

東北地方太平洋沖地震における自動車による 津波避難の再現手法に関する研究 —交通流配分手法を用いた適用可能性の検討—

小野村 広平¹・藤生 慎²・高田 和幸³

¹学生会員 東京電機大学大学院理工学研究科デザイン工学専攻 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

E-mail: 12rmk07@ms.dendai.ac.jp

²学生会員 東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail: fujiiu@iis.u-tokyo.ac.jp

³正会員 東京電機大学准教授 理工学部理工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

E-mail: takada@g.dendai.ac.jp

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、日本各地に甚大な被害を及ぼした。特に地震に伴って発生した津波による被害は大きく、広範囲に及んだ。津波による犠牲者が多数発生した一つの原因として、自動車での避難行動が円滑に行われなかったことが考えられる。本研究では対象地区は気仙沼市と設定し、東北地方太平洋沖地震時における、自動車を用いた津波避難の状況を確認率の利用者均衡配分モデルにより再現し、自動車による津波避難行動の検討を行った。

Key Words : The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, TUNAMI, traffic simulation, Stochastic User Equilibrium Assignment Models

1. はじめに

2011年3月11日14時46分頃に発生した東北地方太平洋沖地震は、東北地方を中心として甚大な被害を及ぼした。特に、三陸地域の各市町村では、津波の被害が甚大で莫大な数の犠牲者が発生した。平成24年9月19日現在、東北3県（岩手県、宮城県、福島県）の死者・行方不明者数は、1万8,614人である。さらに、同3県の建物の全壊・半壊数は、35万3,066棟に及ぶ¹⁾。地震発生後約20分で津波が襲来し、甚大な被害が生じた三陸地域では、津波からの適切な避難行動により一命を取り留めた市民が数多く存在する一方、避難しきれずに多数の犠牲者が発生したこともまた事実である。津波からの避難は、迅速さが肝要であるが、東北地方太平洋沖地震では、気象庁から発表された津波情報の予想津波高さが、実際よりも低く見積もられていたため、避難行動の遅れや自宅への不用意な帰還なども生じた。また、被害を大きくした原因の一つとして、自動車での避難が多くみられたこともあげられる。地震発生当初、中央防災会議では「津波からの避難は原則自動車禁止」と方針が定められていた

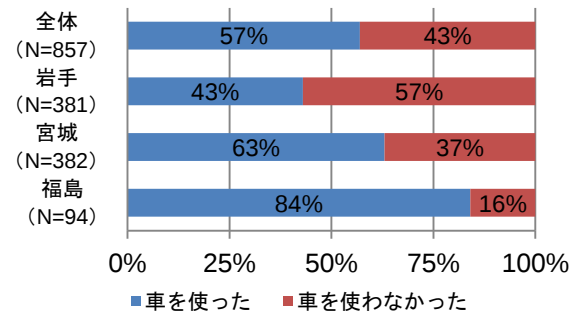


図-1 避難時の自動車避難率

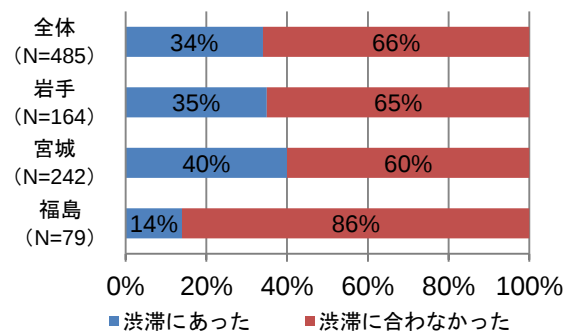


図-2 車で避難して渋滞にあった割合

にも関わらず、実際は多くの自動車による津波避難者がみられた。震災後の内閣府の調査²⁾により、震災当日の避難では半数以上が自動車を利用して避難していたことが分かっている(図-1)。また、同調査において自動車を利用して避難した市民の約三分の一が、途中で渋滞に巻き込まれたということが明らかになっている(図-2)。これらのことから、自動車による避難者の多くが円滑に避難行動をとれたとは言い難い。

一方、身体的原因や地震発生時に滞在していた場所などにより、自動車での避難が必要な市民が存在することも事実である。より多くの市民が津波から身を逃れるためには、自動車を利用した避難行動の改善が必要であると考えられる。また、津波避難時に自動車の発生量をカウントすることは不可能であるが、自動車の発生量を把握することは避難時の対策や計画を練る際に非常に大きな役割を果たすと考えられる。以上のことから、津波災害からの避難時における自動車交通状況を再現し、発生交通量を逆推定することは、今後の避難対策や避難計画を考えるうえで、有意義であると考えられる。

本研究では、利用者の選択行動や、混雑現象を考慮できる確率的利用者均衡(SUE)配分モデルを用いることにより、自動車による津波避難状況を再現し、発生交通量を逆算するとともに、自動車での津波避難の在り方を検討することを目的とする。

2. 既往研究と本研究の位置付けの整理

津波避難に関しては、これまでに数多くの研究の蓄積がある。津波避難の研究領域は、津波防災教育、地震災害における津波避難状況の実態分析、古文書からの津波避難実態解明、被害想定に基づくシミュレーション分析・検証に大別される。本研究と関連性の深い研究分野は、地震災害における津波避難状況の実態分析と被害想定に基づくシミュレーション分析・検証である。小野村³⁾らは、東北地方太平洋沖地震時の気仙沼市において、基礎的なシミュレーション分析を行っているが、視覚的な表現と一致率における判断に留まっている。

近年、津波避難に関する交通流シミュレーション分析は、交通流マイクロシミュレーションを用いたものが主流となっている。交通流マイクロシミュレーションを用いた研究成果として代表的なものに、金ら⁴⁾、本内ら⁵⁾がある。金らは、東北地方太平洋沖地震で被災した、仙台市の沿岸部を対象にしシミュレーションを行い、最適配分モデルを提案している。また本内らは、北海道苫小牧市を対象として、震災時の避難行動調査を反映させた津波避難シミュレーションを行い、避難完了時間の変化について考察している。

津波避難に関する分析としては、マルチエージェントモデルを用いて津波避難シミュレーションを実施している研究事例として、玉川ら⁶⁾、齋藤ら⁷⁾、大畑ら⁸⁾、藤岡ら⁹⁾が挙げられる。これらは、津波来襲時の避難シミュレーションを開発し、それを用いて住民の避難に関する問題点、地域の津波に対する脆弱性を考察している。

過去の津波からの避難実態を調査した分析事例として、早川ら¹⁰⁾、片田ら¹¹⁾が挙げられる。早川らは、津波発生時における避難行動開始モデルを提案している。その中で、日本海中部地震津波、北海道南西沖地震、北海道東方沖地震、石垣島南方沖地震を対象として、ヒアリング調査とアンケート調査の結果を用いて情報提供が人々の津波避難行動に与える影響をモデル化し、数量化理論を用いて分析を行っている。その結果、津波避難開始率を推定する方法を提案しており、例えば、気仙沼市の津波第1波到達時間が地震後20分後半であった場合に、推定避難開始時間を10分前半であることを示している。片田らは、2003年5月の宮城県沖の地震において三陸沿岸各地で震度4~6弱が観測され、津波襲来が直ちに懸念された。しかし、地震後に著者らが宮城県気仙沼市の住民を対象に実施した調査によると、津波を意識して避難した住民は、全体のわずか1.7%との調査結果を示している。避難率が低調となった要因を把握するため、住民の避難行動とその意識的背景を分析した結果、避難の意思決定を避難情報や津波警報に過度に依存する姿勢や、正常化の偏見による危険性の楽観視、過去の津波経験による津波イメージの固定化といった住民意識の問題点を明らかにしている。

津波避難計画や津波避難行動の問題点についてまとめた研究事例として、田中ら¹²⁾、矢代ら¹³⁾が挙げられる。田中らは、アンケート調査を実施して津波避難行動をめぐる問題点を分析している。さらに、津波警報による情報伝達モデルを考案し分析している。その結果、地震が発生したら沿岸部では津波が襲来するという考え方が重要であると論じている。矢代らは、津波対策として防潮堤、水門、陸閘等の防災施設、防災行政無線等の設備が進む一方、津波浸水予測図の作成、避難対象地域の指定、避難場所や避難経路の指定、避難勧告などの情報伝達等を含めた津波避難計画を定めている市町村が少ないことを指摘してソフト面における津波対策を充実させることの必要性を論じるために海岸部を持つ都道府県・市町村を対象としてアンケート調査を実施して津波避難計画における課題を整理している。その結果、津波避難訓練は多くの自治体で行われていないこと、津波避難路の指定がほとんど行われていないことを明らかにして、津波対策推進マニュアルを作成し津波避難問題の解決方法を提示している。さらに、自治体、学識経験者、住民によるワークショップなどを通じて津波防災力の向上が可能で

あることを示している。

これらの研究により、津波避難に対する住民の意識の問題点抽出や、それに対する改善策の提案、シミュレーションでのケーススタディーが行われているが、実際の道路状況の再現をし、発生交通量の推定と渋滞状況の把握を行っている研究はない。

3. 震災当日の実況

(1) 被害状況

本研究では、宮城県気仙沼市を対象として検討を行った。東北地方太平洋沖地震時の気仙沼市の津波浸水域¹⁴⁾を図-3に示す。気仙沼市¹⁵⁾によると、市域面積333.37km²のうち18.65km²が浸水したと述べられている。また、都市計画区域面積46.82km²のうち、9.6km²が浸水したと述べられている。

津波による気仙沼市の家屋被害状況を表-1に示す。ここからわかる通り、鹿折地区では地区内棟数の58%以上

が被害を受けており、気仙沼地区や階上地区でも4割を超える家屋が被害を受けている。また、鹿折地区では、全壊棟数も地区内棟数の5割を超えている。棟数からみると、気仙沼地区が最も多くの被害を受けており、被害家屋の3割を占めている。本研究では、気仙沼市の中でも最も家屋被害数の大きかった気仙沼地区を対象としてシミュレーションを行った。シミュレーションを行った地区を図4に示す。

(2) 避難状況

図-5は、遠藤ら¹⁶⁾による気仙沼市の避難所などでのヒアリング調査で得られた、気仙沼市における移動手段別避難状況である。この図より、自動車で避難した市民の半数以上が円滑な避難行動を取れなかったことが分かる。9割近い人が順調に避難できたと答えている徒歩の避難者と比べても、自動車での避難が適当に行われていなかったことが分かる。また、図1、2の各県、または全体の避難状況と比べても、気仙沼市の自動車避難者が順調に避難できなかった割合は高いことが分かる。

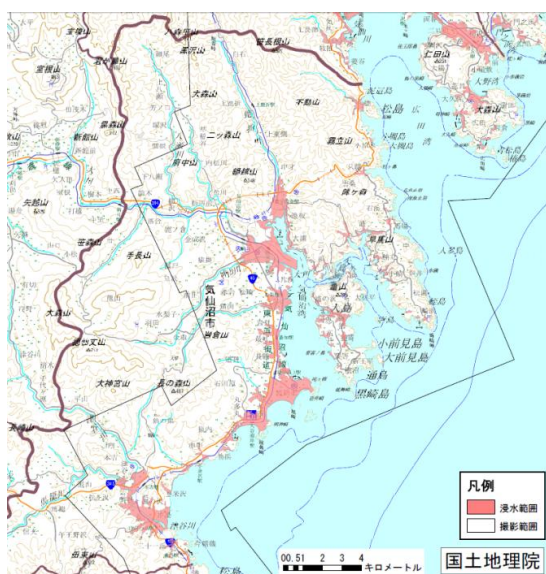


図-3 宮城県気仙沼市の津波浸水域（国土地理院）



図-4 対象地区

表-1 気仙沼市の家屋被害

地域(区)名	全壊(棟)	大規模半壊(棟)	半壊(棟)	一部損壊(棟)	計(棟)	地区の棟数に占める被害の割合(%)
気仙沼	4,628	1,013	652	573	6,866	44.8
鹿折	3,189	266	90	88	3,633	58.1
松岩	1,623	141	125	339	2,228	27.6
新月	0	5	16	111	132	2.6
階上	1,951	264	192	480	2,887	46.2
大島	769	201	66	180	1,216	32.5
気仙沼地域計	12,160	1,890	1,141	1,771	16,962	37.9
唐桑地域	1,867	80	80	106	2,133	28.2
本吉地域	2,417	289	185	373	3,264	28.5
計	16,444	2,259	1,406	2,250	22,359	35

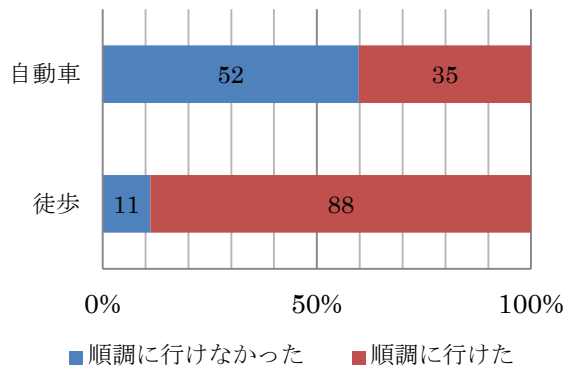
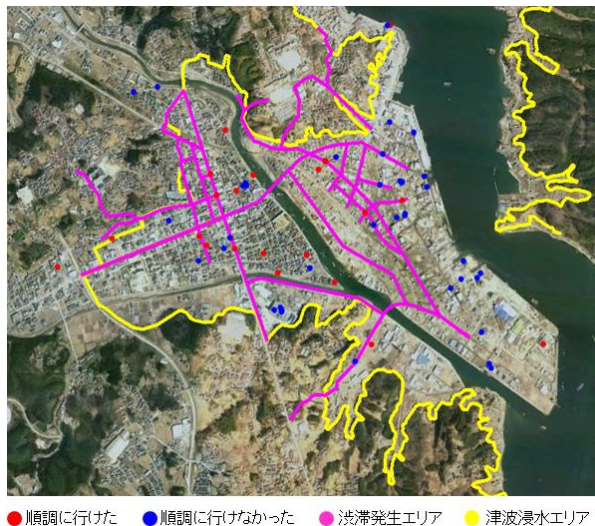


図-5 気仙沼市移動手段別避難状況



出典：宮城県気仙沼市危機管理課

図-6 震災当日の気仙沼市の状況

次に自動車避難者が移動を開始した場所をプロットし、震災当日の渋滞エリア¹⁷⁾と津波による浸水域を示したものを図-6に示す。この結果より、地震発生後かなりの広範囲で渋滞が発生し、自動車避難の妨げになっていたことが分かる。

次に、図-7に自動車避難者の出発地点と最終避難場所を直線で結んだものを記す。色の違いは避難の余裕時間を表し、図上の円は主な最終避難場所を表している。この図より、多くの最終避難場所が、図左側の高台となっていたことが分かり、沿岸部から避難を開始した人々は数少ない橋に集中したと考えられる。図-6の避難所まで順調に行けたか、否かの情報と合わせると、沿岸部から自動車避難を開始した人々の多くが、順調に避難所に辿り着けなかったと回答していることがわかる。

次に、図-8には移動手段別に出発地点と最終避難場所を直線で結んだものを記す。ここでは図-7同様、色の違いは避難の余裕時間を表している。この図からわかる通り、同様の地点から避難を開始したにも関わらず、徒歩避難者と自動車避難者の余裕時間に違いがはっきりと見て取れる。徒歩で移動した人が比較的余裕

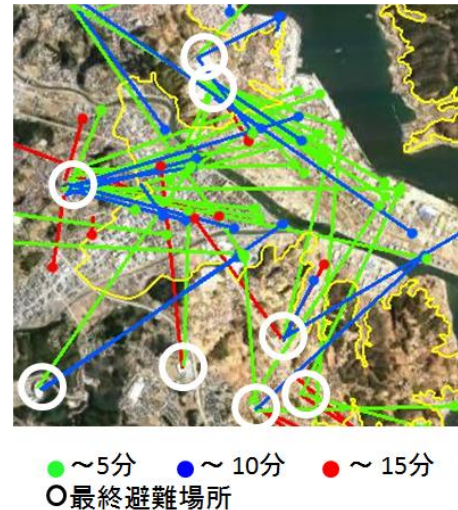


図-7 自動車避難者の移動状況

徒歩 自動車

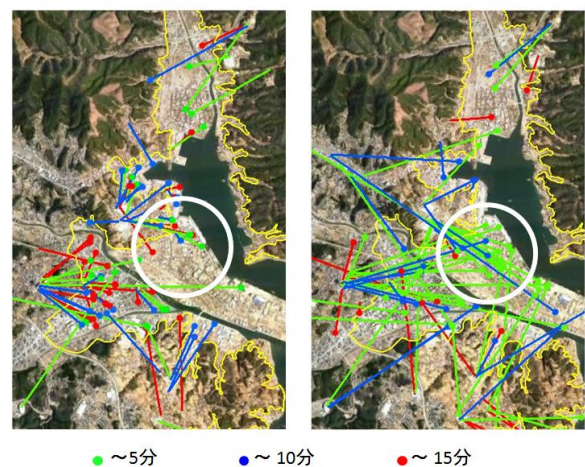


図-8 移動手段別移動状況

で避難できているのに対し、自動車避難者は余裕時間が短いことが分かる。

4. 再現手法について

(1) ネットワークの設定とゾーニング

本研究では、図-4の対象地区のうち、主要な道路をトレースして作成したネットワークを用いてシミュレーションを行った。図-9に、ネットワーク図を示す。赤い点は、図-7を参考に設けた主な最終避難場所であり、シミュレーションの際の到着ノードである。その他の点は発ノードである。ネットワーク上には、リンク同士の交差点以外にもいくつかノードを設け、交通量を発生させた。これは脇道からの車の流入も考慮した設定である。

次に、対象地区の町丁目を参考にゾーンの設定を行った。設定した24ゾーンを図-9に示す。赤字1~7の塗りつぶしたゾーンは到着ノードのみが属するゾーンであり、その他17のゾーンから交通量を発生させた。



図-8 ネットワーク図



図-9 ゾーニング図

(2) フリー走行時間の算出

リンク間のフリー走行時間を図-10の手順で算出した。なお、フリー走行時間は、リンク抵抗を表すBPR関数内で使用する(式(1))。パラメータ α 、 β の値は

$$\begin{aligned}\alpha &= 0.48 \\ \beta &= 2.82\end{aligned}$$

と設定した。

$$t_a(x_a) = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{x_a}{C_a} \right)^\beta \right\} \quad (1)$$

t_{a0} : フリー走行時間

x_a : 交通量

C_a : 最大交通容量

α, β : パラメータ ($\alpha = 0.48, \beta = 2.82$)

(3) シミュレーションの方法

手順1 : Googleマップを使用して、ノード間距離を測定



手順2 : ノード間の平均速度を決定する。本研究では道路交通センサスの平均旅行速度30km/hを一律で設定



手順3 : 手順1で求めた距離と手順2で設定した速度よりリンク間のフリー走行時間を算出

図-10 フリー走行時間算出手順

交通量配分は主にネットワークで起きていた現象を再現するために用いられるツールであり、利用者均衡配分もその一つの手法である。同様にネットワーク上の現象を再現する手法として、マイクロシミュレーションがある。マイクロシミュレーションでは細かな流れを、動的に再現することができる。しかし、マイクロシミュレーションを用いるためには、多くの正確なデータや情報が必要である。本研究ではその前段階として、SUE配分モデルを用いたシミュレーションにより、津波避難時の状況再現を行った。SUE配分モデルは、ランダム効用最大化理論に基づき、利用者の経路選択のばらつきと、混雑現象を考慮できるモデルである。これにより、所要時間や経路長だけでなく、様々な要因による意思決定の要因を考慮可能である。

本研究では、地震発生から津波到着までの約30分間に交通量が発生したと仮定してシミュレーションを行った。

また、発生交通量は、人口に x を乗じることで変化させ、渋滞状況の変化を比較した。使用した交通量を表-2に示す。

評価指標には最大OD所要時間、総所要時間、平均総所要時間と、式(2)によって算出した一致率を用いた。

$$P_L = \frac{L_a - L_d}{L_t} \quad (2)$$

P_L : 一致率

L_a : リンク間速度が10km/h以下で証言データと一致している距離

L_d : リンク間速度が10km/h以下で証言データと一致していない距離

L_t : 証言データの渋滞区間総距離

5. 結果

表-2 発生交通量

ゾーン	人口*0.5 (台/0.5h)	人口*0.6 (台/0.5h)	人口*0.7 (台/0.5h)	人口*0.8 (台/0.5h)	人口*0.9 (台/0.5h)	人口(人)	人口*1.1 (台/0.5h)	人口*1.2 (台/0.5h)
1	604.0	724.8	845.6	966.4	1087.2	1208	1328.8	1450
2	107.0	128.4	149.8	171.2	192.6	214	235.4	257
3	98.0	117.6	137.2	156.8	176.4	196	215.6	235
4	555.5	666.6	777.7	888.8	999.9	1111	1222.1	1333
5	816.5	979.8	1143.1	1306.4	1469.7	1633	1796.3	1960
6	291.0	349.2	407.4	465.6	523.8	582	640.2	698
7	183.5	220.2	256.9	293.6	330.3	367	403.7	440
8	152.0	182.4	212.8	243.2	273.6	304	334.4	365
9	475.5	570.6	665.7	760.8	855.9	951	1046.1	1141
10	189.0	226.8	264.6	302.4	340.2	378	415.8	454
11	433.0	519.6	606.2	692.8	779.4	866	952.6	1039
12	416.0	499.2	582.4	665.6	748.8	832	915.2	998
13	609.5	731.4	853.3	975.2	1097.1	1219	1340.9	1463
14	112.0	134.4	156.8	179.2	201.6	224	246.4	269
15	297.0	356.4	415.8	475.2	534.6	594	653.4	713
16	305.5	366.6	427.7	488.8	549.9	611	672.1	733
17	227.5	273.0	318.5	364.0	409.5	455	500.5	546
合計	5872.5	7047.0	8221.5	9396.0	10570.5	11745	12919.5	14094

表-3 シミュレーション結果 (1)

	人口に乗じた係数							
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
一致率	25.00	25.97	40.26	52.60	34.42	59.42	40.26	55.84
最大 OD 所要 時間(分)	74.235652	144.72182	298.04764	901.64277	614.75307	1473.3479	1225.9647	3694.8619
総所要時間(分)	355568.85	750236.87	2005100.4	7947143.9	5377814.8	15340650	11151452	32302551
平均総所要 時間(分)	30.274061	53.23094	121.94249	422.90038	254.37845	653.07153	431.57445	1145.9682

本研究で図-11 は、リンク間の走行速度（旅行速度）を色分けし、ネットワーク上に図示したものである。旅行速度が遅いほどリンク間が渋滞していたことが分かるようになっている。図-6 の実際の渋滞状況と比べると、再現に至っていない箇所が何点かあり、実際の状況に比べて渋滞の広がりがないことが分かる。しかし、一方では、実際には考えにくいほどの渋滞が起きている箇所もある。このことから、目的地・経路選択について、さらに検討を進める必要があると考えられる。

表-3 に各交通量における、最大OD所要時間、総所要時間、平均総所要時間、一致率を示す。図-12 にその結果をグラフに表したものを示す。本研究では、人口を1倍した量の交通量を発生させたとき、最も一致率が高い値が得られた。この地域では地震発生から30分で、約12,000台の交通量があったと考えられる。また、図-12 から、交通量が増えると最大OD所要時間、総所要時間、



図-11 ネットワーク状況再現

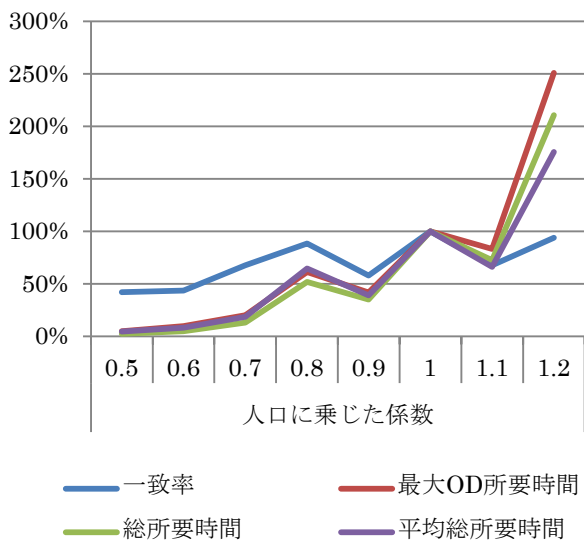


図-12 シミュレーション結果 (2)

平均総所要時間の全てが増加傾向にあることが分かる。このことから、交通量を極力抑えることが、避難時の渋滞和に大きく関わることが分かる。

6. まとめと今後の課題

本研究では気仙沼市を対象とし、東北地方太平洋沖地震時の自動車における津波災害避難を SUE 配分モデルによって再現した。交通量を変化させてシミュレーションを行うことで、交通量の変化による渋滞状況の変化と、所要時間の変化をみることができた。また、津波避難時に自動車交通量を減らすことで、所要時間を大きく減らすことができることが分かった。

本研究では、道路交通容量やフリー走行時間に、仮定によって導き出した値を代入しているが、今後は実データを用いてより実際の現象に近い状態で評価する必要があると考える。また、今回の選択確率には、所要時間のみが関係しているが、その他要因も考慮し、効用式に組み込むことが必要であると考え。さらに、正確なデータにおいて、マイクロシミュレーションを行うことも今後の課題である。再現後、ボトルネックとなっている道路の拡幅検討や、災害時の道路運用方法の検討が必要であると考え。津波避難時の道路利用について、全員が共通意識を持ち、全員で逃げるような対策案の検討が必要である。

謝辞：本研究を行うに当たり、宮城県気仙沼市総務部危機管理課長の佐藤健一様から大変貴重な御意見や情報を提供頂いた。また、東北地方太平洋沖地震において犠牲

となられた方々の、御冥福を御祈り申し上げるとともに、被災地の一日の早い復旧・復興をお祈り申し上げます。

参考文献

- 1) 警察庁緊急災害警備本部：平成 23 年東北地方太平洋沖地震の被害状況と警察措置，2012.9.19 時点
- 2) 中央防災会議：東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会（第 7 回），2011.
- 3) 小野村広平，藤生慎，高田和幸：自動車をを用いた津波避難状況の再現手法に関する研究 -東北地方太平洋沖地震で被災した宮城県気仙沼市を対象として-，第 31 回日本自然災害学会講演概要集，pp.5-6，2012.
- 4) 金進英，桑原雅夫：津波災害時における海岸部の避難行動分析，土木計画学研究発表会講演集，Vol.45，2012.
- 5) 本内洋平，中田涼，下村光弘，飯田啓也：津波災害を想定した自動車シミュレーションについて，土木計画学研究発表会講演集，Vol.45，2012.
- 6) 玉川奈都子，大畑大志郎，高井伸雄，鏡味洋史：マルチエージェントシミュレーションによる釧路市中心部の津波からの避難シミュレーション(都市環境と災害,講演研究論文・計画技術報告・研究委員会報告), 日本建築学会北海道支部研究報告集，Vol.79，pp.175-178，2006.7.1
- 7) 斎藤崇，鏡味洋史：マルチエージェントシステムを用いた津波からの避難シミュレーション-奥尻島青苗地区を例として-，日本建築学会計画系論文集，Vol.597，pp.229-234，2005.11.30
- 8) 大畑大志郎，鏡味洋史，高井伸雄：津波からの避難シミュレーションへのマルチエージェントシステムの適用-その 2 釧路市をモデルとして-，日本建築学会大会学術講演梗概集，2005.9
- 9) 藤岡正樹，石橋健一，梶秀樹，塚越功：津波避難対策のマルチエージェントモデルによる評価，日本建築学会計画系論文集，Vol.562，pp.231-236，2002.12.30
- 10) 早川哲史，今村文彦：津波発生時における避難行動開始モデルの提案とその適用，自然災害科学 Vol.21(1)，pp.51-66，2002.5.31
- 11) 片田敏孝，児玉真，桑沢敬行，越村俊一：住民の避難行動にみる津波防災の現状と課題-2003 年宮城県沖の地震・気仙沼市民意識調査から-，土木学会論文集，Vol.789，pp.93-104，2005.5.21
- 12) 田中重好，田淵六郎，木村玲欧，伍国春：津波からの避難行動の問題点と警報伝達システムの限界，自然災害科学，Vol.25(2)，pp.183-195，2006.8.31
- 13) 矢代春実，西川智，遅野井貴子：地域ごとの津波避難計画策定に関する事例紹介，日本建築学会技術報告集，Vol.19，pp.359-364，2004.6.20
- 14) 国土地理院：浸水範囲概況図 9 (<http://www.gsi.go.jp/common/000059844.pdf>) (2011 年 4 月 18 日現在)
- 15) 気仙沼市震災復興会議（第 1 回）：大震災に関わる被害状況について，2011.
- 16) 遠藤聡，藤生慎，高田和幸：東北地方太平洋沖地震による津波からの避難行動に関する分析 - 宮城県気仙沼市を対象として - 第30回日本自然災害学会学術講演会公演概要集，2011.
- 17) 宮城県気仙沼市危機管理課提供

Development of Estimation Technique for Evacuation from TSUNAMI using Car

Kohei ONOMURA, Makoto FUJIU and Kazuyuki TAKADA

This paper analyzes the car evacuation of resident who suffered from The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake in Kesennuma city. Authors conducted interview survey for local government to estimate number of evacuation cars from Mega Tsunami. As a result of interview survey, authors collected the data which describe road situation during Mega TSUNAMI. Authors analyze the behavior of car evacuation which is applied SUE model. As a result of behavioral analysis using SUE model, authors can estimate number of car under evacuation situation.