

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の適用性向上に関する研究 Improvement of Applicability of Tsunami Evacuation Simulation based on Multi-agent Model

21N3100041B 藤山 麗 (計算力学研究室)
Uraraka TOYAMA / Computational Mechanics Lab.

Key Words : Evacuation, Simulation, Multi-agent, tsunami, collapse

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、防波堤の建設やかさ上げ等、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、ハザードマップの作成・公開や避難訓練等の防災教育に一層の力を入れている。近年、特にソフト対策の評価及び検討を行う手法の一つとして、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。

本研究では、既往の津波避難シミュレーション¹⁾に対し、新たに歩行避難者に視野を与え、津波による被害回避システムの構築を行った。また、建物倒壊シミュレーションの結果を用い、道路閉塞箇所の迂回を考慮した。以上より、本システムの適用性向上を図る。

2. シミュレーション手法

本研究では、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を行う。マルチエージェントとは、周囲の環境から情報を取得することにより、自律的な行動が可能となるエージェントが多数共存し、相互作用を及ぼす環境のことを指す。

本研究のフローチャートを図-1に示す。地理情報の取得、避難路の作成等、入力データの作成・読み込みにはGISソフトであるArcGISを、避難シミュレーションシステムの構築にはNetLogoを用いる。

(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、避難者初期位置、避難場所、避難路を作成する。また、作成した避難路上に、避難者が経路選択を行う地点であるノードを配置する。

(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。

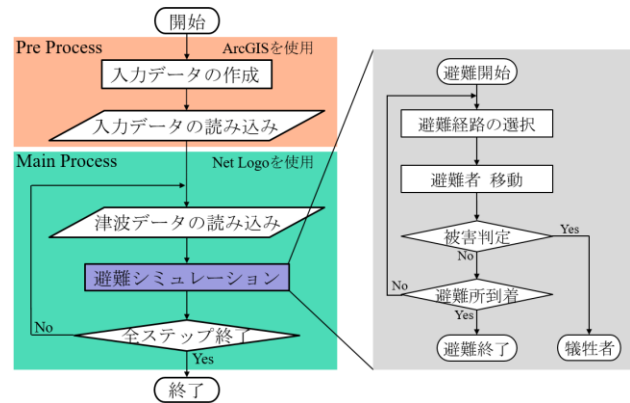


図-1 避難シミュレーションの流れ

(3) 避難シミュレーション

避難開始直後、避難者は初期位置から最短距離のノードを選択し、移動する。以降、ノードに到着する度に、隣接する各ノードに対し、式(1)に示す重力モデル式³⁾を用い、避難経路の選択・移動を行う。

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

ここで、 S を効用とし、 s は避難所までの距離、 z は標高、 w は水際線からの距離である。 a 、 b 、 c 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 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。避難者は効用 S が最大となる隣接ノードへ移動し、図-1に示す流れの通り、避難経路の選択・移動・被害判定を繰り返す。そして、避難場所に到達または犠牲者判定を受けた時点で、避難行動を終了する。

3. 津波による被害回避

本研究では、三角形の非構造格子を用いる津波シミュレーション結果を、津波情報を持つ等間隔の格子点(津波ノード、図-2参照)に写像することにより、津波を表現する。津波ノードを中心とした半径 $D[m]$ 以内の避難者に対し、津波の水深と流速の情報を基に性別毎の被害判定⁴⁾を行う。

(1) 危険認知範囲の設定

津波遭遇時に避難者が前進し続けられないよう、津波を事前に認知・安全な避難路への迂回を考慮する。

a) 円形の危険認知範囲

既往研究⁷⁾では、避難者の前方のノードが、津波ノードを中心とした半径R[m]以内に位置している場合(図-2(1)参照)、その津波ノードの情報を避難者に与える手法を用いていた。このシステムにより、避難者は津波を目の前に行う経路選択以前に危険を認知し、被害回避が可能となる。

しかし、この手法は単純な円形であることから、建物等により現実では認知不可能な位置の情報をも取得するという欠点を持つ。そこで、上記を改善する手法を次項に述べる。

b) 扇型の危険認知範囲

認知不可能な位置の情報を取得しないよう、幅員と曲がり角(角点ノード)の情報を用いる。避難者に対しあらかじめ設定する、直線避難路における危険認知距離と、幅員を維持する角度により構成される扇型を、視野の範囲としてモデル化する(図-2(2)参照)。

視野内に、角点ノードが存在しない場合(図-3(I)参照)は、上記の初期範囲を維持し、視野内に角点ノードが存在する場合(図-3(II)参照)は、その角点ノードまでの距離と幅員を維持する角度により構成される扇型を、視野の範囲とする。

この手法により、同一避難路外等の認知不可能な位置に遡上している津波の影響を受けることなく、被害回避が可能となる。

(2) 危険認知範囲の検討

危険認知範囲の有無及び形状について、シミュレーションを実行し、効果を確認する。

a) シミュレーション条件

ノード間隔5m、幅員4m、避難場所1か所のシミュレーションを実行する。また、円形の危険認知範囲半径R、及び扇型の視野を構成する、直線避難路における危険認知距離を、ともに30mとする。

上記の条件の下、津波の認知範囲について、以下に示す3ケースのシミュレーションを実行する。

- [A] 被害回避を考慮しない場合
- [B] 円形の危険認知範囲を考慮した場合(既往手法)
- [C] 扇形の危険認知範囲を考慮した場合(本手法)

b) シミュレーション結果

ケース[A]では、回避行動を行わないため、前方から津波が接近しているにもかかわらず前進を続け、被害判定により犠牲者となる様子が確認された(図-4参照)。

ケース[B]では、津波ノードを中心とした半径Rm以内に位置しているノードを白色に変化させている(図-5参照)。図-4と異なり、避難者は前方の津波を認知したとして引き返したことから、危険認知範囲の効果を確認した(図-5, 上段参照)。しかし、単純な円形の危険認

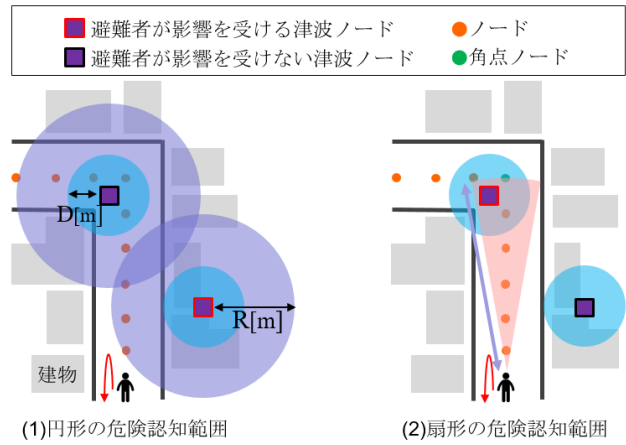


図-2 危険認知範囲の設定

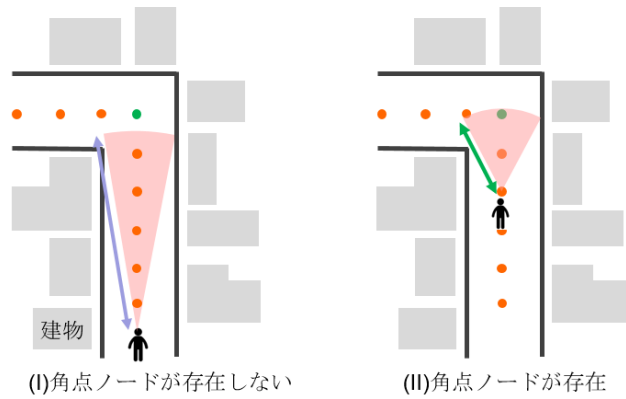


図-3 扇型の危険認知範囲

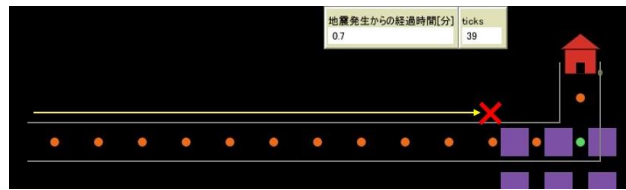


図-4 [A] 被害回避を考慮しない場合

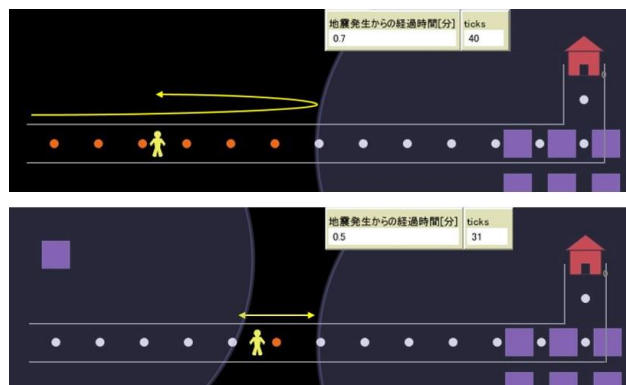


図-5 [B] 円形の危険認知範囲を考慮した場合
(上段: 被害回避 下段: 避難路外の津波の認知)

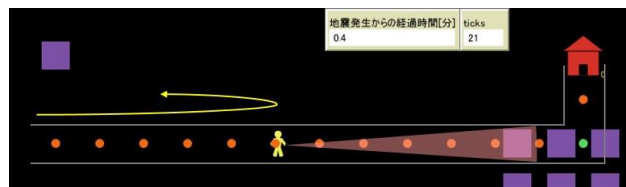


図-6 [C] 扇形の危険認知範囲を考慮した場合

知範囲であることから図-5,下段に示すような,同一避難路外等の実際には認知不可能な位置に襲来した津波の影響をも受ける.そのため前方の津波による回避行動を行ったものの,回避先のノードも危険であると判断されたために,避難者は回避経路がなく,右往左往する様子が確認された.

最後に,ケース[C]の結果を図-6に示す.図-5,下段と異なり,回避行動を行う様子が確認された.

以上より,扇型の視野を考慮することで,建物等により実際には認知不可能な位置に襲来した津波の影響を受けず,前方の津波による被害回避を行うシミュレーションが可能となった.

4. 建物倒壊による道路閉塞

本研究の対象地域である高知県中土佐町久礼地区の避難路を図-7に示す.これらの避難路は,地震の発生に伴う建物の倒壊により閉塞が懸念される.そこで,避難者に対し,建物倒壊による道路閉塞箇所遭遇時に,通行可能な避難路への迂回システムを考慮する.

(1) 道路閉塞確率

既往研究⁹⁾では,建物倒壊は独立して発生するという前提条件の下,建物種別及び幅員を基に算出された道路閉塞確率(図-8参照)を基に,道路閉塞箇所を設定する手法を用いていた.また,閉塞箇所に遭遇した避難者は瓦礫の超越を前提とし,歩行速度を低下させることで,道路閉塞による影響を考慮していた.

この手法は,容易に道路閉塞の予測が可能となるが,個々の建物の大きさや周囲の環境等,対象地域の特徴を反映できていない.また,避難者のなかには高齢者もいるため,瓦礫の超越は現実的とはいえない.そこで,上記を改善する手法を次節に述べる.

(2) 建物倒壊確率による道路閉塞

地域の特徴を反映するため,個々の建物をサイズ・形状・耐震の有無を基にモデル化した,個別要素法を用いた既存の建物倒壊シミュレーション⁹⁾により得られる道路閉塞率の結果を用いる(図-9参照).

$$\text{道路閉塞率} = \frac{\text{閉塞回数}}{\text{シミュレーション回数}} \quad (2)$$

本研究では,算出された結果を基に,道路閉塞率が0~59.9%の道路は,通過に伴う避難者への影響はなく,60~79.9%の道路は既往手法による歩行速度低下の考慮,80~100%の道路は通行不可として迂回を考慮させる.

また,道路閉塞は避難路に危険を及ぼす要因ではあるが,津波と異なり時間変化に伴う位置移動はない.そのため,閉塞箇所に遭遇した避難者は,視野を使用した回避行動ではなく,閉塞箇所を除いた経路選択を再度行うことで,安全な避難路へ迂回する.

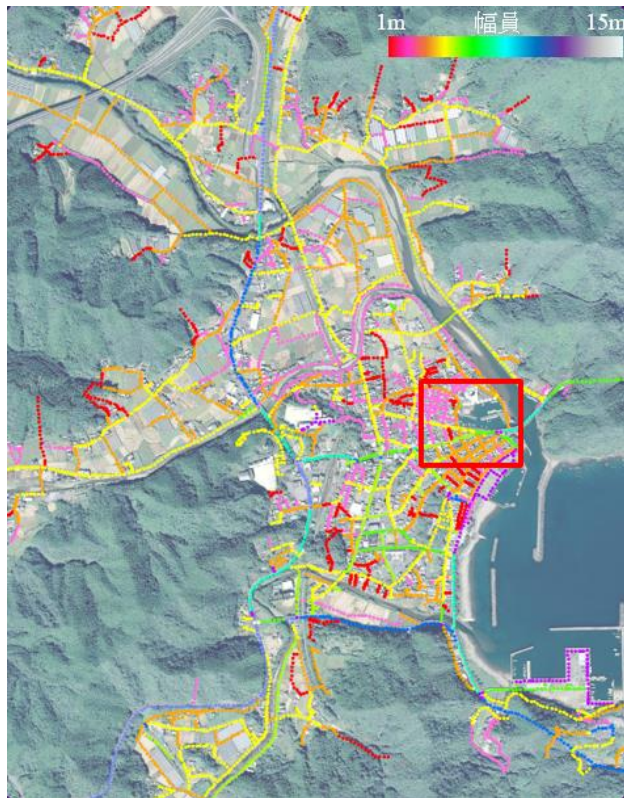


図-7 対象地域における避難路



図-8 道路閉塞確率の算出結果(既往手法)



図-9 建物倒壊確率の算出結果と閉塞箇所(本手法)

5. 適用例

以上の手法を、南海トラフ地震による甚大な被害が懸念されている地域に適用する。

(1) シミュレーション条件

対象地域を高知県中土佐町久礼地区とし、沿岸部に位置する南北2652m×東西2076mをシミュレーション領域（図-7）とする。避難場所は、役場がハザードマップにおいて指定している25か所、避難者は歩行避難者2650人に限定した。歩行避難者は建物内から避難を開始すると仮定し、建物の重心を初期位置としている。歩行避難者に対しては、年齢性別別歩行速度、年齢性別別体重、勾配速度、群衆速度、歩行疲労割引率、及び3章において検討を行った扇型の危険認知範囲（ケース[C]）の6要素を考慮している。

また、本システムでは、シミュレーション開始時刻を地震発生時刻とし、避難者は避難開始時刻に、一斉に避難を開始するものとする。

上記の条件の下、建物倒壊による道路閉塞の考慮について、以下に示す3ケースのシミュレーションを実行し、比較を行う。

- [D] 道路閉塞を考慮しない場合
- [E] 道路閉塞確率を考慮した場合（既往手法）
- [F] 建物倒壊確率による道路閉塞を考慮した場合（本手法）

(2) シミュレーション結果

津波は、地震発生から29分後に第一波、40分後に第二波が到達した。図-10に、同時刻における、各ケースの避難行動の比較を示す。東方向に位置する避難場所を目的とし、ケース[E]ではケース[D]より遅れを取りながら閉塞箇所を通過した。それに対し、ケース[F]では、閉塞箇所を通過せず右往左往している避難者を多数確認した。これらの避難者は、道路閉塞により迂回経路がないために避難場所への到達が困難となり、後の津波遡上により犠牲者となる。また、ケース[F]では、自身の初期位置である建物前の道路が閉塞率80～100%であったために、目の前のノードが閉塞箇所となり避難行動を開始できない避難者が多く見られた。避難開始できた避難者に対しても、閉塞により袋小路となり、避難到達が不可能な避難者を多々確認した。

以上より、新たに考慮したシステムが適用されていることを確認した。対象地域の個々の建物をモデル化した倒壊シミュレーションの結果を用いることで、より地域の特徴を考慮したシミュレーションが可能となった。また、道路閉塞率を基に閉塞箇所を設定した避難シミュレーションにおいてs、避難開始不可能な避難者が多く見られたことから、早急な建物の耐震化及び道路の拡張の促進に有用であるといえる。

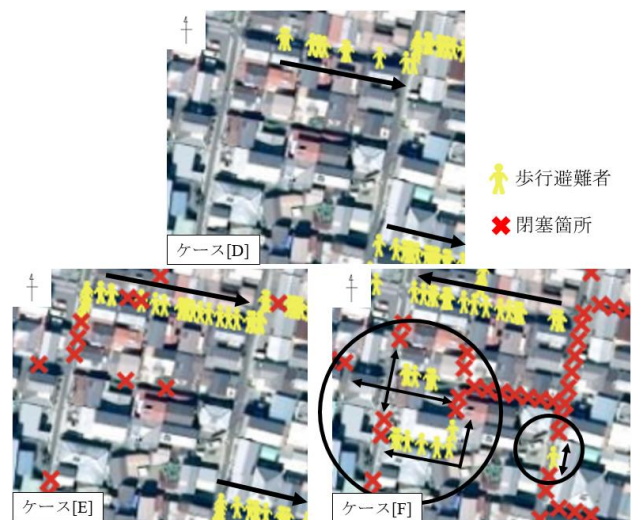


図-10 道路閉塞箇所遭遇時の比較

6. おわりに

本研究では、既往手法に対し、新たに歩行避難者に視覚情報を与え、津波及び道路閉塞箇所の回避行動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、以下の結論を得た。

- 避難者に視野及び閉塞箇所の迂回を考慮することで、より現実行動に即した避難シミュレーションが可能となった。
- 対象地域の建物をモデル化した建物倒壊シミュレーションの結果を用いることで、より地域に適用した避難シミュレーションが可能となった。

今後の課題として、視野考慮した道路閉塞箇所の迂回システムの構築が挙げられる。

参考文献

- 1) 中村麻菜美, 藤山麗, 大川博史, 榎山和男: 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, 第49回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, I-9, 2p., 2022.
- 2) 利根川大介, 榎山和男: 安定化有限要素法による津波遡上及び流体力の解析手法の構築, 応用力学論文集(土木学会), Vol.12, pp.127-134, 2009.
- 3) 竹下史朗, 小林一郎, 山田文彦, 上野幹夫: マルチエージェントモデルを用いた洪水・避難シミュレータの開発, 土木情報利用技術論文集, Vol.16, pp.203-212, 2007.
- 4) 有川太郎, 大坪大輔, 中野史丈, 下迫健一郎, 高橋重雄, 今村文彦, 松富英夫: 遡上津波力に関する大規模実験, 土木学会海岸工学論文集, 第53巻, pp.796-800, 2006.
- 5) 原忠, 西村大輝, 中村友紀恵, 山田雅行, 羽田浩二, 山崎正明: 個別要素法による海岸平野部に立地する木造住宅の倒壊予測, 地盤工学研究発表会発表講演集, 第54巻, 2p., 2019.