

# 降積雪期における歩行者への追従を考慮した

## 津波避難車両交通シミュレーション\*

東北大学災害科学国際研究所 堀合 紳弥

東北大学災害科学国際研究所 奥村 誠

### 1. はじめに

2011年東日本大震災以降、沿岸部の自治体では、防潮堤などの整備によるハード面、車両避難のあり方などのソフト面の双方から、津波防災対策の見直しが進められてきた。さらに、千島・日本海溝地震による浸水想定および被害想定<sup>1)</sup>の公表を受け、地域防災計画や津波避難計画の改定が求められている。この被害想定では、想定海溝近辺の地域特性として、冬季積雪時での避難による被害想定<sup>2)</sup>も組み込まれている。これまで津波避難計画においては、津波浸水シミュレーション

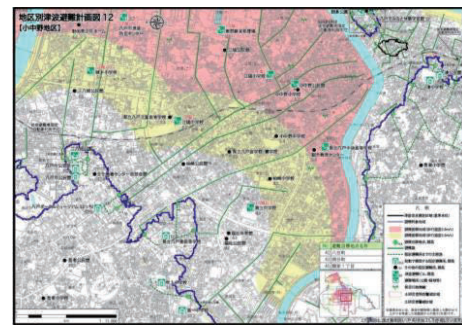


図-1 地区別避難計画図の一部

結果に基づく津波到達予想時間から、避難開始時間を差し引いた移動可能時間に歩行速度を乗じて計算された距離などを用いて、避難可能距離や避難困難地域(図-1)<sup>3)</sup>を算出している。これを基に対象とする津波が発生した際の、地域の避難行動の目安としてまとめられているが、避難に係る時間や距離の算出の際には、他の避難者や車両からの交通影響がなく、交通流がスムーズに流れることを前提としている。しかし、実際の避難過程においては、歩車道が分離されている道路構造の路線だけでなく、歩道が整備されていない住宅街などの街路も避難路となり、同一空間(路線)上に存在する歩行者を意識した走行が行われる。特に、冬季には積雪等により、平時よりも歩行者の車道利用が増加するため、前方の歩行者に移動が制約される可能性もある。従って、実際の避難環境に近い条件での避難計画を検討するためには、道路空間上での歩車混在による影響を考慮する必要がある。

### 2. 本研究の目的

歩行者の影響による車両走行性の低下などを考慮し、津波遡上時までの避難地点への到達を検討するための、エージェントベース津波避難車両交通シミュレーションモデルを構築する。構築したモデルにより、積雪・堆雪に伴い歩行者が車道上を避難した場合の、夏季および冬季での想定条件を設定した計算を行う。積雪や堆雪による幅員減少によって歩者間の影響増大が懸念される冬季を想定した避難条件では、全体の交通流にどのような影響が生じ、夏季想定での生存・犠牲数に対してどの程度変化するかを、シミュレーション結果から考察する。

\* Tsunami evacuation vehicle traffic simulation Considering Pedestrian following during in Snowfall and Snowy Season by Shin-ya Horiai and Makoto Okumura

### 3. シミュレーション概要および方法

避難過程における道路空間上での、車両と歩行者間の接近による車両走行性への影響を表現するため、マルチエージェントシステム“NetLogo6.4.0”を用いて、エージェントベース津波避難車両交通モデルを構築する。これまで、走行モデルを用いた避難シミュレーションモデルとして、例えば、Wang et al.(2016)<sup>4)</sup>による歩行者と車両の2モードでの避難モデルが提案されてきた。この避難モデルでは、車両の走行制御にGM追従モデル<sup>5)</sup>を適用にすることにより、周囲の車両の存在が後続する車両に及ぼす影響を考慮することで、渋滞などの表現を可能としている。ただし、歩行者からの影響は考慮されていないため、歩車混在下での避難行動は十分に表現できていない。

本研究では、図-2のようにGM追従モデルを歩行者からの影響による速度低下を考慮できるように拡張した。

計算対象とする青森県八戸市の浸水想定区域内のうち、港湾部および一級・二級河川に囲まれた地区内の建物立地上に、1点当たり居住1世帯/エージェントを表したエージェントポイントを配置する(図-3)。エージェントは歩行・車両ごとに与える避難開始時間を迎えると、順次建物部分から道路ネットワーク<sup>6)</sup>に移動し避難を開始する。避難開始時間および歩車選択割合は、東日本大震災での避難行動に関する調査結果<sup>7)</sup>を参照し、歩行避難者(43%)は小坂ら(2016)<sup>8)</sup>の避難速度を基に地震発生後15分から、車両避難者(57%)は同じく25分から順次避難を開始する設定とした。避難開始地点から歩行・車両エージェント別に指定された属性の避難目標までは、A\*アルゴリズム法(式(1))に基づく最短経路探索によって経路を探索したのち、避難目標地点を決定のうえ避難を開始する。

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad \cdots(1)$$

ここに、 $f(n)$ ：ノードn地点でのトータルコスト

$g(n)$ ：スタートノードからノードn地点までの実績コスト(移動距離)

$h(n)$ ：ノードn地点からゴールノードまでの予想コスト(予想距離)

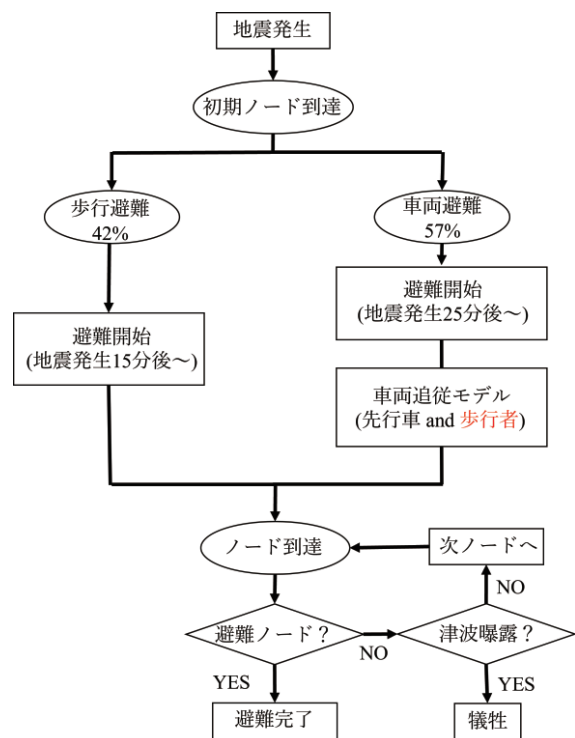


図-2 シミュレーションフロー



図-3 地区別エージェント初期配置(QGIS)

避難行動に関する調査結果<sup>7)</sup>を参照し、歩行避難者(43%)は小坂ら(2016)<sup>8)</sup>の避難速度を基に地震発生後15分から、車両避難者(57%)は同じく25分から順次避難を開始する設定とした。避難開始地点から歩行・車両エージェント別に指定された属性の避難目標までは、A\*アルゴリズム法(式(1))に基づく最短経路探索によって経路を探索したのち、避難目標地点を決定のうえ避難を開始する。

各エージェントの避難目標地点は、歩行者は直近の避難施設(図-4：赤バツ以外)、車両は避難施設以外の高台や内陸部の安全地点(図-4中：赤丸、計算領域の都合上一部浸水区域内設置)としている。これは、昨今の津波避難計画改定の中で、多くの自治体で検討されている“やむを得ない場合の車両避難は、避難施設以外の安全な地点を目指す”，という点を考慮するものである。浸水区域内の避難施設については、尾崎ら(2024)<sup>9)</sup>による津波数値解析結果に基づいて独自に簡易的な利用判定を行い、最大深水深と建物高さを比較した上で、丸印は利用可能、バツ印は利用不可判定とした。歩行者は設定した避難速度に従い移動するが、車両避難エージェントは、GM 追従モデル(式(2))により、先行する車両および歩行エージェントとの距離と速度差を計測しつつ、加減速の操作を繰り返し、車両避難地点とした赤丸地点へと向かい走行する。

$$\alpha_f^t = \alpha \left[ \frac{(v_f^t)m}{(x_e^{t-\Delta t} - x_f^{t-\Delta t})l} \right] (v_e^{t-\Delta t} - v_f^{t-\Delta t}) \quad \dots(2)$$

ここに、 $\alpha_f^t$ ：加速度， $\alpha, l, m$ ：モデルパラメータ， $t$ ：時間， $\Delta t$ ：反応時間，  
 $e$ ：先行車， $f$ ：後続車， $x$ ：車両位置

追従モデルにおける歩行者からの影響の設定により、走行特性として、3 ケースの実験条件を設定する(表-1)。CASE1 は、車両は他の車両からの影響を受け、車両は歩行者との相互影響を受けずに歩車分離状態で移動可能な設定である。CASE 2 は、歩行者から車両への影響も考慮し、他の車両や歩行者を検知した際は、減速接近後、追い越しを行いながら移動できるという設定である。CASE 3 では、歩行者を超越することはできず、減速接近後は、歩行者が前方から他路線に進行するまで追従するという設定である。これらの詳細な計算条件およびパラメータを表-2 に示す。これらの設定により、冬季の道路状況と避難車両に対する歩行者や他車からの影響を考慮した、より実態に近い津波避難時の車両交通シミュレーションが可能となる。

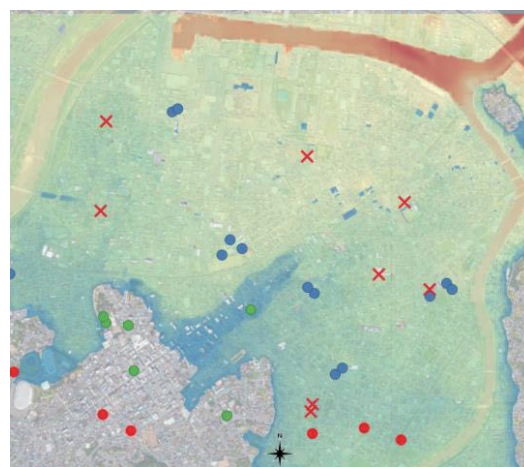


図-4 避難目標地点(丸印)および津波遡上浸水域(最大深水深)

表-1 ケース設定と想定道路条件

CASE	走行特性	想定道路状況
CASE1	追越しおよび追従なし	歩・車道除雪済み 歩車分離
CASE2	接近時減速・追越し	車道のみ除雪済み。 追越し幅員あり
CASE3	接近時減速・追従	車道一車線分のみ除雪済み。 追越し幅員なし

表-2 計算条件

計算実行環境	NetLogo6.4.0
計算ステップ	1ticks(step)=1sec
歩車選択割合	歩行 43%：車両 57%(東日本大震災時調査実績)
総エージェント数	13954 世帯 <sup>10)</sup> 、 <sup>11)</sup> (歩行 5988 世帯：車 7966 世帯)
基準歩行速度 <sup>8)</sup> (区分は歩車共通)	①高齢男性単独世帯 : 1.14m/s ②高齢女性単独世帯 : 1.14m/s ③高齢夫婦世帯 : 1.14m/s ④非高齢2人世帯 : 1.3m/s ⑤非高齢単独世帯 : 1.3m/s ⑥非高齢者世帯(高齢者含) : 1.25m/s
基準運転最高速度	夏季 50km/h：冬季 19.2km/h <sup>2)</sup>
経路探索法	A*アルゴリズム法
車両追従走行	GM 追従モデルに従う
避難開始時間	歩行避難 15min～：車両避難 25min～
遡上開始時間	地震発生後 32min～(数値解析結果 <sup>9)</sup> に基づく)
犠牲判定	水深 0.5m に 10sec 滞在

#### 4. 計算結果

構築したモデルを用いた計算結果として、図-5 に地震発生後 60 分時点での避難地点到達台数と浸水区域外移動中台数を合わせた生存台数の推移と、歩行者および車両の生存・犠牲数を、図-6 に地震発生後 60 分時点での津波浸水域とエージェントの存在位置状況を、①CASE1(夏季)、②CASE2(夏季)、③CASE3(夏季)、④CASE1(冬季)、⑤CASE2(冬季)、⑥CASE3(冬季)の順に示す。

まず、歩行者には追従モデルを適用していないため、ケース間では全く同じ動きが実現する。車両生存数を比較すると、歩車分離して移動ができる CASE1 に対し、歩行者の影響も受ける CASE2 および CASE 3 では生存数が減少することを確認した。特に、冬季想定での生存数の推移では、夏季想定での推移に比べ、減少幅が大きくなる傾向が見られた。冬季の CASE1(図-5 中：④)での生存台数 1537 台に対し、CASE 3(図-5 中：⑥)では 869 台となり、歩行者からの影響を考慮することで、生存台数が最大 668 台(43.5%)の減少となることが分かった。さらに、CASE1 から CASE2 の減少量(265 台)に比べ、CASE2 から CASE3 の減少量(403 台)では、減少量は 1.5 倍となり、歩行者から受ける車両走行に対する影響が大きい事が分かった。その一方、夏季想定でのケース間の差は、歩車分離条件の CASE1 と、歩行者からの影響を受ける CASE2 では 100 台ほどの減少が生じたものの、CASE2 から CASE3 の間では、大きな減少幅は確認されず、冬季想定時より歩行者からの影響は比較的小さい事が分かった。また、地震発生後 60 分時点でのエージェントの位置状況を見ると、追い越し不可能な設定である CASE3 では、CASE1, 2 に比べて浸水域内の車列発生箇所が増加するなど、交通流の変化によって全体の避難行動に影響が生じている事が確認できた。

計算結果より、避難車両の走行に対する歩行者の存在は極めて重要な影響要因であり、現状多くの自治体で行われている歩車間の影響を考慮しない条件では、想定が不十分であることを確認した。特に、冬季の降積雪時の避難を考える場合には、車両の走行特性に対する歩行者からの影響を十分考慮したモデルを用いて、検討を行う必要がある事を確認した。

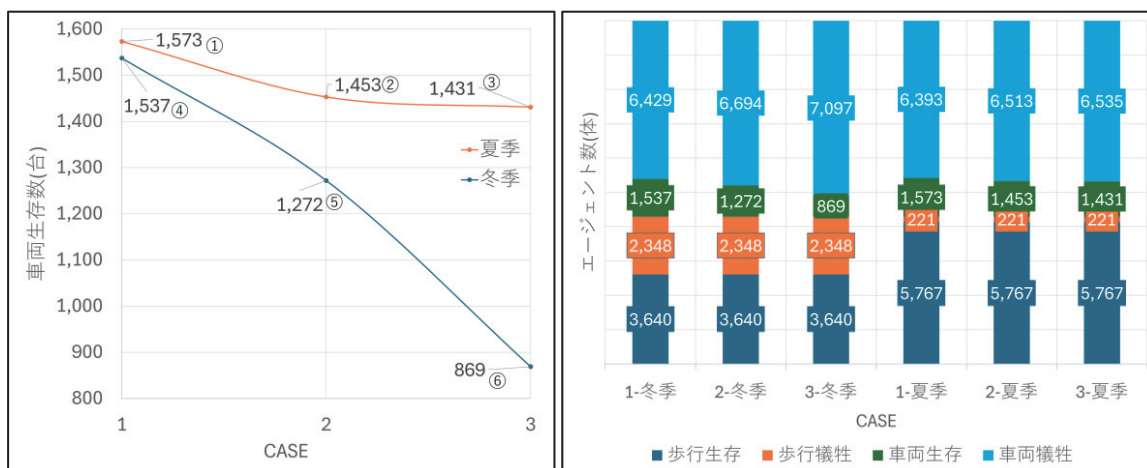


図-5 車両生存数(左図)と生存・犠牲数(右図)

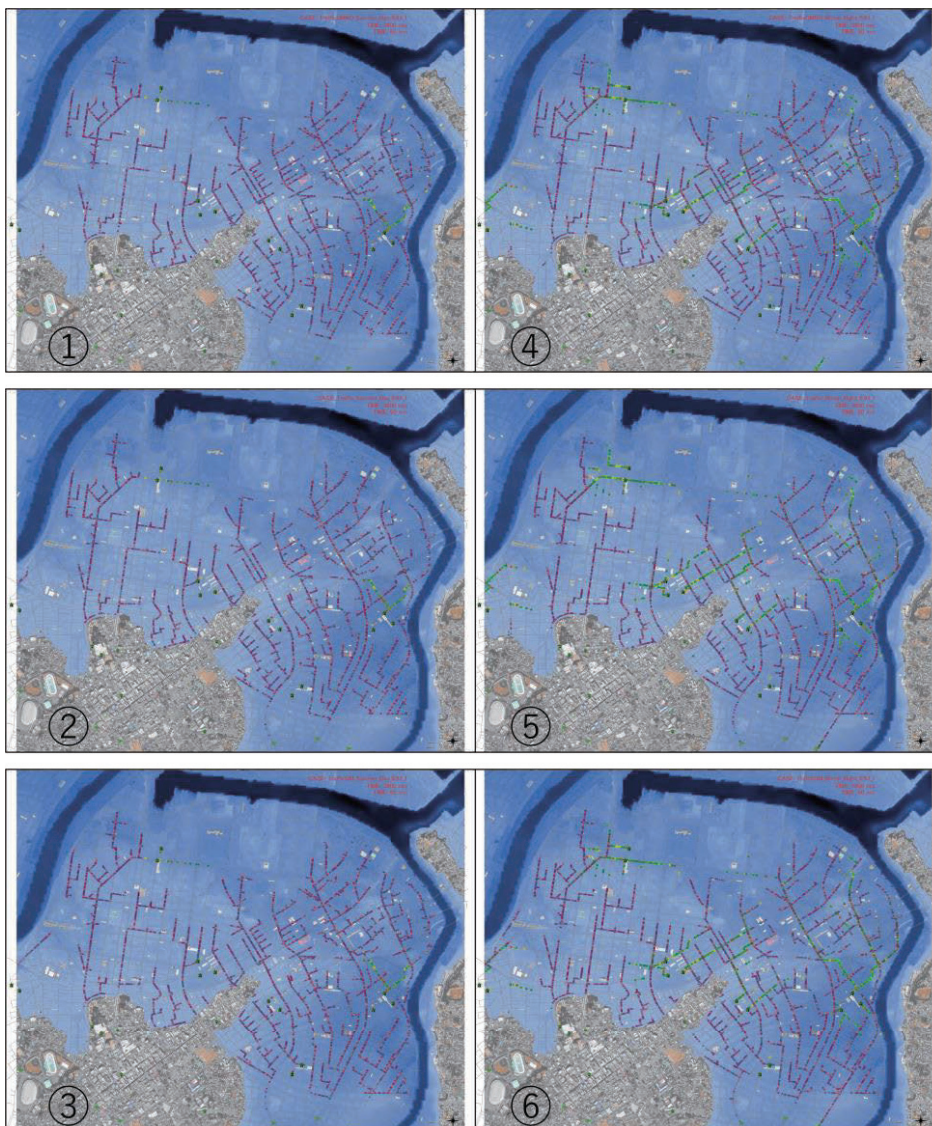


図-6 エージェント存在位置状況(地震発生後 60 分時点, 左列: 夏季, 右列: 冬季)

## 5. おわりに

将来、日本海溝地震の発生により被災が想定される地域のうち、北東北地方太平洋沿岸部の青森県八戸市を対象として、冬季の降積雪時に、津波が発生した場合を想定した冬季の歩道等への積・堆雪状態を考慮した津波避難車両交通シミュレーションを実施した。その結果、避難速度が低下する冬季発災を想定した場合、歩車間の影響が顕著に出現するため、積雪寒冷地での車両利用を含む津波避難を検討する場合には、歩車混在条件の考慮は必須であることを確認した。現状、構築したモデルは車両のみが追従を行うと仮定しており、歩行者は車両および他の歩行者からの影響を受けないものとしている。今後は、歩行者も他者や車両の影響を考慮できる追従モデルを適用して、歩車間の双方向の影響を考慮できるシミュレーションモデルを構築する予定である。

## 参考文献

- 1) 中央防災会議防災対策実行会議 日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震対策検討ワーキンググループ：日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震の対策について 報告書，2022.
- 2) 内閣府(防災担当) 日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震対策検討ワーキンググループ：被害想定手法について(これまでのワーキンググループでの意見を踏まえた手法の検討)，2020.
- 3) 八戸市役所：八戸市津波避難計画  
[https://www.city.hachinohe.aomori.jp/soshikikarasagasu/kikikanrika/keikaku\\_plan/4435.html](https://www.city.hachinohe.aomori.jp/soshikikarasagasu/kikikanrika/keikaku_plan/4435.html). 2022.
- 4) Wang, H., Mostafizi, A., Cramer, L. A., Cox, D., & Park, H.: An agent-based model of a multimodal near-field tsunami evacuation: decision-making and life safety. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 64, 86-100. 2016.
- 5) 禹ハンウル，間所洋和，佐藤和人，田村雄介，山下淳，浅間一：先行車追従モデルに基づいた追従運転者の操作特性の推定，自動車技術会論文集 Vol. 51, No. 2, pp. 304-309, 2020.
- 6) OpenStreetMap: 八戸市道路ネットワークデータ，  
<https://www.openstreetmap.org/export#map=15/40.51956/141.50451>，2024年7月4日取得.
- 7) 内閣府 防災対策推進検討会議津波避難対策検討ワーキンググループ：自動車で安全かつ確実に避難できる方策(補足資料)，2012.
- 8) 小坂陽介，野村尚樹，大藤愛子，宮島昌克：マルチエージェントシステムを用いた津波避難に関する解析-輪島市臨海地域を対象とした事例研究-，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.73, No.4(地震工学論文集第36巻)，pp.I1010-I1017，2017.
- 9) 尾崎壮一，古里春花，堀合紳弥，野島和也，田中聖三，高瀬慎介：構造物を考慮した八戸市における津波遡上解析，日本計算工学会計算工学講演会論文集 Vol. 29. 2024.
- 10) 八戸市役所ホームページ：地域・年齢別人口(2020年4月30日)，地域・年齢別人口(オープンデータ・推奨データ準拠)，2024年11月1日取得.  
<https://www.city.hachinohe.aomori.jp/soshikikarasagasu/johosystemka/tokeijoho/1/2303.html>.
- 11) 八戸市役所ホームページ：令和2年国勢調査結果  
[https://www.city.hachinohe.aomori.jp/soshikikarasagasu/kohotokeika/tokei\\_g/16662.html](https://www.city.hachinohe.aomori.jp/soshikikarasagasu/kohotokeika/tokei_g/16662.html)，2024年11月1日取得.