

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 Development of Tsunami evacuation simulation system considering building collapse and fire spread due to earthquake

20N3100032K 中村 麻菜美 (都市人間環境学専攻)
Manami NAKAMURA/ Computational Mechanics Lab.

Key Words : Evacuation, Road blockage, Fire spread, Simulation

1. はじめに

我が国は世界でも有数の災害大国である。特に地震の発生率が高く、大規模地震における犠牲者の死因は、内陸部では建物損壊やそれに伴う火災が、沿岸部では津波による溺死が9割近くを占めており、津波や建物損壊、地震火災が避難者の避難行動や生存率に大きく影響すると考えられる。また、東北地方太平洋沖地震の発生を機に大規模地震に対する防災・減災対策が見直され、ハード面だけでなくソフト面における対策も充実し、その評価及び検討を行う手法の一つとして避難シミュレーションの必要性が高まった。以上により、著者らの既往の研究¹⁾ではマルチエージェントモデルを用いて様々な要素を考慮した避難シミュレーションが行われた。

本研究では、既往のシミュレーション手法に対し、地震の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い、適用性の向上を図る。

2. シミュレーション手法

地理情報に関する必要なデータをArcGISを用いて、国土地理院が提供しているデータを基に作成した。対象領域である高知県中土佐町久礼地区での作成例の一部を図-1に示す。シミュレーションにはマルチエージェントモデルを扱うことが可能なNetLogoを用いた。

避難者は初期位置から最短距離にあるノードに移動後、隣接している各ノードに対し次式で表される重力モデルを用いて効用 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。 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影響度が大きい。

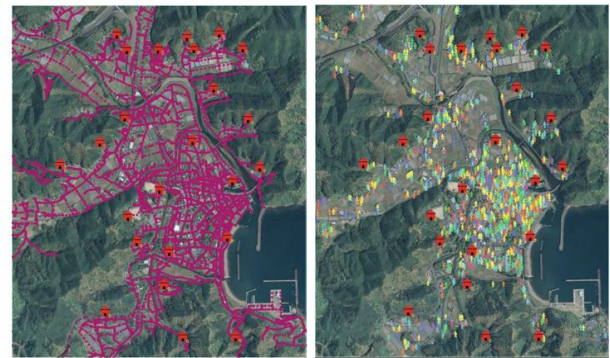


図-1 地形データ作成例

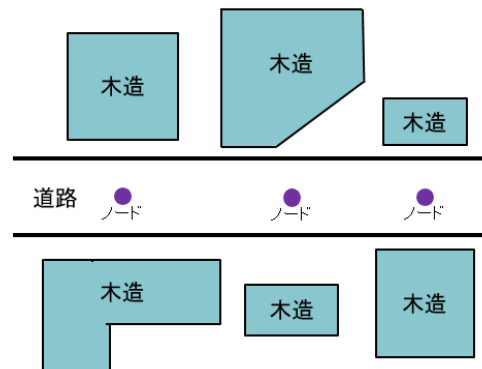


図-2 道路閉塞確率算出における前提条件

3. 建物倒壊による道路閉塞

地震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。2015年に東京消防庁が提示した手法²⁾を参考に、建物倒壊による道路閉塞確率を算出し、避難者の歩行速度に影響を与える要素として考慮する。道路閉塞確率の算出にあたり、前提条件を図-2を参照して以下に示す。

- 建物は必ず道路を挟んで向かい合っているものとする。
- 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。

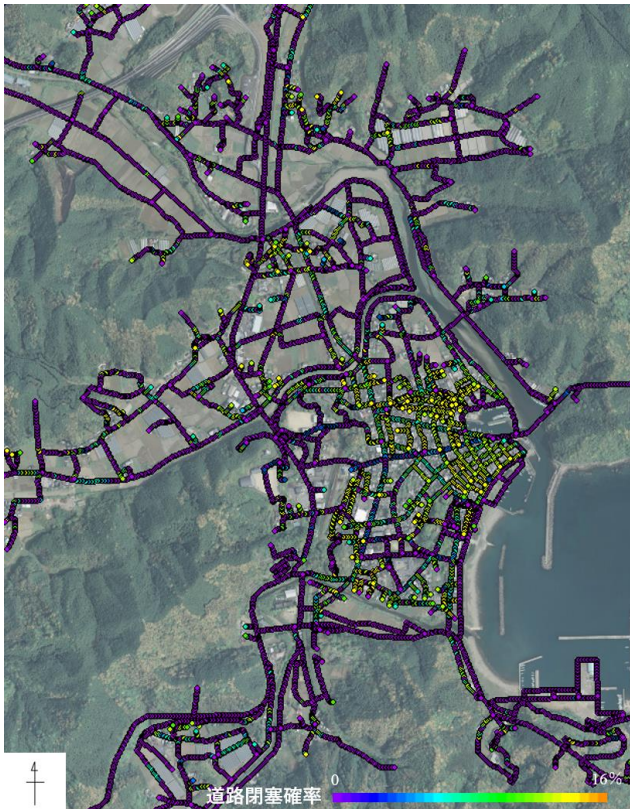


図-3 道路閉塞確率算出結果

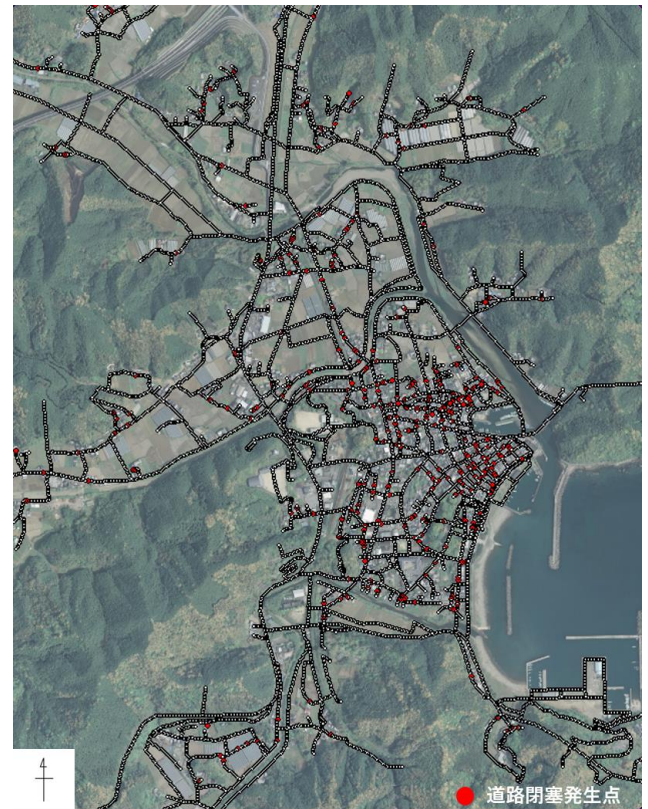


図-4 道路閉塞箇所算出結果

- 道路閉塞確率は一定区間毎ではなく作成したノード毎に算出する。

データの取得にはArcGISを用いた。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幅員である3mを用いた。

(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を参考に、建物倒壊による道路閉塞確率を算出する。ノード毎の道路閉塞確率 p は次式で表される。

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

ここで、各変数は以下の通りになる。

- x_w : 一对の正面で向かい合う木造建物間で道路が閉塞する確率
- x_m : 一对の正面で向かい合う木造・非木造建物間で道路が閉塞する確率
- x_p : 一对の正面で向かい合う非木造建物間で道路が閉塞する確率
- y_w : 一对の斜めで向かい合う木造建物間で道路が閉塞する確率
- y_m : 一对の正面で向かい合う木造・非木造建物間で道路が閉塞する確率

- y_p : 一对の正面で向かい合う非木造建物間で道路が閉塞する確率

● $\alpha_w, \alpha_m, \alpha_p, \beta_w, \beta_m, \beta_p$: 出現期待値
これら確率の詳細は参考文献³⁾⁴⁾⁵⁾を参照されたい。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

前節の道路閉塞確率算出手法を用いた結果、本研究では避難者が避難経路の目印とするノード全13672個の内、閉塞する確率を持つノード数は4161個となった。道路閉塞による速度低下を考慮するため、算出結果より得られた4161個のノードからランダム値を用いて道路閉塞の有無を判定し、全ノード数の約2.6%に値する349個のノードにおいて建物倒壊による道路閉塞が発生するとした。算出結果を図-4に示す。回避行動を行わず、閉塞した避難路を通過する場合、瓦礫を超えることによる速度低下が考えられる⁶⁾。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⁷⁾から得られた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可能とする。

4. 火災延焼シミュレーション

(1) 出火点の検討

出火件数は内閣府が提示している手法を参考に、以下に示す算出式を用いて出火率及び総出火件数を算出

表-1 出火件数算出結果

		1981年以前建設	1981年以降建設	計
木造	棟数	1695	1695	3390
	出火件数	5.9566	2.1652	8.1218
非木造	棟数	0	168	168
	出火件数	0	0.1099	0.1099

する。なお、得られた値は対象領域における最大出火件数とする。

- 全出火件数：

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

- 一般火気器具からの出火率：

$$\text{出火率} = 0.0022 \times \text{建物全壊率}^{0.73} \quad (3b)$$

- 電熱器具からの出火率：

$$\text{出火率} = 0.0043 \times \text{建物全壊率}^{0.73} \quad (3c)$$

- 電気機器及び配線からの出火率：

$$\text{出火率} = 0.00036 \times \text{建物全壊率}^{0.73} \quad (3d)$$

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。また、算出に用いた建物数及び総出火件数の算出結果を表-1に示す。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。出火点は算出した総出火件数を参考にランダムに設定し、本研究では木造建物5棟とした。

(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⁸⁾⁹⁾を用いて火災延焼シミュレーションを行う。なお、風に対し風上側、風上側45度方向、風下側、風下側45度方向、風横方向の5種8方向が考慮される。出火件数及び出火点は前節において算出した結果を用いて、木造建物5棟とする。風向及び風速は、対象領域周辺における2020年の気象データを参考に、風向を西、風速を2 m/sとした。火災延焼シミュレーションの結果を図-5及び図-6に示す。

4. 適用例

想定震災を南海トラフ地震断層モデルケース4¹⁰⁾、対象地域を高知県中土佐町久礼地区とし、地震による建物倒壊と火災延焼を考慮した津波避難シミュレーションを行う。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、道路閉塞地点での速度低減を考慮）に限定し、避

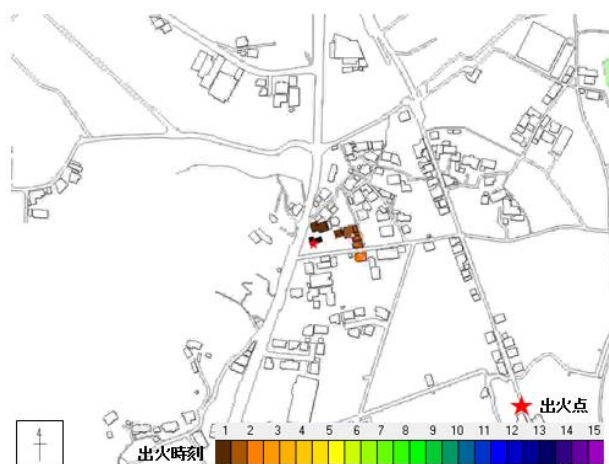


図-5 火災延焼シミュレーション結果1

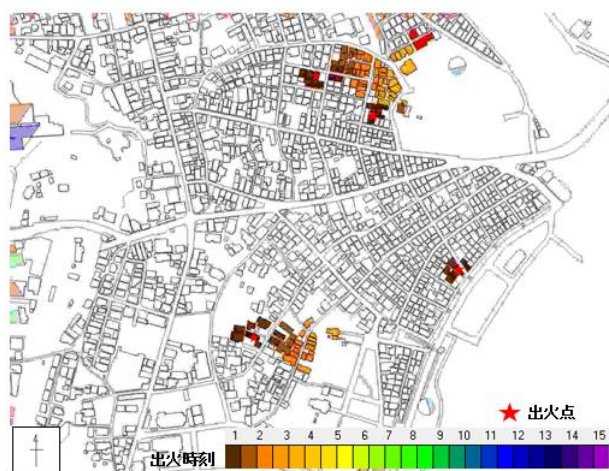


図-6 火災延焼シミュレーション結果2

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、前章より道路閉塞発生件数は349件、火災の出火件数及び出火点は木造建物5棟、火災の発生時刻は地震発生から0分とした。火災延焼の考慮に伴い、避難者は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。なお、本研究では火災による被害は考慮しない。既往の研究結果と比較を行うため、シミュレーションは、道路閉塞及び津波の2要素を考慮したもの、火災延焼を及び津波の2要素を考慮したもの、道路閉塞及び火災延焼、津波の3要素を考慮したものの3種を行う。

(1) シミュレーション結果

津波避難シミュレーションの結果を図-7、避難行動の様子を図-8に示す。道路閉塞及び津波の2要素を考慮した場合において、犠牲者数、避難所到達率共に既往の研究結果と差異はなかった。また、避難完了時刻も同様に変化が見られなかった。ここで、3章で示した道路閉塞の条件の他に、道路閉塞確率を持つ全てのノードにおいて道路閉塞が発生すると仮定しシミュレーショ

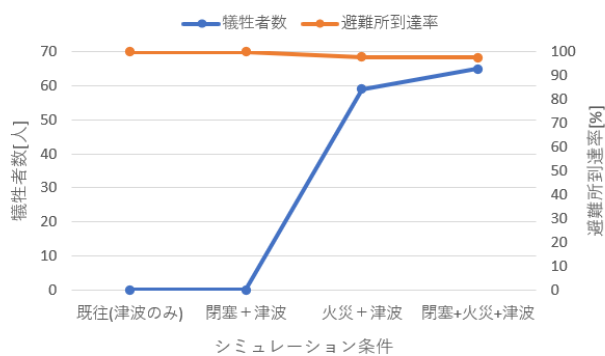


図-7 津波避難シミュレーション結果

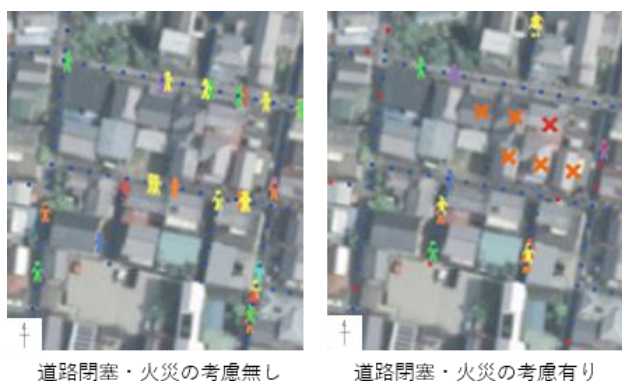


図-8 避難行動の様子

ンを行ったところ、既往の研究結果では避難完了時刻が地震発生から59分であるのに対し、全ての避難者が避難完了する時刻が地震発生から67.2分と、13.8%増加することが確認できた。火災延焼及び津波の2要素を考慮した場合においては、既往の研究結果に対し、地震発生直後からの避難であっても犠牲者数が増加、避難所到達率が低下することが確認できた。これは図-8に示すように、火災延焼を考慮することによって出火点を回避して避難所に向かう避難者や、延焼によって避難路が塞がれ、避難所に到達できない避難者が増加したことが原因として考えられる。道路閉塞及び火災延焼、津波の3要素を考慮した場合においては、火災延焼及び津波の2要素を考慮した場合に道路閉塞を加えることにより、さらに犠牲者数が増加、避難所到達率が低下することが確認できた。

以上により、道路閉塞の発生や対象領域における天候状況及びそれに伴う火災の発生により、避難者がより安全に避難することが困難となることが確認できた。また、これらの結果により、対象領域における災害発生時の危険個所の可視化が可能となった。一方で、被害の対象が津波のみであり、建物損壊や火災の発生による直接的な被害を考慮する必要があると考えられる。

また、本研究における各シミュレーションの条件がサンプルの一例に過ぎないこと、道路閉塞確率の算出において、考慮していることが建物倒壊のみであり、建物周辺にあるブロック塀等を考慮した道路閉塞確率となっていないことから、シミュレーションの条件を複数個用いて実施することで本システムの有用性を確認する必要があると考える。

5. おわりに

本研究では、既往のシミュレーション手法に対し建物倒壊による道路閉塞と火災延焼の考慮を新たに加え、津波避難シミュレーションシステムの機能拡張を図り、以下の結論を得た。

- 建物倒壊による道路閉塞及び火災延焼の考慮が可能となった。
- 本システムにより対象領域における災害時の危険個所の予測が可能となった。

今後の課題としては、ブロック塀の倒壊を含めた道路閉塞を考慮することによる本システムの拡張、避難者に対する被害判定の検討、様々な条件下におけるシミュレーションの実行による本システムの有用性及び妥当性の確認が挙げられる。

参考文献

- 1) 近真弥：マルチエージェントモデルを用いた津波避難シミュレーションの適応性向上に関する研究，第46回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集 I-75, 2p., 2018.
- 2) 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，pp74-91, 2015.
- 3) 堀江啓等：木造建物を対象とした層破壊被害関数の適用性に関する考察，土木学会地震工学論文集，27巻，1-9項，2003.
- 4) 藤本一雄，翠川三郎：近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法，地域安全学会論文集，7巻，pp241-246, 2005.
- 5) 土木学会：沿道建物の倒壊を考慮した道路の横断面構成土木学会阪神・淡路大震災調査報告，1998.
- 6) 藤田謙一：津波避難行動でのマクロ的な人的被害評価における道路閉塞条件の考え方，東日本大震災特別論文集 No.7, 6p., 2018.
- 7) 高知県海洋局：漁村における津波対策基本方針，2013.
- 8) 二神透他：住民参加のための大震時火災延焼シミュレーション・システム開発，土木情報システム論文集 Vol.17, pp.39-46, 2008.
- 9) 木俣昇：大震時避難計画のためのメッシュ型火災延焼シミュレーション・システムに関する検証，日本オペレーションズ・リサーチ学会 Vol.30 No.1, pp.59-87, 1987.
- 10) 内閣府中央防災会議：南海トラフの巨大地震モデル検討会，2012.