

# 津波レベルの違いによる避難時の人的被害予測に関する研究

安野 浩一朗<sup>1</sup>・森屋 陽一<sup>2</sup>・西畑 剛<sup>3</sup>・間瀬 肇<sup>4</sup>・森 信人<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 土木技術Gr (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)  
E-mail:kouichirou.anno@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>2</sup>E-mail:yoichi.moriya@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>3</sup>E-mail:takeshi.nishihata@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>4</sup>正会員 京都大学防災研究所 気象・水象災害研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)  
E-mail:mase.hajime.5c@kyoto-u.ac.jp

<sup>5</sup>E-mail:mori@oceanwave.jp

東日本大震災による甚大な津波被害の発生を踏まえ、人的被害の抑制を第一に考える減災対策が重要視されるようになった。本研究は、気仙沼地点を対象として、これまでの想定連動型地震津波（レベル1津波）、および東北地方太平洋沖地震津波（レベル2津波）について避難行動解析を実施し、津波レベルや避難方法、年齢の違い等が人的被害へ与える影響について詳細に解析した。その結果、レベル2津波では、海沿いの60歳以上の高齢者は地震発生直後に徒歩による避難を開始したとしても避難困難となる可能性が高く、地震発生から40分後に避難開始した場合で30%の避難困難者が発生する。また、自動車による避難では、走行車両の数による避難成功率の変化が大きく、1000台程度まで車両が増加すると、徒歩避難よりもかえって避難時間を要し、40分後に避難開始した場合で40%台まで避難成功率が低下することなどの結果が得られた。

**Key Words** : tsunami, evacuation, car traffic jam, simulation of human evacuation

## 1. はじめに

東日本大震災による甚大な津波被害の発生後、各方面で津波対策に関する研究・検討が行われている。今後の津波対策においては、複数のシナリオに対しての津波対策が求められるとともに、人的被害の抑制を第一に考えた減災対策が一層重要視されるようになった。また、これまでの避難方法は徒歩を前提とした行動を推奨していたが、東日本大震災では多くの避難者が自動車による行動を選択した例がある等、実情の避難手段に即した人的被害の想定が求められている。今後の津波対策、避難計画を策定する上では、想定する津波レベルの違い等、人的被害についてより現実的で高精度の予測を行い、避難計画策定に役立てることが重要である。そこで、本研究では、宮城県気仙沼市を対象としてこれまでの想定連動型地震津波（レベル1津波）、および東北地方太平洋沖地震津波（レベル2津波）の双方について避難行動解析を実施し、津波レベルや避難方法、年齢の違い等が人的被害へ与える影響について詳細に解析し把握することを目的とする。

## 2. 津波浸水解析

### (1) 解析条件および手法

まず、避難行動解析における外力条件を把握するために、別途津波浸水解析を行って各地点の水位・流速データを作成した。津波浸水解析におけるレベル1津波の波源は、宮城県防災会議地震対策専門部会による第3次被害想定「宮城県沖地震(連動型)」<sup>1)</sup>を、レベル2津波は、東北大学の東北地方太平洋沖地震津波の地震断層モデル Ver.1.2<sup>2)</sup>をそれぞれ用いた。波源データに基づき、Mansinha and Smylieの方法<sup>3)</sup>で初期水位を決定し、地盤面の標高は東日本大震災前のデータを用い、潮位条件は神明崎地点における東日本大震災地震発生直後の潮位とした。津波の伝播は、線形および非線形長波方程式をリープフロッグ法で差分化し、検討域に近づく程、格子解像度を上げて領域接続した数値モデルにて解析した。検討範囲の陸上遡上は小谷ら<sup>4)</sup>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、解析は地震発生後2時間まで実施した。

図-1 に解析領域と津波レベル毎の初期水位分布図を示す．レベル1 津波においては，初期水位の最大値が5 m程度である一方，レベル2津波では，15mまでに至っておりレベル1 津波の約3 倍の初期水位が生じている．

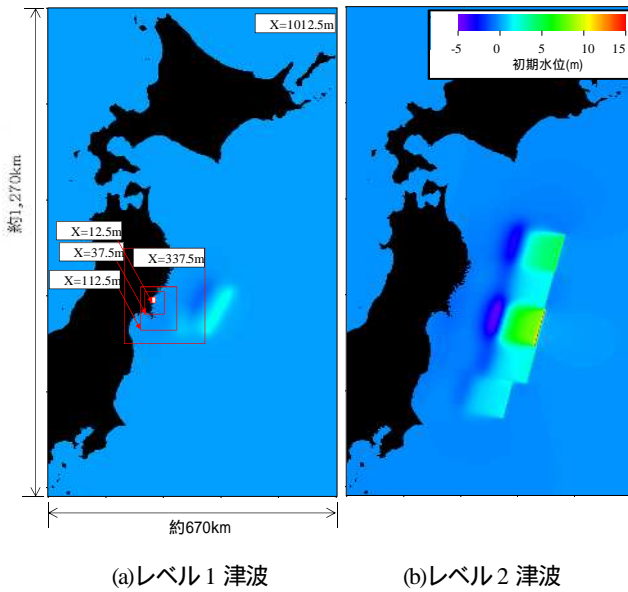


図-1 解析領域と初期水位分布

(2) 解析結果

解析による浸水範囲を図-2 および図-3 に示す．レベル1 津波のケースにおいては，潮見町から魚市場付近にかけてのエリアでの浸水が顕著であり，潮見町先端での浸水高3 m程度が最大値となっている．また，北部領域では，浜町から錦町にかけての浸水が目立つ．その他，南町付近，大川からの遡上による九条にかけての浸水が想定される．

一方，レベル2津波では護岸からの直接的な浸水と大川からの遡上による影響とが合わさり，魚市場から九条にかけての全域での浸水が見られる．中には浸水高が7.5 m以上の区域もあるなど，津波レベルの違いにより大きな差が生じている．最大浸水高の相違は，沖に近く，比較的早いタイミングで浸水が発生する潮見町付近で顕著に見られる．北部の浸水領域は錦町奥部まで及んでおり，その他，大浦地点での浸水も比較的目立っている．浸水特性は，陸域での遡上による影響よりもむしろ護岸付近での浸水の方が大きくなる傾向を示している．

本検討により，津波レベルの違いによる気仙沼地点の浸水領域は，エリア換算で約1.5~1.7倍，浸水高では約2.0~2.5倍もの差が生じることがわかった．なお，図には示していないが，レベル2津波における浸水領域については，解析結果と現地測量結果の比較が，概ね一致することを確認した．

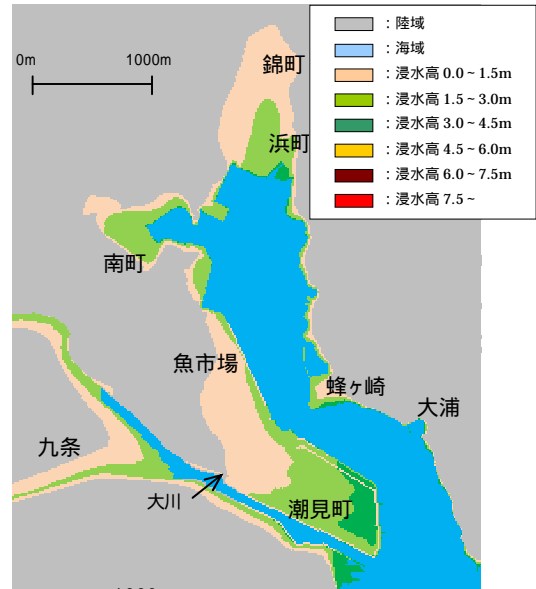


図-2 浸水領域と最大浸水高(レベル1 津波)

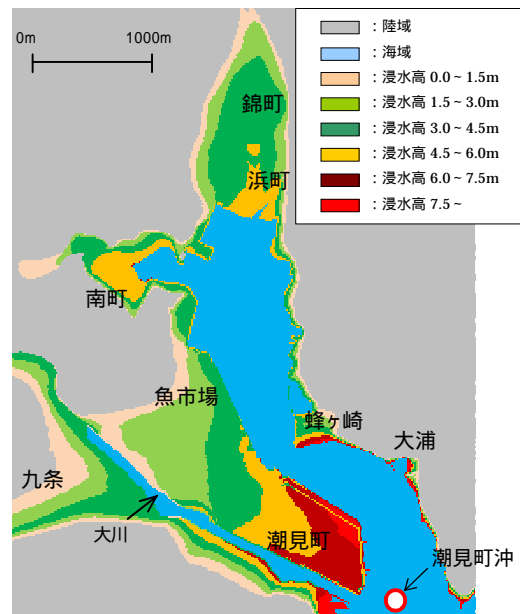


図-3 浸水領域と最大浸水高(レベル2 津波)

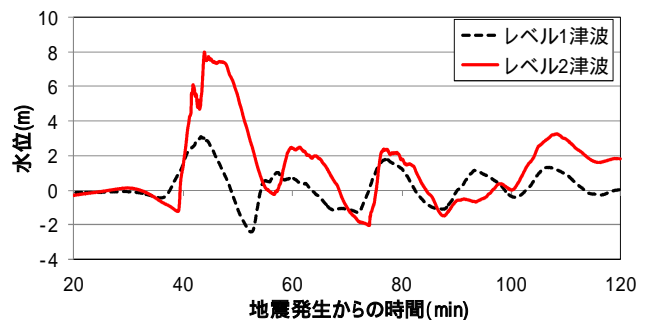


図-4 水位時刻歴の比較(潮見町沖)

図-4 に潮見町沖付近の水位時刻歴を示す。潮見町沖での水位時刻歴の比較によれば、レベル1津波、レベル2津波ともに第1波目の津波が最も高く、最大水位に大きな差が見られるものの、地震発生から水位が2m程度まで上昇する時刻は津波レベルの違いによる差が殆ど見られず、また第1波目のピークに達する時刻も殆ど同じであった。

### 3. 避難行動解析の概要

#### (1) 解析手法の概要

解析手法は西畑ら<sup>5)</sup>と同様にGISから読み取った道路線形から避難街路をノード・リンクで表現し、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手法とした。避難者が逃げる方向を判断する方法は、多くの意思要因があるものの、本研究でのポテンシャル値は近くの避難所に向かう設定にし、避難所は実際の気仙沼市に指定されている地点のうち、浸水しない高台3箇所とした。また、避難者の初期位置は、当該地区の人口分布特性を考慮して配置した。図-5に避難者の初期位置を、表-1に設定条件を示す。

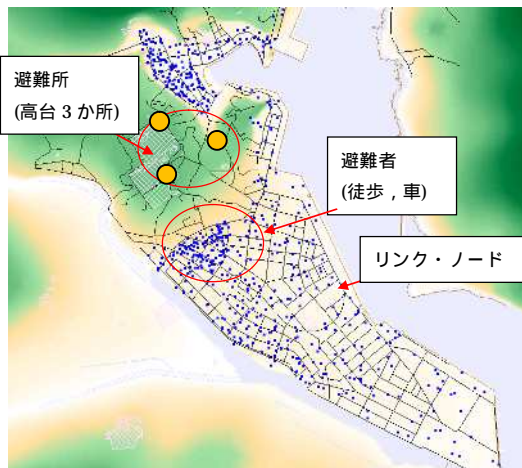


図-5 避難モデルの概要 (初期に1000人配置)

表-1 設定条件

項目	徒歩避難	車両避難
避難者数	1000人	300台, 600台, 1000台
避難所数	3箇所(高台)	
避難場所	知っている(最も近い避難所ルートを選択)	
感度	冷静な判断をする(所定時刻に避難を開始)	
緊急時	高い場所へ避難する	
避難速度	【一定速度】	【最高速度】
	30歳代 5.29km/h	道路幅 ~ 1.5m : 通行なし
	40歳代 3.71km/h	道路幅 1.5 ~ 3.0m : 30km/h
	60歳代 ~ 2.08km/h	道路幅 3.0 ~ 5.5m : 40km/h 道路幅 5.5 ~ : 60km/h

#### (2) 避難者の特性 (徒歩および車両)

避難者の避難方法は、徒歩の場合と車両による双方を対象とした。徒歩避難においては、避難者の体力差を踏まえ、西畑ら<sup>5)</sup>と同様に北海道南西沖地震津波時の調査例を参考にした年齢別の避難歩行速度を与えた。一方、車両の場合においては、西畑ら<sup>6)</sup>の車両間距離に依存する最適速度モデルの運動方程式を用いることとし、それを個々の避難車両に適用することで、渋滞の発生や交差点での一時停止などといった特性を捉えることとした。

避難困難者の判定は、徒歩の場合で西畑ら<sup>7)</sup>の実験結果に基づくこととし、車両の場合では、馬場ら<sup>8)</sup>の実験結果を元に設定した。式(1)および(2)に設定値を示す。

徒歩の場合

$$v \geq 0.4 \quad \text{or} \quad h \geq 0.7 \quad (1)$$

車両の場合

$$h \geq 0.7 \quad (2)$$

ここに、 $v$ は流速(m/s)、 $h$ は浸水深(m)を示す。

#### (3) 道路閉塞

地震動により道路が塞がり、避難路として活用できなくなる容易に想像される。そこで人的被害の評価における現実性をより深めるために、直接的な地震動による道路閉塞を考慮するモデルを導入した。本研究では、兵庫県南部地震の調査結果を元に提案された瓦礫の散乱による道路閉塞の発生を考慮する赤倉ら<sup>9)</sup>の確率モデルを拡張した田村ら<sup>10)</sup>の手法を用いて、道路が閉塞する幅員を確率的に評価した。なお、避難行動へ支障が生じる条件は、閉塞幅員と各リンクの幅員の差分が徒歩の場合で0.5m、車両で1.5m以下と暫定的に定義した。表-2および式(3)に定義を示す。

表-2 震度レベル毎の瓦礫幅 (沿道両側)

震度(日)	$\mu$	$\sigma$
5	0.00m	0.00m
6	-0.82m	1.57m
7	1.27m	3.14m

$$w' = \Phi^{-1} \left\{ \Phi \left( \frac{w - 3.0 - \mu_l}{\sigma_l} \right) \right\}^{1/n} \sigma_l + \mu_l + 3.0 \quad (3)$$

ここに、 $w$ は街路幅、 $w'$ は瓦礫散乱後の街路幅、 $\Phi$ は標準正規分布関数、 $\mu_l$ は平均値、 $\sigma_l$ は標準偏差をそれぞれ示している。 $n$ は平均的な道路沿線の建物数を示し、ここでは各リンクの距離に依存するように設定した。モンテカルロ法により、この瓦礫散乱によるリンク毎の街路幅の変化を確率的に算出して道路閉塞を評価する。

#### 4. 避難行動解析の結果

##### (1) 徒歩避難 (年齢の違いによる影響)

図-6および図-7に、徒歩による避難を行った場合の避難開始時間と避難成功率の関係を示す。なお、図中の浸水開始とは、気仙沼市への浸水が始まる時間を示している。レベル1津波のケースにおいては、地震発生後から10分後に避難を開始したあたりから、60歳以上の避難成功率が100%を下回り始める。津波による陸上浸水が始まる42分後だと30歳代で90%、65歳以上で72%となっている。その後の10分程度の避難開始時間の遅延による避難成功率の低下が著しく、例えば、40歳代においては、42分後の83%から50分後の59%まで急激に低下する。避難開始時間が50分まで遅れると、避難行動による影響は殆ど見られず、初期位置が浸水範囲に該当するか否かで避難成功率が決定される。一方、図-7に示すレベル2津波においては、60歳以上のケースで地震発生直後に避難を開始したとしても避難成功率が100%を下回っている。また、全体的に避難開始時間の遅れによる避難成功率の低下傾向がレベル1津波の場合よりも顕著になっており、特に、浸水が始まって以降の10分程度での30歳代の落ち込みが目立つ。浸水後の避難成功率の急速な低下は、一旦陸上浸水が開始すると急速に且つ広範囲に津波が遡上するためであると考えられる。

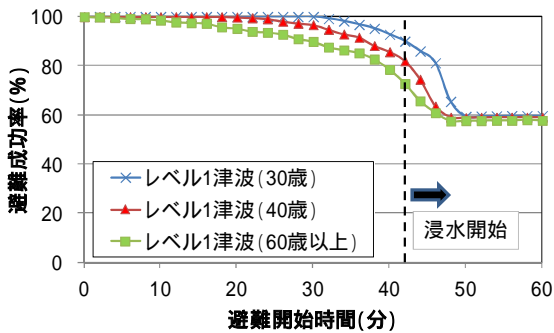


図-6 避難行動解析の結果 (レベル1 津波, 徒歩避難)

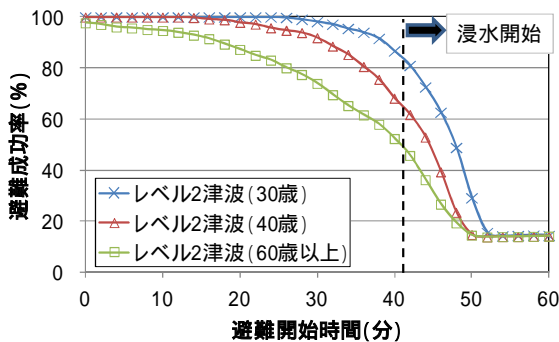


図-7 避難行動解析の結果 (レベル2 津波, 徒歩避難)

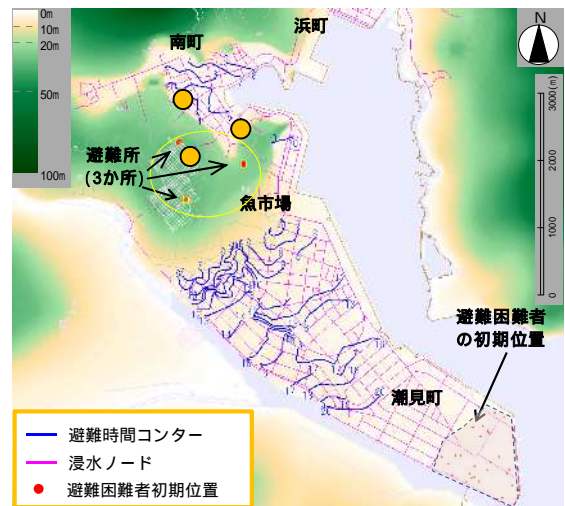


図-8 避難時間コンターおよび避難困難者の初期位置 (レベル2津波, 30歳代, 30分後開始, 避難成功率98%)

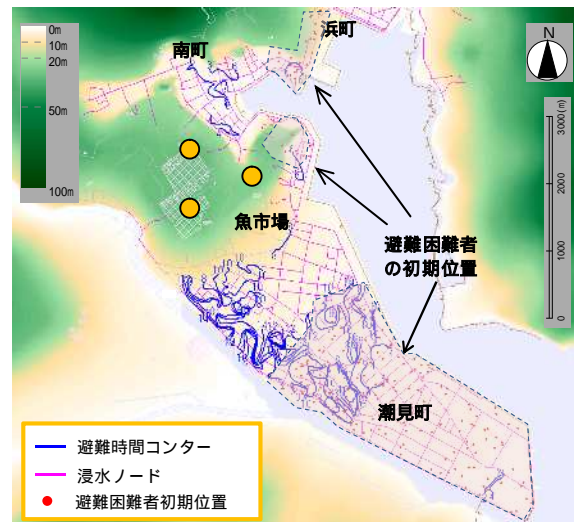


図-9 避難時間コンターおよび避難困難者の初期位置 (レベル2津波, 30歳代, 42分後開始, 避難成功率81%)

図-8および図-9に、避難時間コンターと避難困難者の初期位置分布を示す。避難困難と判定される避難者の初期位置は、潮見町先端の沿岸部に集約しており、開始時間の遅れに伴って、内陸部の避難困難者が増加する傾向にある。また、浸水開始後に避難を始めると、浜町や魚市場などの沿岸域の避難者も避難が困難となる可能性がある。

##### (2) 車両避難 (走行台数の違いによる影響)

図-10および図-11に、車両による避難を行った場合の避難開始時間と避難成功率の関係を示す。60歳以上の徒歩避難を対象とした結果も合わせてプロットしている。なお、避難車両1000台とは、当該地区住民の保有車両台数の約3割に該当している。また、年齢の違いによる車両運転技術の差異については本研究では考慮していない。

レベル1津波の結果は、車両台数が300台のケースで浸水が始まる前後から急激に避難成功率が低下しているものの比較的高い値を維持できていることを示している。車両台数の増加に伴って、同じ避難開始時間でも徐々に避難成功率が低下する傾向を示し、1000台のケースでは、60歳以上の徒歩避難成功率よりも寧ろ危険性が高くなる傾向がある。図-11に示すレベル2津波では、さらに車両台数の増加による避難成功率に与える影響が大きくなっている。300台程度の走行数ならば、地震から36分経って避難を開始しても十分避難が可能となる結果を示している。一方で、1000台程度までに増加すると、36分後の避難開始は40%台まで避難成功率が低下する。

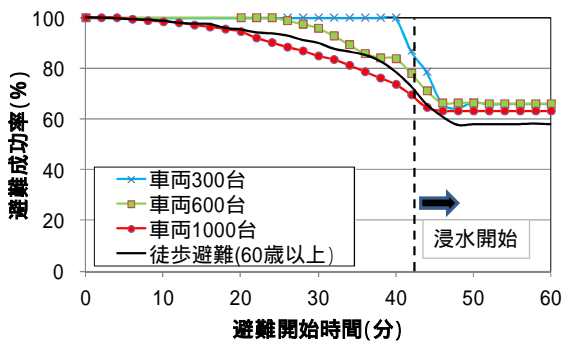


図-10 避難行動解析の結果(レベル1津波, 車両避難)

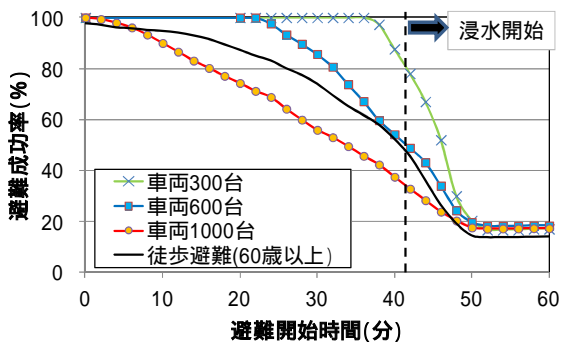
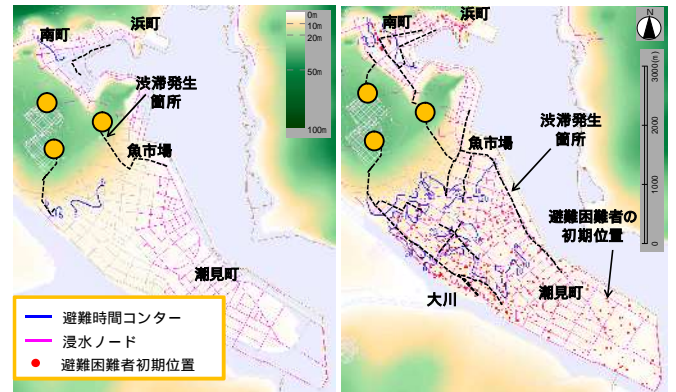


図-11 避難行動解析の結果(レベル2津波, 車両避難)

図-12に避難困難者の初期位置および渋滞発生箇所の例を示す。なお、プロットした渋滞発生箇所は、交差点(ノード)を中心に車両が3分以上列を形成したリンクと定義した。レベル1津波で車両300台のケースでは、避難にかかる時間が5分程度となっており、渋滞の発生箇所も避難所の高台に通じるリンク数が所に留まっている。そのため、比較的スムーズに避難が進み、避難成功率は100%に達している。一方、1000台のケースでは、渋滞発生箇所に加え、渋滞距離も大幅に増加している。渋滞発生箇所は、魚市場から潮見町にかけての沿岸域と、

大川沿線のリンクに集中している。特に、魚市場周辺のノードは円滑な避難を行う上でのボトルネックになっているものと思われる。結果的に、距離的には車両を用いれば避難所に到達することが可能な避難開始時間であっても、渋滞中に津波に巻き込まれ避難困難に至る車両が多数発生している。以上から、当該地点においては、現状の街路配置の状況下では車両による避難が必ずしも有効になるとは限らないことを示唆している。

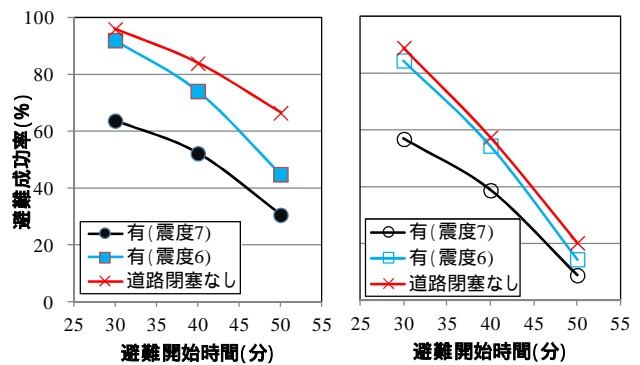


(a) レベル1津波, 300台 避難成功率100% (b) レベル2津波, 1000台 避難成功率56%

図-12 避難困難者の初期位置および渋滞発生箇所 (地震発生から30分後に避難開始)

(3) 地震動による道路閉塞の影響

図-13は車両による避難を対象に道路閉塞を考慮した場合について、モンテカルロシミュレーションの試行回数を200回とした場合の避難成功率の平均値を震度レベル毎に整理したものである。当然のことながら、震度が大きくなるにつれて道路閉塞箇所が増加し、その結果、避難成功率へ多大な影響を与えていることがわかる。図-14は避難開始時間30分後のケースを対象に各試行ケースの出現頻度分布を確率密度関数として示したものである。



(a) レベル1津波 (b) レベル2津波

図-13 道路閉塞による影響(車両避難, 600台)

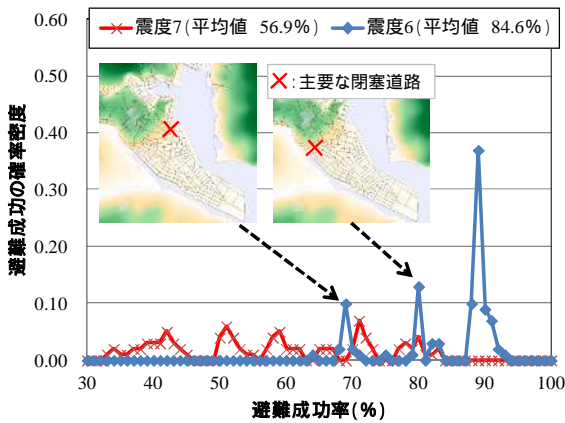


図-14 避難成功率の出現確率密度分布  
(レベル2津波, 30分後開始)

道路閉塞による避難成功率の確率密度には複数のピークが存在し、震度7のケースでは、さらに幅広い密度分布を形成している。震度6のケースでは、避難成功率の隔たりに一貫性を有しており、沿岸域の主要なノード周辺が閉塞するか否かで車両の大幅な迂回が生じ、そのため複数のピークが存在するような結果に至っている。避難路として確保すべき道路の重要性が把握できる。震度7のケースでは、閉塞箇所増加によって、迂回パターンの複雑化が生じたために試行毎の避難成功率のばらつきが大きくなったものと考えられる。

## 5. 結論

気仙沼地点を対象とした避難行動解析により津波レベルや避難方法の違いによる人的被害の特性について詳細を把握した。また、道路閉塞による避難成功率に与える影響について検討した。

本検討の結果、60歳以上の徒歩避難の場合、レベル2津波に対しては、地震発生直後に避難を開始したとして

も、被害発生を防ぐことが困難であるという結果が得られた。また、車両避難の場合、1000台程度まで走行車両が増加すると、避難開始時刻によっては徒歩避難よりもかえって危険性が高くなることなどが得られた。

## 参考文献

- 1) 津波対策検討委員会：津波対策推進マニュアル，124p.，H14.3.
- 2) 今村文彦，越村俊一，村嶋陽一，秋田善弘，新谷勇樹：東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施，東北大学モデル(version1.2)，12p.，2012.
- 3) Mansinha,L.andD.E.Smylie:The displacement field of inclined faults, Seismol. Soc. Amer.,Vol.61, pp1433-1440, 1971.
- 4) 小谷美佐，今村文彦，首藤伸夫：GISを利用した津波遡上計算と被害推定，海岸工学論文集，第45巻，pp.356-360，1998.
- 5) 西畑剛，森屋陽一，田村保：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.565-570，2006.
- 6) 西畑剛，森屋陽一，安野浩一郎，今村文彦：津波からの避難車両のモデル化と渋滞等の評価，土木学会論文集B2(海岸工学)，第59巻，pp.731-735，2012.
- 7) 西畑剛，森屋陽一，田村保，瀧本浩一，三浦房紀：津波浸水時の避難条件に関する実験的研究，海岸工学論文集，第52巻，第2号，pp.1256-1260，2005.
- 8) 馬場康之，石垣泰輔，戸田圭一：水没した自動車からの避難の難しさ，京都大学防災研究所年報，第53号B，pp.553-559，2010.
- 9) 赤倉康寛，高橋宏直，中本隆：都市臨海部地震被害予測のための街路閉塞現象のモデル化の試み，港湾技術研究所報告，第39巻，第3号，pp.19-41，2000.
- 10) 田村保，西畑剛，森屋陽一，滝本浩一，三浦房紀：街路閉塞を考慮した津波浸水計算時の避難シミュレーション手法の適用，海岸工学論文集，第52巻，pp.1286-1290，2005.

## EVALUATION OF HUMAN DAMEGE DUE TO TSUNAMI FLOODING UNDER TWO DIFFERENT EARTHEQUAKE SENARIOS

Kouichirou ANNO, Yoichi MORIYA, Takeshi NISHIHATA, Hajime MASE and Nobuhito MORI

After the 2011 Tohoku Earthquake tsunami, the disaster mitigation guarding human-life as the first object has become the most important issue. In this paper we carried out tsunami evacuation simulations for the Kesenuma city under two tsunami levels, by changing the evacuate operating method and the time of starting to evacuate. Through the simulations, it was recognized the difficulty of evacuation on elderly people safety, if they start to evacuate within 30min. As increasing cars more than 1000, the successful evacuation ratio becomes less than 40%, which is more danger than by walking evacuation due to the incesing car traffic jams.