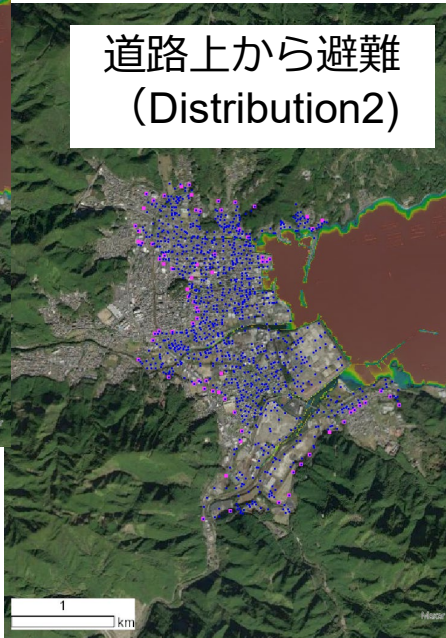
□ 異なる対象地域・避難者の初期位置：3ケース

建物から避難
(Distribution1)

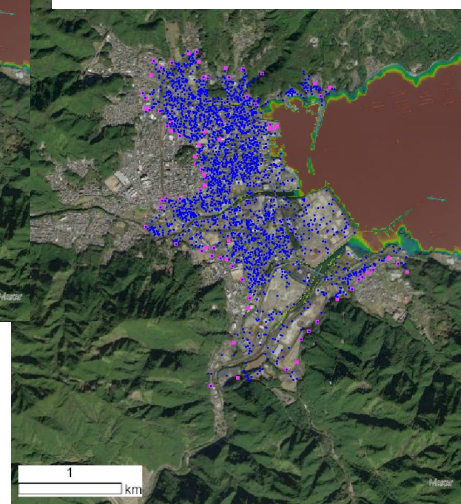


Study Area B

道路上から避難
(Distribution2)



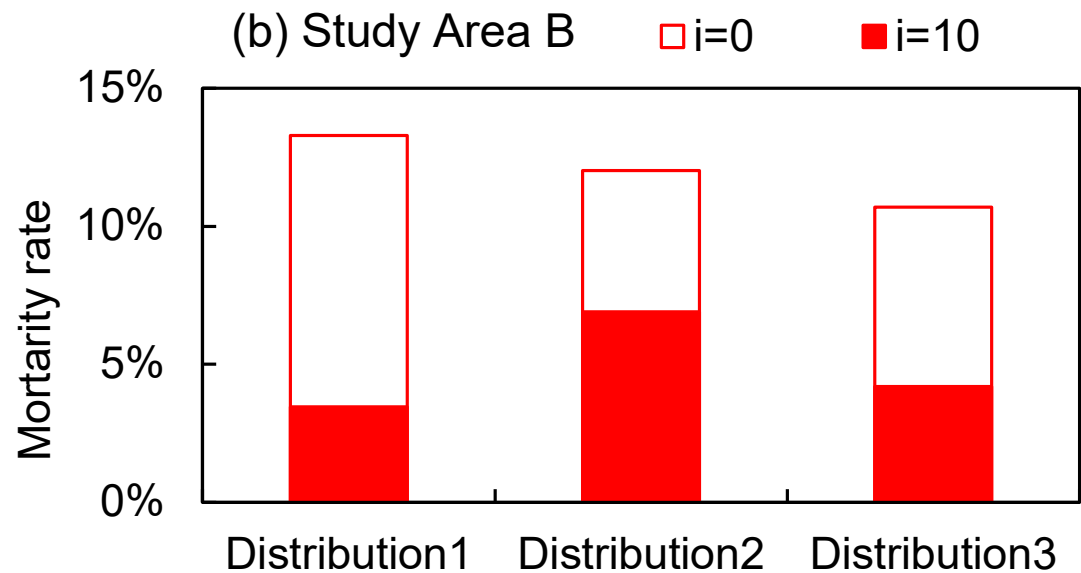
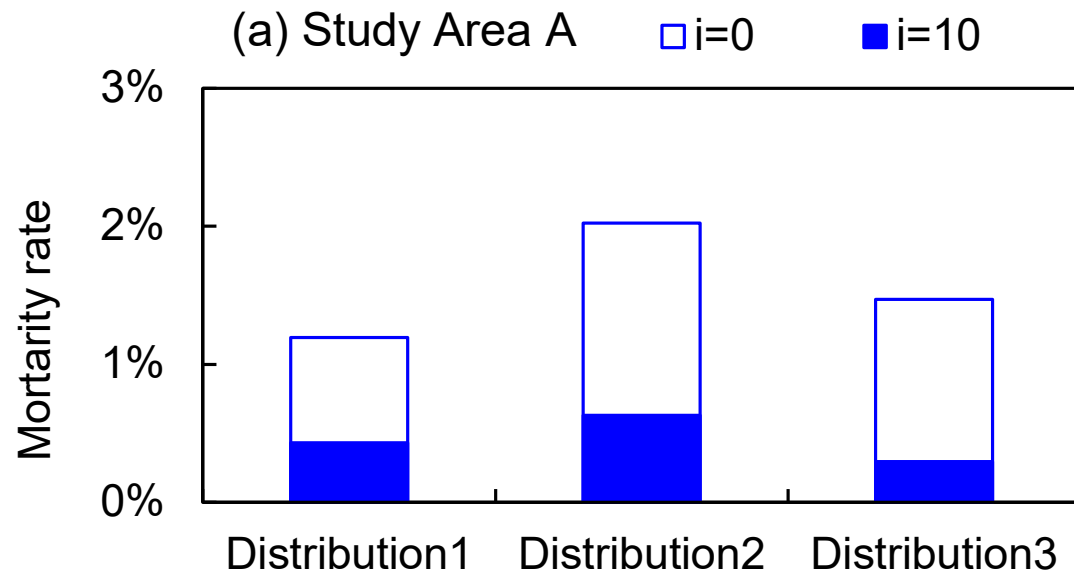
建物・道路上から避難
(Distribution3)



9. 解析結果：避難者の初期位置・対象地域の違いによる影響

地震発生5分後に一斉避難（10000-DT）

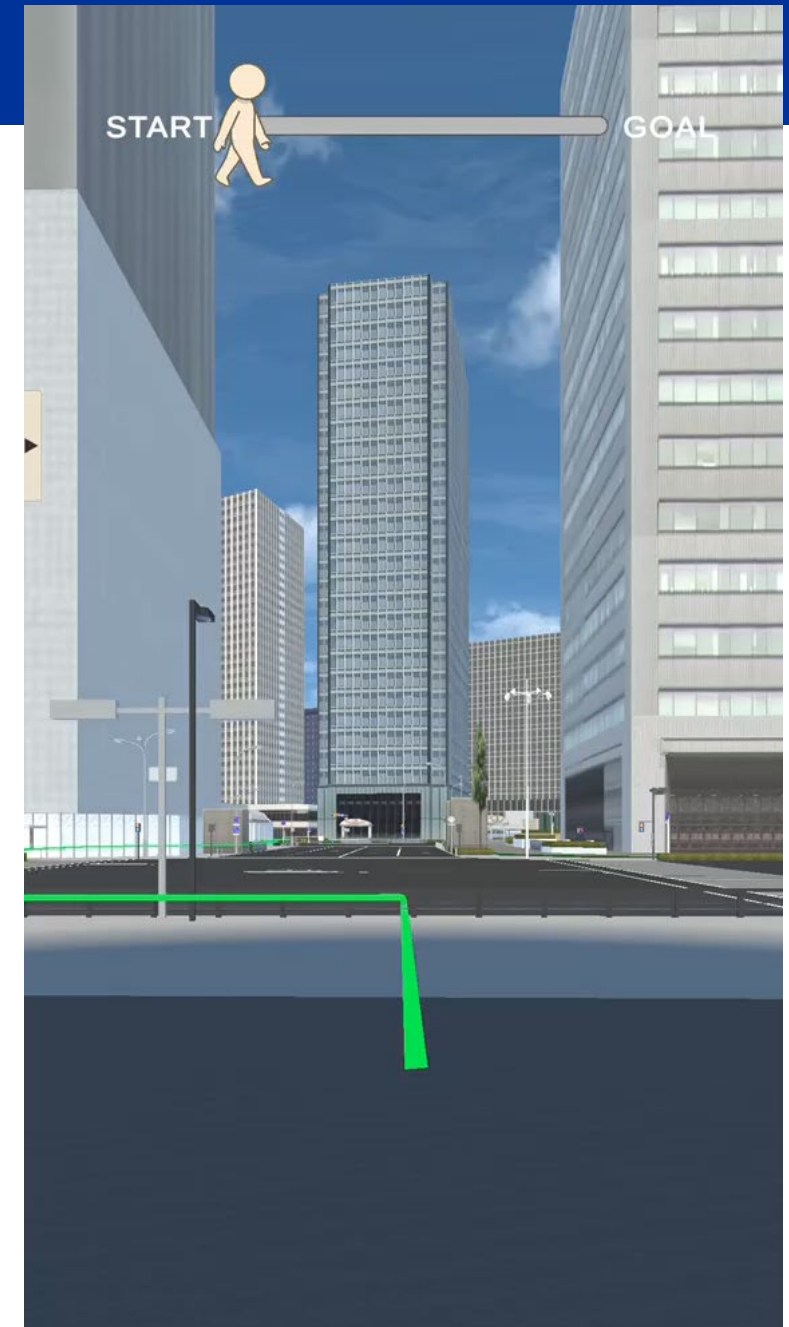
$i = 0$ （最短経路）, $i = 10$ （最適経路）



- 避難者の初期位置・対象地域によらず，本手法の適用により津波遭遇率が低下
- **本手法の有効性**を更に確認

10. 初年度の成果まとめ・2年度の予定

- 避難者一人ひとりの避難経路を最適化する（＝津波に遭遇しないようにする）手法を開発
- 最短経路の仮定を用いた場合と比較して、**津波遭遇率を大幅に低減**できることを確認
- 避難者の初期位置や、避難経路情報、津波による浸水開始時間が与えられれば、**自動的に避難者一人ひとりの避難経路を個別に最適化**することが可能
- 研究2年度は、研究対象地域を対象として3次元都市空間データの構築を行いつつ、最適避難経路を仮想体験できるシステムの開発を行う予定



参考文献

- Aldahlawi, R. Y., Akbari, V., & Lawson, G. 2024. A systematic review of methodologies for human behavior modelling and routing optimization in large-scale evacuation planning, *International Journal of Disaster Risk Reduction* 110: 104638.
- Kitamura, F., Inazu, D., Ikeya, T., & Okayasu, A. 2020. An allocating method of tsunami evacuation routes and refuges for minimizing expected casualties, *International Journal of Disaster Risk Reduction* 45: 101519.
- Mas, E., Adriano, B. & Koshimura, S. 2013. An integrated simulation of tsunami hazard and human evacuation in La punta Peru, *Journal of Disaster Research* 8(2): 285–295.
- Mizumura, T., Taguchi, H., & Nakamura, H. 2024. Confirming the safety improvement and evacuation time reduction effects by the method for evacuating inundated areas via the shortest possible route. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 101: 104252.
- Takabatake, T., Chenxi, D. H., Esteban, M., & Shibayama, T. 2022. Influence of road blockage on tsunami evacuation: a comparative study of three different coastal cities in Japan. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 68: 102684.
- Takabatake, T., Esteban, M., Nistor, I., Shibayama, T., & Nishizaki, S. 2020a. Effectiveness of hard and soft tsunami countermeasures on loss of life under different population scenarios. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 45: 101491.
- Takabatake, T., Fujisawa, K., Esteban, M., & Shibayama, T. 2020b. Simulated effectiveness of a car evacuation from a tsunami. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 47: 101532.
- Takabatake, T., Nistor, I., & St-Germain, P. 2020c. Tsunami evacuation simulation for the District of Tofino, Vancouver Island, Canada. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 48: 101573.
- Takabatake, T., Shibayama, T., Esteban, M., Ishii, H. & Hamano, G. 2017. Simulated tsunami evacuation behavior of local residents and visitors in Kamakura, Japan. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 23: 1–14
- Tamakloe, R., Hong, J., Tak, J., & Park, D. 2021. Finding evacuation routes using traffic and network structure information. *Transportation Research Part D*, 95: 102853.
- Xue, Y., Wu, R., Liu, J., & Tang, X. 2021. Crowd evacuation guidance based on combined action-space deep reinforcement learning, algorithms, 14: 26.
- 北原武嗣・岸祐介・久保幸奨（2013）：高低差を考慮した津波災害時の群衆避難における経路選択に関する一検討，土木学会論文集A1（構造・地震工学），69(4)，I_1067–I_1075.
- 坂田祐介・平野弘晃・有川太郎（2018）：津波レベルに基づいた避難経路選択手法の構築，土木学会論文集B2(海岸工学)，74(2)，I_397–I_402.
- 佐藤龍治・平岡透・高見徹・安高尚毅（2016）：避難所の収容人数を考慮した津波時の避難可能範囲の検証法，写真測量とリモートセンシング，54(6)，300–308.
- 平野弘晃・小柳雄揮・有川太郎（2017）：異なる規模の津波を用いた避難経路の危険度に応じた経路選択方法の確立，土木学会論文集B2(海岸工学)，73(2)，I_1501–I_1506.