

(60) 地震による建物倒壊及び火災延焼を考慮した津波避難シミュレーションシステムの構築

藤山 麗¹・中村 麻菜美¹・大川 博史²・檜山 和男³

¹学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 都市人間環境学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)
E-mail: a17.y5tk@g.chuo-u.ac.jp

²正会員 株式会社エイト日本技術開発 (〒164-8601 東京都中野区本町 5-33-11)
E-mail: ookawa-hi@ej-hds.co.jp

³正会員 中央大学教授 都市環境学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)
E-mail: kaz@civil.chuo-u.ac.jp

本論文は、著者らが構築したマルチエージェントモデルに基づく津波避難シミュレーションシステムの適用性の向上を行うため、新たに建物倒壊による道路閉塞及び火災延焼を考慮したシステムの構築を行ったものである。道路閉塞は、想定地震の規模、建物の位置、建物の種類を考慮し、建物倒壊による道路閉塞確率を算出することにより考慮した。火災延焼は、延焼速度式に基づく既存のシミュレータを使用した。本システムを、対象地域に適用してそれらの考慮による結果の差異について比較検討を行った。

Key Words: evacuation, simulation, blockage, fire spread

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震による災害を契機とし、津波に対する防災・減災対策としてハード対策のみでは限界であるという認識が高まった。そこで、各自治体はソフト面の対策として、ハザードマップの公開や避難訓練など防災教育に一層の力を入れている。近年、特にソフト対策の一つとして、人的被害の予測が可能となる避難シミュレーションの有用性が高まり、数多くの手法が提案されている。

著者らも、これまで詳細な地理情報および適用地区の住民の年齢や性別などのマルチエージェントモデルを用いた避難シミュレーション手法の構築¹⁾を行ってきた。しかし、地震発生時に伴い、発生確率が高い建物倒壊や火災延焼については考慮されておらず、連動して発生する複合的な災害への適用に課題があった。

そこで本論文では、著者らの既往の避難シミュレーション手法に対し、地震発生に伴う建物倒壊及び火災延焼を考慮した津波避難シミュレーションシステムの構築を行った。本システムの妥当性と適用性について検証するため、南海トラフ地震による津波被害が想定される地域への適用を行った。

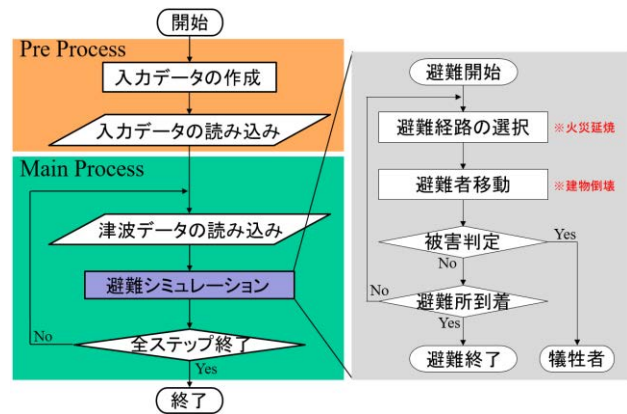


図-1 避難シミュレーションの流れ

2. シミュレーション手法

本システムの流れを図-1に示す。

(1) 地形データの作成

国土地理院が提供しているデータを基に、ArcGISを用いて地理情報に関するデータ（避難所、避難者初期位置、ノード）を作成する。

(2) 津波シミュレーション

作成された地形データを基に、浅水長波方程式を用いた安定化有限要素法による津波シミュレーション²⁾を行った。津波の初期条件は、当該地域の津波被害が最大となる条件である、中央防災会議が提供している津波断層モデルケース4から算出された水位変動量を用いた。

(3) 避難シミュレーション

本研究では、プログラミング言語として、マルチエージェントモデルの扱いが容易な NetLogo を用いてシステムの構築を行った。

避難者は初期位置から最短距離のノードに移動後、隣接する各ノードに対し式(1)に示す重力モデルを基に効用 S を算出し、 S が最大となるノードを選択して移動する。

$$S = \frac{a}{s^\alpha} - \frac{b}{z^\beta} - \frac{c}{w^\gamma} - \frac{d}{f^\delta} \quad (1)$$

ここで、 S は効用とし、 s は避難所までの距離、 z は標高、 w は水際線からの距離、 f は出火地点までの距離である。 a 、 b 、 c 、 d は変数に対する重みであり、値が大きいほど効用に占める割合が大きくなる。また、 α 、 β 、 γ 、 δ は変数に対する空間距離の影響度であり、値が小さくなるほど遠くまで影響を及ぼす。

また、前節により得られた津波シミュレーションの結果を基に、流速と水深の関係³⁾より津波による人的被害を判定する。

3. 建物倒壊による道路閉塞

地震の発生に伴い建物の損壊が生じることで、避難経路への影響が懸念される。そこで、建物倒壊による道路閉塞確率を算出し、道路閉塞が発生している地点では、避難者に対し歩行速度を低減させる。

(1) 道路閉塞確率の算出

2015年に東京消防庁が提示した手法⁴⁾を参考に、建物倒壊による道路閉塞確率を算出する。道路閉塞確率の算出にあたり、前提条件を以下に示す。

- 建物は必ず道路を挟み、向かい合うものとする。
- 建物が層破壊した時の瓦礫幅に関する確率密度関数は、正規分布とする。
- 建物の倒壊は、互いに影響を及ぼさず独立して発生する。
- 道路閉塞確率は一定区間毎でなく、作成したノード毎に算出する。

また、ここで用いる車両通行幅は、ポンプ車が通行可能となる3mを使用した。

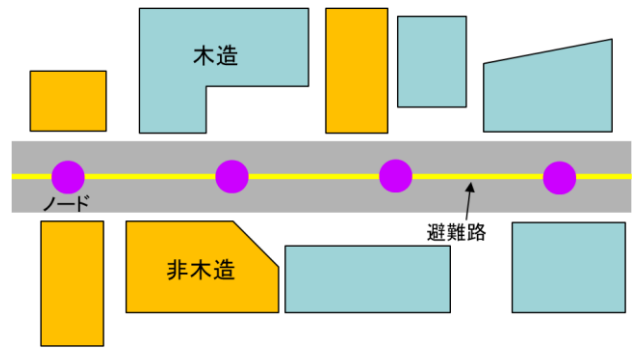


図-2 建物の配置

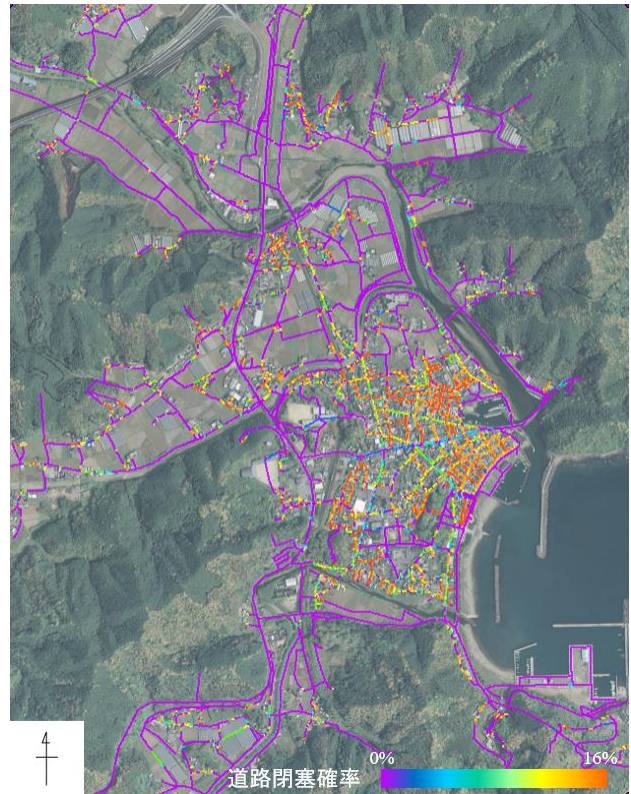


図-3 道路閉塞確率の算出

ノード毎の道路閉塞確率 p は、図-2 に示すような建物配置の下、式(2)を用いて算出される⁵⁾。

$$p = 1 - \{(1 - x_w)^{\alpha_w} \cdot (1 - x_m)^{\alpha_m} \cdot (1 - x_p)^{\alpha_p} \cdot (1 - y_w)^{\beta_w} \cdot (1 - y_m)^{\beta_m} \cdot (1 - y_p)^{\beta_p}\} \quad (2)$$

ここで、変数 x は一対の正面で向かい合う建物間で道路が閉塞する確率を、 y は一対の斜めで向かい合う建物間で道路が閉塞する確率を示す。また、添え字 w は木造建物同士、 m は木造・非木造建物、 p は非木造建物同士の組み合わせを示している。対象領域における道路閉塞確率の算出結果を図-3に示す。

(2) 道路閉塞による速度低減

前節により得られた道路閉塞確率を参考に、実際に建

表-1 年齢別速度低減率

| | 歩行速度 [m/s] | | 速度低減率 |
|--------|------------|------|-------|
| | 男性 | 女性 | |
| ~14歳 | 1.33 | 1.29 | 0.75 |
| 15~34歳 | 1.47 | 1.44 | 0.63 |
| 35~54歳 | 1.39 | 1.36 | |
| 55~64歳 | 1.41 | 1.46 | |
| 65~74歳 | 1.32 | 1.48 | 0.52 |
| 75~84歳 | 1.04 | 1.32 | |
| 85歳~ | 0.39 | 0.62 | |

物倒壊による道路閉塞が発生するノードを設定する。避難者は、閉塞道路遭遇時に回避行動を行わず、通過すると仮定し、瓦礫を超えることによる速度低下を考慮する⁷⁾。本研究では、高知県中土佐町上ノ加江地区において実施された津波避難訓練の結果⁸⁾ (表-1 参照) から得られた速度低減率を年齢別に付与することで、閉塞した道路の通過を考慮する。

4. 火災延焼シミュレーション

(1) 出火点の検討

内閣府が提示している手法⁹⁾を参考に、式(3)~(6)を用いて出火率及び総出火件数を算出する。なお、得られる値は対象領域における最大出火件数とする。

- 総出火件数：

$$\sum \text{出火件数} = \text{建物数} \times \text{出火率} \quad (3)$$

- 一般火気器具からの出火率：

$$\text{出火率} = 0.0022 \times \text{建物全壊率}^{0.73} \quad (4)$$

- 電熱器具からの出火率：

$$\text{出火率} = 0.0043 \times \text{建物全壊率}^{0.73} \quad (5)$$

- 電気機器及び配線からの出火率：

$$\text{出火率} = 0.00036 \times \text{建物全壊率}^{0.73} \quad (6)$$

ここで、建物全壊率は 1981 年以前に建設された木造建物に対し 40%、非木造建物に対し 12%を、1981 年以降に建設された木造建物に対し 10%、非木造建物に対し 4%を用いる。本研究では延焼の対象となる建物総数を 3558 棟 (木造建物 3390 棟、非木造建物 168 棟) とした。建物棟数及び総出火件数の算出結果を表-2 に示す。算出した総出火件数を参考に、本研究では出火点及び出火件数を木造建物 5 棟と設定する。

表-2 出火件数算出結果

| 最大出火件数 | | 1981年 以前建設 | 1981年 以降建設 | 計 |
|--------|------|---------------|---------------|--------|
| 木造 | 総棟数 | 1695 | 1695 | 3390 |
| | 出火件数 | 5.9566 | 2.1652 | 8.1218 |
| 非木造 | 総棟数 | 0 | 168 | 168 |
| | 出火件数 | 0 | 0.1099 | 0.1099 |

(2) 火災延焼シミュレーション

延焼速度式を基とした既存の火災延焼シミュレータ¹⁰⁾⁾を用いて火災延焼シミュレーションを行う。延焼速度式は、風向に対し風下方向、風下側 45 度方向、風上方向、風上側 45 度方向、風横方向の計 8 方向が考慮される。以下に、風下方向、風上方向、風横方向における延焼速度式を示す(式(7)~(9))。

- 風下方向：

$$V_1 = N \frac{1 + 0.1W + 0.007W^2}{c_1 + c_2a + c_3d/D_1} (a + d) \quad (7)$$

- 風上方向：

$$V_2 = N \frac{1 + 0.1W + 0.002W^2}{c_1 + c_2a + c_3d/D_2} (a + d) \quad (8)$$

- 風横方向：

$$V_3 = N \frac{1 + 0.1W + 0.005W^2}{c_1 + c_2a + c_3d/D_3} (a + d) \quad (9)$$

ここで、 V_1 、 V_2 、 V_3 は風向に対する延焼速度、 a は建物長、 d は隣棟間隔、 D_1 、 D_2 、 D_3 は延焼限界距離、 W は風速、 c_1 、 c_2 、 c_3 は係数、 N は延焼速度比である。各値の詳細は参考文献¹⁰⁾⁾を参照されたい。

対象地域周辺における 2020 年の気象データを参考に、風向は西、風速を 2 m/s とした。実行した火災延焼シミュレーションの様子を図-4 に示す。以上の火災延焼シミュレーションにより得られた、各建物の出火時刻を避難シミュレーションに用いる。

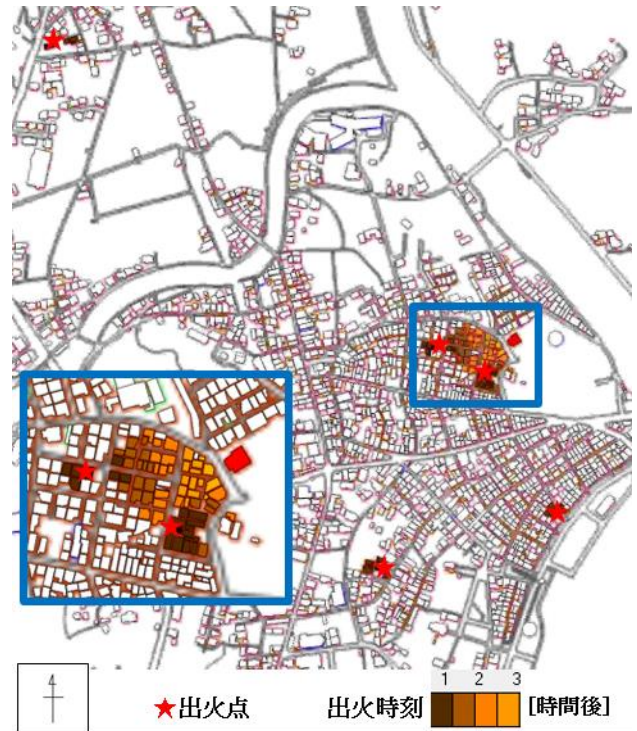


図-4 火災延焼シミュレーション結果

5. 適用例

想定震災を南海トラフ地震断層モデルケース 4, 対象地域を高知県中土佐町久礼とし, 地震による建物倒壊及び火災延焼を考慮した津波避難シミュレーションを行う。

(1) シミュレーション条件

避難者は歩行避難者 2650 人 (年齢及び性別毎の歩行速度, 群衆速度, 勾配速度, 年齢及び性別毎の体重, 避難者の疲労, 浸水済み避難経路の回避, 避難所の区分け, 道路閉塞地点における速度低減の八要素を考慮) に限定し, 避難開始時刻を地震発生から 0 分, 避難所を 25 箇所とした。また, 火災の出火件数及び出火点は木造建物 5 棟とし, 火災発生時刻は地震発生から 0 分とした。

避難者は, 津波により浸水した避難路に遭遇した場合, 回避行動を行う。また, 火災延焼の考慮に伴い, 火災が発生した建物の周囲半径 10 m 圏内には立ち入らないよう, 避難するものとする。

(2) シミュレーション結果

津波のみを考慮した既往の研究結果との比較を行うため, 建物倒壊及び津波の二要素を考慮したもの, 火災延焼及び津波の二要素を考慮したもの, 建物倒壊及び火災延焼, 津波の三要素を考慮したものの計三ケースのシミュレーションを実行した。各ケースにおける犠牲者数の比較を図-5 に示す。地震発生から 0 分後に避難開始した場合において, 新たに建物倒壊を考慮したケースでは犠牲者は発生せず, 既往研究である津波のみを考慮したケースより変化はみられなかった。新たに火災延焼を考慮したケース及び建物倒壊と火災延焼を考慮したケースでは, 犠牲者が発生する結果となった。

また建物倒壊及び火災延焼, 津波の三要素を考慮したケースにおける, 時間経過に伴う犠牲者数の推移を図-6 に示す。津波第一波及び第二波の到達を境に, 犠牲者数が急増していることが確認できる。

以上の結果の詳細については, 講演時に示す。

6. おわりに

本研究では, 著者らの既往の津波避難シミュレーションシステムに対し, システムの適用性の向上を目的として, 新たに建物倒壊による道路閉塞と火災延焼の考慮を行った。その結果, 連動して発生する複合的な災害への適用を可能にした。

今後は, 様々な条件下を想定した適用例を通じて, 本システムの有用性及び妥当性の検証を行う予定である。

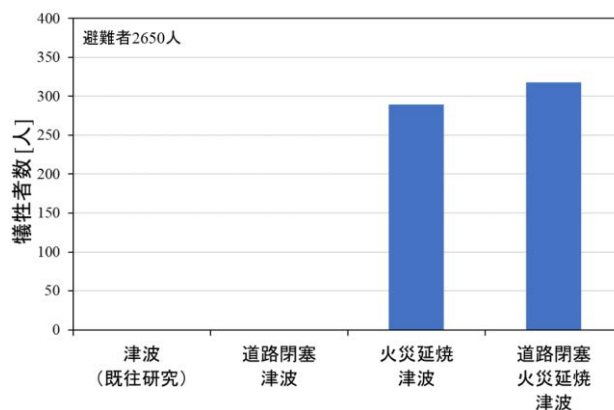


図-5 累積犠牲者数の比較

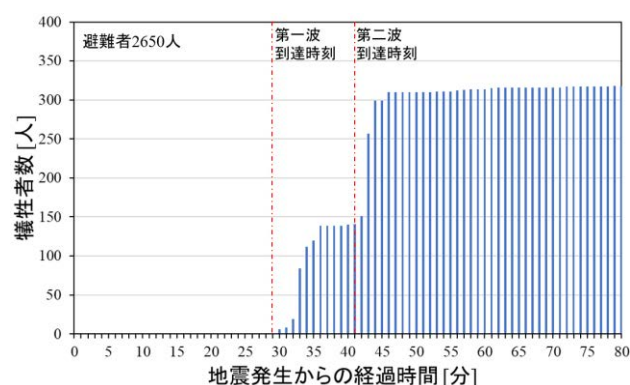


図-6 時間経過に伴う犠牲者数の推移

参考文献

- 1) 藤山麗ほか：第 49 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集IV-62, 2p., 2022.
- 2) 利根川大介ほか：応用力学論文集 (土木学会) Vol.12, pp.127-134, 2009.
- 3) 有川太郎ほか：土木学会海岸工学論文集 Vol53, pp.796-800, 2006.
- 4) 東京消防庁：地震火災による人的被害の軽減方策,火災予防審議会答申, pp.74-91, 2015.
- 5) 堀江啓ほか：土木学会地震工学論文集Vol.27, pp.1-9, 2003.
- 6) 藤本一雄ほか：地域安全学会論文集Vol.7, pp.241-246, 2005.
- 7) 藤田謙一ほか：東日本大震災特別論文集No.7, pp.1-6, 2018.
- 8) 高知県海洋局：漁村における津波対策基本方針, 2013.
- 9) 内閣府防災担当：首都直下地震に係る被害想定手法について, 首都直下地震対策専門調査会, 2007.
- 10) 二神透ほか：土木情報利用技術論文集Vol.17, pp.39-46, 2008.
- 11) 木俣昇：日本オペレーションズ・リサーチ学会論文誌 Vol.30, No.1, pp.59-87, 1987.