

津波からの避難車両のモデル化と渋滞等の評価

Modeling of Car Evacuation from Tsunami Attacking and Evaluation for Accompanied Traffic Jam

西畑 剛¹・森屋陽一¹・安野浩一朗²・今村文彦³

Takeshi NISHIHATA, Yoichi MORIYA, Kouichirou ANNO and Fumihiko IMAMURA

In this paper, a model on car evacuations and traffic jams in case of tsunamis is newly proposed and applied to the tsunami evacuation simulation in the case of Kesen-numa city when Tohoku – Pacific Ocean Earthquake Tsunami attacked. While walk evacuation simulations imply some inhabitants hard to escape only by walk, car evacuation calculations introducing the optimum velocity model represent the actual traffic jams recorded by the video images well. The testified causes of some bottlenecks on car evacuations such as narrow roads toward upland and restricted entrance to roof parking or the bridge can be sufficiently explained through the simulations, which reveal that success rate by car evacuation significantly changes according to driving unit number and are expected to apply to disaster prevention plans.

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震津波の来襲時、車による避難行動が沿岸各地で見られた。車の使用は避難者の51.2%に上る（青森県から千葉県、国土交通省調べ）。北海道南西沖地震津波時に渋滞車両が被災した事例もあり、これまで津波からの避難は徒歩によるものとされてきた。東日本大震災時も避難車両の渋滞と渋滞車両が津波に巻き込まれる被災は発生している。その一方で、浸水範囲の広い低平地や避難所までの距離が遠い場合、徒歩避難が困難な高齢者等に対しては、車の利用が有効な避難手段となった事例も多く見られ、現実的にも津波から避難に成功した人の57%が自動車を利用している。こうした避難実態を踏まえ、中央防災会議（2011）は防災基本計画を見直し、原則徒歩避難とするものの、車による避難も可能かを各地域において検討する方針を打ち出している。地方自治体の地域防災計画においても車両避難が言及され始めており、今後の津波防災を考える上で車による避難行動と被災実態を検証することは重要と考えられる。

本研究は、宮城県気仙沼市を対象として東北地方太平洋沖地震津波の浸水を数値解析し、徒歩および車による避難行動をシミュレーションによって再現する。特に車による避難に対しては、被害の実態を現地で撮影されたビデオ画像やヒアリングから把握するとともに、車両の渋滞を津波災害時にアレンジしたモデルを提案し、シミュレーションへ組み込むことで検討地点に発生した車両渋滞を再現する。徒歩避難および車両避難双方の現地における問題点を抽出した上で、特に車両渋滞の被災への

影響を明らかにすることを研究目的とする。

2. 車両渋滞による被害実態の確認

気仙沼湾奥部の気仙沼地区の一部を研究対象とした。検討範囲および範囲内の渋滞発生箇所を図-1に示す。渋滞箇所は当地で撮影された津波時のビデオ画像（東北放送（2011）、東日本放送（2011）など）や気仙沼市からのヒアリングから確認した。また、現地踏査で渋滞発生道路も確認している。

検討範囲には気仙沼市の公的避難所が10箇所あるが、その内、浸水範囲外となるのは気仙沼小学校等、高台の避難所3箇所である。高台へ至る街路は車両通行には幅



図-1 検討範囲と渋滞発生箇所
(Google earth 画像 (2011/3/13) に上書)

1 正会員 博(工) 五洋建設(株) 技術研究所
2 正会員 五洋建設(株) 技術研究所
3 正会員 工博 東北大学教授 災害科学国際研究所

員の狭い道が多く見られ、一部は車両通行ができなかった（歩行による避難のみ可能）。避難車両は高台の他、魚市場屋上駐車場へ逃げ込む例も多く、渋滞・被災の一因となった。なお潮見町から川口町にかけての埠頭域では地域外からの労働流入も大きい。これらの労働者の多くは、震災時、大川の気仙沼大橋を渡って対岸の田中前地区方面への車両避難を試みたが、幸町から内の脇地区で渋滞に巻き込まれ、被災に至った車両も多い。

3. 津波による浸水解析

(1) 解析手法

東北地方太平洋沖地震津波の波源は、東北大学の地震断層モデル Ver.1 から Mansinha and Smylie (1971) の方法で初期水位を決定した。津波の伝搬は、線形および非線形長波方程式をリーブログ法で差分化し、検討域に近づく程、格子解像度を上げて領域接続して解析する。津波波源と解析領域、格子サイズを図-2にまとめる。検討範囲の陸上遡上は小谷ら (1998) の方法で計算を行い、土地利用に応じた粗度分布を与えた。なお、検討地点は地震による解析地盤沈下量を陸上標高に加味して与え、

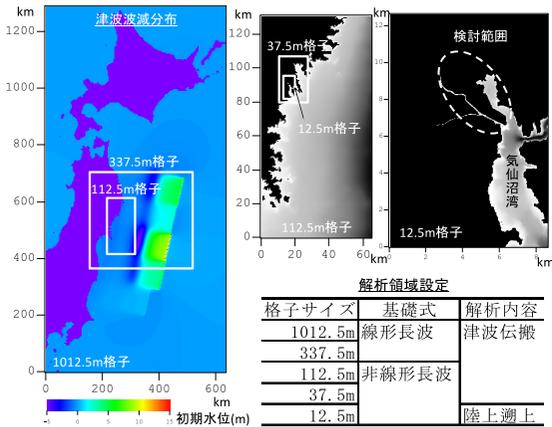


図-2 津波波源と解析領域

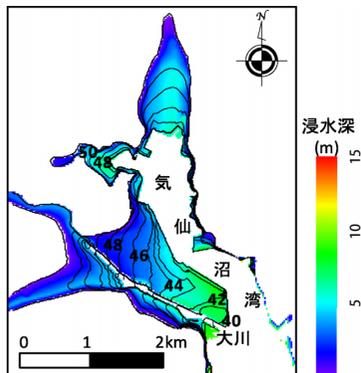


図-3 浸水範囲および浸水開始時間 (分)

解析潮位は神明崎地点における地震発生直後の潮位とした。数値解析は地震発生後2時間まで実施した。

(2) 計算結果

解析浸水範囲および浸水開始時間を図-3に示す。国土地理院による調査結果とほぼ一致する浸水範囲が得られた。気仙沼湾や大川から陸上浸水が起こるが、地震発生後40分から50分以降までの間に広範囲に渡って検討域は水没する。ここでの解析最大波はこの第1波押し波となった。浸水範囲の多くは浸水深さ2m以上であり、首藤 (1992) の木造家屋の破壊基準以上となるが、実際にも多くの建物が流失した。また広範囲に渡る浸水は、現地で漂流物の発生や火災の延焼をもたらしている。

4. 徒歩による避難のシミュレーション

浸水解析から得られた浸水深、流速の時系列データを外力条件として避難シミュレーションを実施した。徒歩避難のシミュレーション手法概要と結果を以下に記す。

(1) 徒歩避難のモデル化手法

検討範囲内に1000人の避難者を行政区分毎の人口比率 (平成23年度、気仙沼市) を参考にして配置し、避難シミュレーションを実施した。計算手法詳細は西畑ら (2006) が当地点で実施したシミュレーションと同様であり、ここでは概要を述べる。シミュレーションにおける避難街路はGISから読み取った道路線形からノード・リンクで表現される (図-4)。避難者は各ノードに設定されたハザードポテンシャル値に応じてリンクを選択する。ポテンシャル値は各避難所からの距離やノード浸水の有無等によって決まる。避難所配置は気仙沼市の防災マップに基づいた10箇所ないし津波浸水範囲外の高台3箇所のみとした2ケースを考えた。また避難者の体力差を踏まえ、北海道南西沖地震津波時の調査例を参考に30



図-4 避難モデルの概要 (60歳以上1000人配置時解析例)

表-1 徒歩避難の解析条件

避難者数	避難所数	年齢・歩行速度	避難開始時間
1000人 (行政区別に按分)	10箇所 高台3箇所	30歳代 (1.47m/s) 60歳以上 (0.58m/s)	0分から60分まで 2分毎、一斉に避難開始

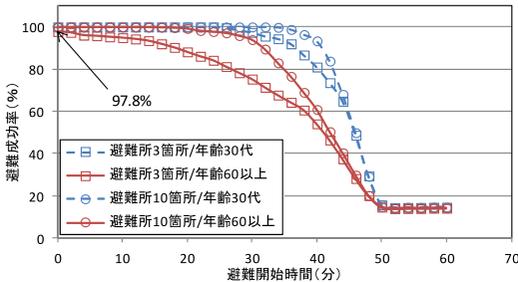


図-5 避難開始時間と避難成功率 (徒歩)

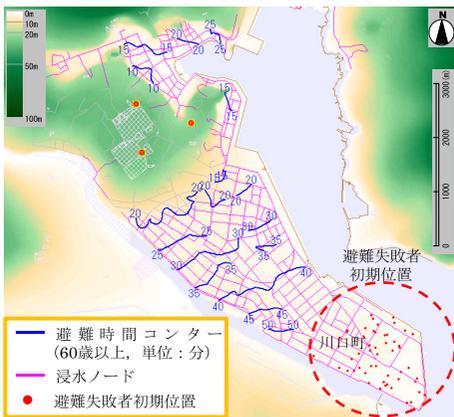


図-6 避難所要時間と避難失敗者初期位置の解析例 (60歳以上1000人地震発生後10分から避難)

歳代、60歳以上の年齢別に歩行速度を変えて解析する。なお検討地区の高齢化率は約30%と全国平均よりやや高い、徒歩による避難シミュレーションの解析条件を表-1に示す。

(2) 徒歩による避難シミュレーション結果

避難開始時間と成功率を図-5に示す。高齢な避難者や避難所数が少ない場合に避難困難となる比率が増えるわけであるが、今回の津波のように浸水範囲が広い場合、より安全な高台避難所3箇所へのみ避難する場合、高齢者の避難成功率を100%にすることは難しいことがわかる。すなわち避難不能となる領域が出現する。図-6に避難所要時間と避難失敗者の初期位置の例を示す。検討範囲南側(川口町)では地震発生直後に避難しても徒歩では高台までは逃げ切れない場所が存在する。

5. 車による避難のシミュレーション

車による避難シミュレーションにおいても徒歩避難と

同様に浸水外力条件、避難所や街路を設定し、ポテンシャルモデルに従った避難行動を取るものとする。但し、渋滞等、車による避難特有の設定も必要となるため、避難車両のモデル化手法詳細を記した上で検討結果を示す。津波からの車両避難特有の設定としては、停電に伴う交差点での一時停止と浸水ノードからの引返しを導入した。

(1) 避難車両のモデル化手法

a) 最適速度モデル

渋滞を表すモデルは、いくつかの種類があるが、避難シミュレーションへの取り込みを勘案し、長井ら(2005)による最適速度モデルを採用した。最適速度モデルは、道路上を走行する車列について、車間距離および現在速度を参照することで車1台1台の加速度を決定するモデルである。モデルは以下の運動方程式に従う。

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} = a \left\{ V(\Delta x_i) - \frac{dx_i}{dt} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $x_i(t)$: 時間 t における車 i の位置、 $\Delta x_i = x_{i+1}(t) - x_i(t)$: 同車間距離、 a : 感度でありドライバーの反応が早いほど値が大きくなる。式(1)の加速度から避難車両の位置と速度が数値的に決まる。また、 $V(\Delta x_i)$: 最適速度関数であり、次式の通りである。

$$V(\Delta x_i) = \frac{v_{max}}{2} \{ \tanh(\Delta x_i - x_L - x_c) + \tanh(x_c) \} \dots\dots (2)$$

v_{max} : 車の最高速度、 x_L : 車長さ、 x_c : 安全距離である。すなわち式(2)に示す最適速度関数は、車間距離が短い時は0、十分車間が開いた場合は最高速度へ漸近する。この最適速度に近づくように車の加速度が式(1)によって決まる。

b) 交差点の設定

交差点では、実際と同様に地震時の停電を想定し、信号機は機能しないものとした。すなわち交差点に入る前に車は一時停止するものとし、一時停止時間を設定した。また交差点(ノード)では複数の街路(リンク)が接続するため、2方向以上から車の流入が起こる場合がある。その際は、到着順に応じて各リンクから交互に車が流入するものとする。図-7に避難車両モデルの概要を示す。

c) 道路幅と車の速度

車の最高速度は、道路の法定速度を参考に設定する。法定速度は道路幅や道路線形、勾配等から決まるが、ここでは、簡略化のため道路幅から決定した。道路幅は避難街路を設定する際、GISから同時に読み取り、道路幅別に法定速度=最高速度として設定した。

d) 2車線モデル

人間の徒歩避難の場合、浸水ノードへ向かう人は引き返した人との情報交差によって逆方向へ向かう設定とした。車の場合、情報交差は入れないで反対方向へ引き返

表-2 車両避難の解析条件

項目	設定
車両台数(地区保有数比率)	300, 600, 1000台(10%, 19%, 32%)
避難所数	3箇所(高台) 5箇所(高台+気仙沼大橋, 魚市場)
避難開始時間	0分-60分まで2分毎, 一斉避難
感度 / 時間刻み	0.5 / 0.01s
車長 / 安全距離	4.7m (小型自動車) / 15m
一時停止/方向転換時間	3s / 120s
最高速度	道路幅 ~1.5m : 車両通行なし 道路幅 1.5~3.0m : 30km/h 道路幅 3.0~5.5m : 40km/h 道路幅 5.5~ : 60km/h

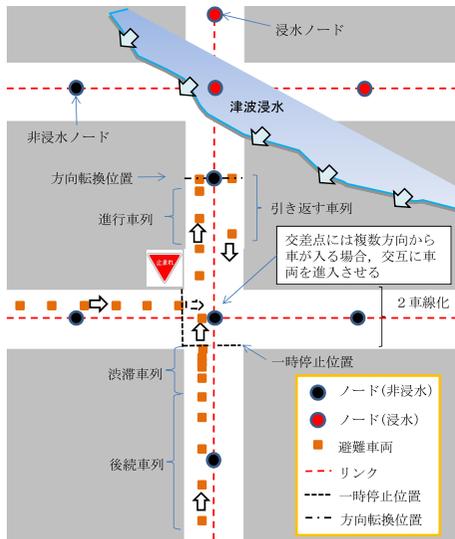


図-7 避難車両のモデル化手法概要

したい。そのため、リンクを2車線化することで進行車列と引き返す車列を区別するとともに、引き返す場合は方向転換の時間を設定した。車は進行方向のノードが浸水している場合、その時点から浸水ノード（ハザード）のポテンシャルが $+\infty$ となるようにポテンシャル空間が与えられるため、方向転換を図ることになる。

(2) 車による避難シミュレーション結果

検討地点における避難シミュレーションを車の初期配置台数および避難開始時間を変えて行い、避難成功率を算定する。ここで避難所は、非浸水範囲の高台3箇所としたが、ヒアリングに基づき、気仙沼大橋を通るように仮定の避難所を設定した場合や魚市場駐車場へ向かったケースも考える。解析条件を表-2に示す。避難車両の台数は人口統計データから解析範囲の車保有台数を推定の上、設定した。車保有台数は夜間人口（住民）に対するものであり、また1台に乗車する人数や検討域での実際の車使用率は未調査であるが、冒頭で述べた東日本沿岸

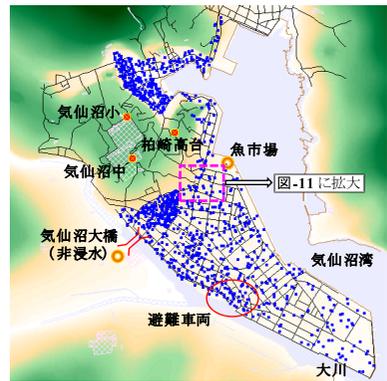


図-8 避難所設定および車両配置 (1000台)

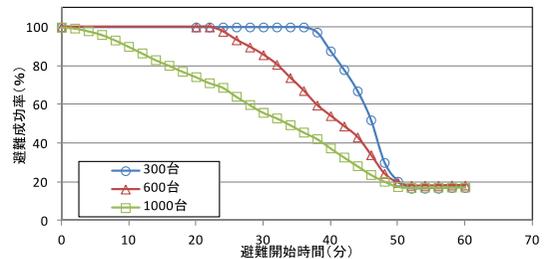


図-9 車両台数別避難成功率 (避難所3箇所)

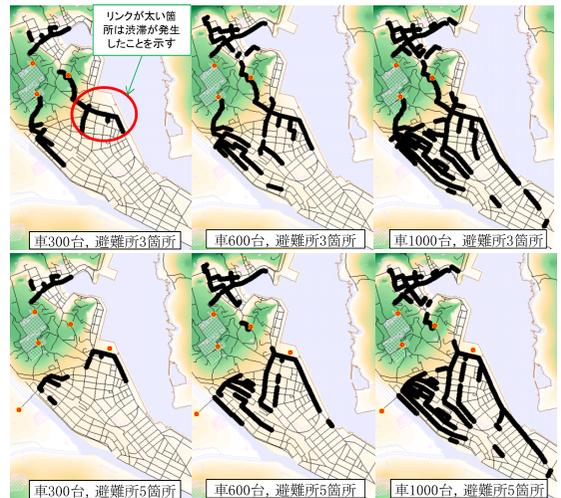


図-10 車両台数別渋滞発生箇所 (地震発生直後に避難)

部の車による避難率を勘案して複数設定した。なお避難車両は一定時刻に一斉に避難を開始させるため、渋滞が起り易くなる設定であることに注意されたい。車の最高速度は前述の通り道路幅員別に仮定した。例として図-8に車1000台の場合の初期配置と避難所設定を示す。

避難開始時間と避難成功率の解析結果を、避難車両台数別に図-9に示す。避難車両が増えるに連れて渋滞が顕著に発生するため、避難成功率は低下する。特に1000台(地区保有台数の3割強)が避難に使われた場合、地震発

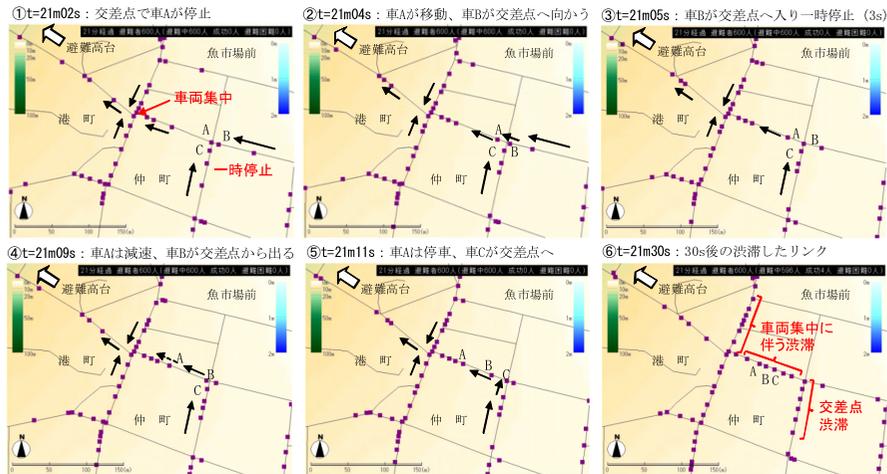


図-11 渋滞位置の拡大スナップ (車600台, 避難所3箇所)

生から数分後に避難した場合も避難失敗する車両の発生が解析された。渋滞発生箇所を図-10に示す。ここで徐行(10km/h以下)が2分以上続いた場合を渋滞と判定した。ビデオやヒアリングから渋滞が起こっていた場所は概ね、シミュレーションでも渋滞している。渋滞は高台の麓から発生する 경우가多く、車両通行道路が限定される低地から高台へ至る道への車の集中が原因と考えられる。参考までに図-8拡大域で発生した渋滞のスナップショットを図-11に示す。本研究で設定した最適速度モデルに応じた加減速や交差点における一時停止・車両の交互流入によっても渋滞が発展する様子を読み取れる。すなわち電源喪失時の交差点も渋滞に影響すると考えられる。なお、避難所を高台3箇所だけではなく、実際の避難車両行動に合わせて魚市場駐車場や気仙沼大橋へ向かう設定とした場合でも、駐車場や橋への車両集中により現実の渋滞状況に近い結果が得られている(図-10下段)。

5. おわりに

本研究で得られた主要な結論を以下にまとめる。

- (1) 本検討地域では、災害時に船舶等の漂流や火災等の2次災害が見られ、浸水範囲内の避難所使用には課題がある。一方で徒歩による避難シミュレーションからは、浸水範囲外の高台へは避難困難となる高齢者が存在するため、徒歩によらない避難方法も必要となる。
- (2) 車による津波避難のモデル化手法を提案し、車両による避難シミュレーションを実施したところ、本手法によって実際の渋滞発生箇所が概ね再現可能であることがわかった。
- (3) 被災車両の多くは高台やビル屋上駐車場、内陸方面へ向かう橋手前で渋滞に巻き込まれていたことがビデオ画像やヒアリングから判明し、シミュレーションで

検証された。

- (4) 検討地域では高台へ向かう狭い道路や橋、駐車場入口への限られた避難路がボトルネックであり、停電を伴う交差点も渋滞の一因になったと考えられる。
- (5) 車両避難の成功率は、車の走行台数によって大きく変わるため、災害時の交通量を考慮した対応を図る必要がある。徒歩避難と車避難を組み合わせた対処も一案となり得るが、最適な運用はこうした避難シミュレーションから考察することが必要と考えられる。

謝辞：津波発生時の潮位や現地避難状況について気仙沼市総務部危機管理課の方々から多くの知見を得、シミュレーションに反映させた。また、検討においては京都大学、間瀬肇教授、森信人准教授からの貴重なご助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫(1998): GISを利用した津波遡上計算と被害予測, 海工論文集, 第45巻, pp. 356-360.
 首藤伸夫(1992): 津波強度と被害, 東北大学津波工学研究報告, 第9号, pp. 101-136.
 中央防災会議(2011): 防災基本計画, p. 76.
 津波対策推進マニュアル検討委員会(2002): 津波対策推進マニュアル検討報告書, p. 38.
 東北放送(2011): 東日本大震災の記録~3.11宮城~(ビデオDVD)
 長井亮一・長谷隆・山田晃生(2005): 多相交通流モデルの交通状態と渋滞轉移, ながれ24, pp. 619-628.
 西畑剛・森屋陽一・田村保(2006): 沿岸防災施設による津波時の人的被害軽減効果について, 第22回海洋開発論文集, pp. 565-570.
 東日本放送(2011): 3.11東日本大震災 激震と大津波の記録(ビデオDVD)
 Mansinha, L. and D.E.Smylie (1971): The displacement fields of inclined faults, Seismol. Soc. Amer., Vol.61, pp. 1433-1440.