

地震後の道路交通状況を考慮した津波避難実験

小山 天城¹・丸山 喜久²

¹学生会員 千葉大学博士前期課程 大学院工学研究科 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)
E-mail: glacier1203@chiba-u.jp

²正会員 千葉大学准教授 大学院工学研究院 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)
E-mail: ymaruyam@faculty.chiba-u.jp

本研究では、津波発生時に自動車運転者に対し、避難情報を効果的に伝達する方法を検討することを目的に走行模擬実験を行った。実験内容は、ドライビングシミュレータを用いてバーチャルリアリティ空間内を自動車で走行し、津波から避難することである。実験時の被験者の行動や視線の動きなどから、避難時におけるカーナビから提供される渋滞情報の有用性を検討した。津波警報を強調した走行シナリオで実験を行ったところ、運転者に渋滞情報に対して注意を向けさせることができた。しかし、渋滞情報に注意を向けさせるだけでは避難率向上の効果は大きくなく、被験者がどう行動するか判断するために十分な情報を提示する必要があると考えられた。

Key Words : tsunami inundation scenario , driving simulator, vehicular evacuation from tsunami

1. はじめに

2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震が発生し、東北地方の太平洋側を中心に津波による甚大な被害が生じた。その際、沿岸部を走行中の自動車が津波に巻き込まれ、多くの人々が犠牲となった。

津波来襲時の自動車による避難は、渋滞や事故の恐れや、徒歩による避難者の円滑な避難を妨げる恐れがあることから原則として禁止されている¹⁾。しかし、中央防災会議の報告²⁾によると、東北地方太平洋沖地震では避難者の約57%が避難時に自動車を利用している。これを受けて現在の我が国の方針としては、津波発生時の避難については原則徒歩としつつ、やむを得ず自動車により避難せざるを得ない場合は自動車の使用を認めている³⁾。また、高齢化が進んでいる現状や、要援護者とともに避難する必要性があり得る⁴⁾ことを考慮すると、今後自動車による避難は増加すると予想される。さらに、避難できる高台が離れているなど、自動車による避難がやむを得ない実情もある⁵⁾。そのため、避難時に自動車を利用した際の避難規定を早急に策定する必要がある。

この問題に対し榊・丸山⁷⁾は津波が発生した際の自動車運転を体験できるドライビングシミュレータを用いたシミュレーション実験を行い、自動車運転者への避難支援方法を検討した。津波の浸水域内であることを運転者に周知する目的でカーナビゲーションシステムにハザー

ドマップを表示させたが、ハザードマップを単に表示するだけでは避難率の向上にはつながらなかった。また、実験シナリオ中の他車の交通状況を現実に近く改良する必要があることが課題であった。

そこで本研究では、既往研究で作成された走行シナリオに震災発生時の交通状況を想定し、周辺他車の影響を考慮できるようになることを目指す。さらに、シミュレーション実験を行い、実験の結果を基に効果的な避難誘導方法について検討する。

2. カープローブデータに基づく震災時の道路交通状況の把握

震災発生時の交通状況を再現するために、本研究ではまず、宮城県仙台市を対象地として東北地方太平洋沖地震発生当時のカープローブデータ⁹⁾の分析を行い、震災発生時にどのような道路が混雑するのかなど、道路交通状況の特徴を把握する。カープローブデータには車両の走行速度や位置情報等の情報が記録されていて、GIS上に表示することで運転者の実際の動きを確認することが可能である。

震災発生一週間前の2011年3月4日と震災当日の3月11日のカープローブデータを比較したものが図-1である。東北地方太平洋沖地震発生時の14時46分から3時間

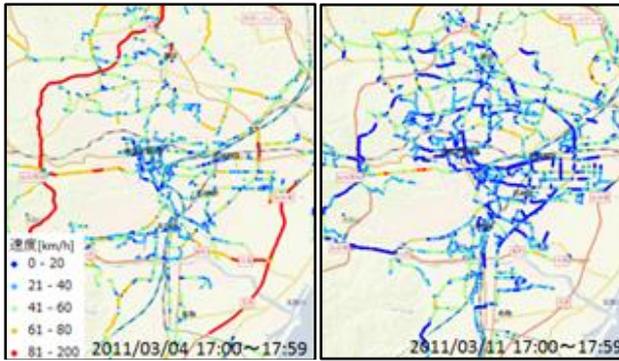


図-1 仙台市における平常時と震災時のカープローブデータの比較

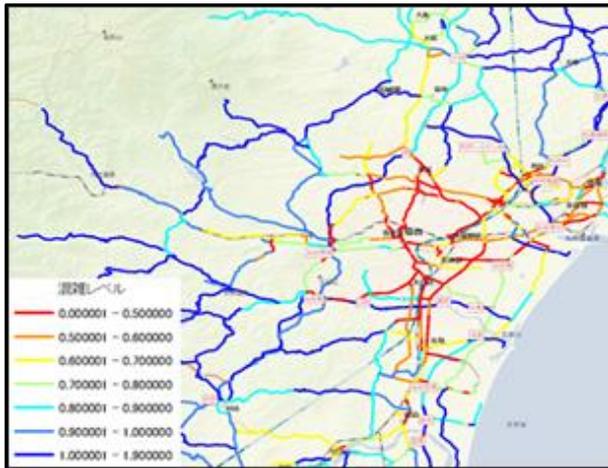


図-2 仙台市における平常時の混雑レベル

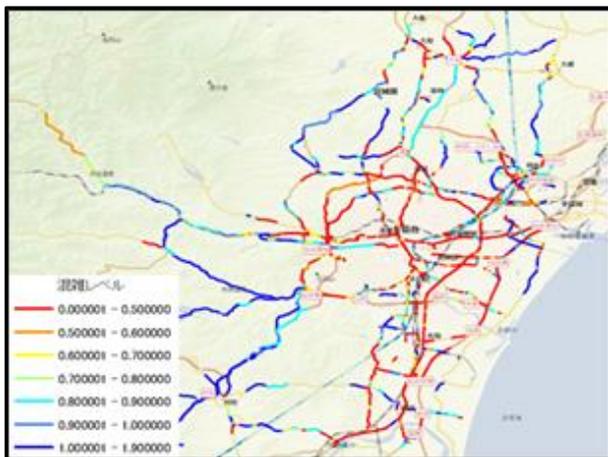


図-3 仙台市における震災当日の混雑レベル

ほど経過した 17 時台では震災当日の方が明らかに走行速度の遅い車両が多く、震災時に道路が非常に混雑していたことが予想できる。

そこで震災発生時に混雑する道路の特徴を把握するために、道路交通センサス¹⁰の一般交通量調査のデータを用いる。一般交通量調査では、道路区間ごとの交通量や、

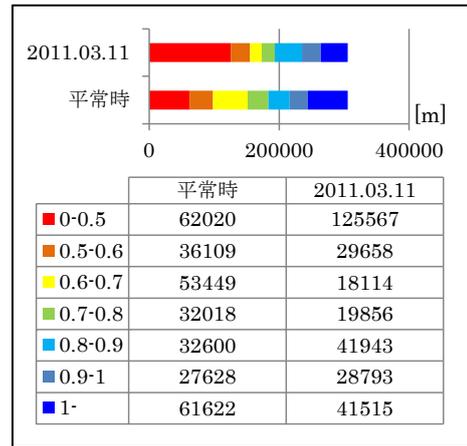


図-4 混雑レベルごとの道路長(m)

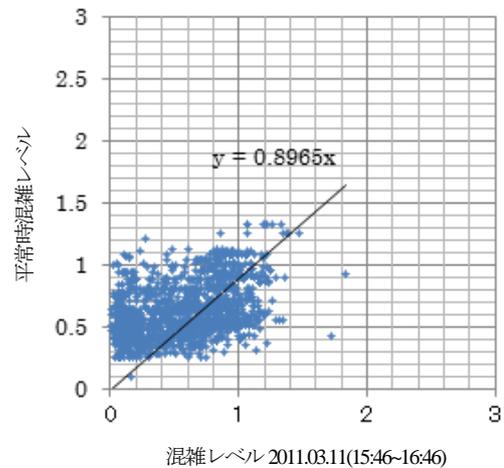


図-5 平常時と震災当日の混雑レベルの比較

平均速度などのデータが集計されている。仙台市で平常時に混雑する道路を調べるため、道路区間の規制速度に対する平均速度の比を混雑レベルと定義し、道路の混雑程度を評価した。この値が小さいほど規制速度に対して走行速度が小さいため、混雑している道路であるとみなした。図-2は、道路交通センサスに基づく仙台市の平常時の混雑レベルである。

さらに、カープローブデータを用いて、震災当日(14:46~18:46)の混雑レベルを推定した(図-3)。図-2と図-3の結果をもとに、混雑レベルごとの道路長や、混雑レベルの空間分布を平常時と地震発生時と比較した。図-4では図-3に示した混雑レベルの道路長を集計し、平常時との比較を行った。地震発生後は混雑レベルが0.5以下の非常に混雑している道路区間(赤)が多くなり、特に地震発生から1時間ほど経過すると平常時の約2倍多くなった。このことから地震発生から約1時間経過すると非常に混雑した道路が増えると考えられる。また、平常時に混雑している道路と震災時に混雑する道路の関係を調べるために、縦軸を平常時の混雑レベル、横軸を

震災時の混雑レベルとした散布図を作成した(図-5)。その結果、どの時間帯も近似曲線の傾きがおおよそ1に近く、大局的には、平常時に混雑する道路は震災発生時も混雑することがわかった。

3. 周辺の道路交通状況を想定した走行シナリオの構築

前章の検討結果を踏まえて、ドライビングシミュレータの走行シナリオに周辺の道路交通状況を想定し、反映させる。本研究で使用したUC-win/Road¹¹⁾は、「合意形成を支援するための3次元リアルタイムVRソフトウェア」である。道路を定義し、建造物や街灯等の3Dモデルを適宜配置することでVR(バーチャルリアリティ)空間内に都市の景観を再現することが可能である。

既往研究⁷⁾⁸⁾では神奈川県鎌倉市を再現した走行実験コースをVR空間内に作成した(図-6)。また、走行実験はワイド液晶画面、ハンドル、アクセル、ブレーキからなる簡易ドライビングシミュレータを用いて行った(図-7)。

本研究では既往研究で作成された走行実験コースをもとに、震災時の交通状況を反映させた新たな走行実験のシナリオを作成する。具体的には、実際に鎌倉市で平常時に混雑している道路区間を Google マップ¹²⁾の交通状況表示機能をもとに選定し、VR空間内でその道路区間を渋滞させる。図-8は Google マップの交通状況表示機能を用いた鎌倉市における平常時の交通状況、図-9は実験コースと仮定した渋滞区間である。

また、既往研究にはなかった新たな避難誘導方法の試みとして、被験者に渋滞情報を与えた場合のシミュレーションシナリオを作成する(図-10)。これは、VICIS等によってカーナビに渋滞情報が送信されたことを想定したものである。



図-6 走行実験コースの概観



図-7 簡易ドライビングシミュレータ

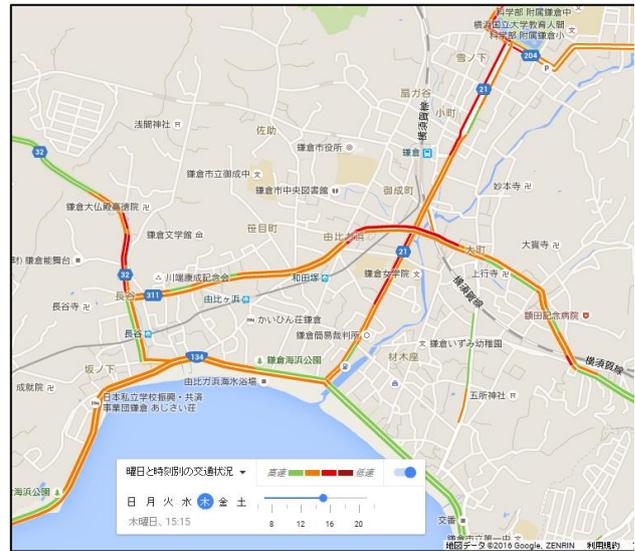


図-8 Googleマップによる交通状況表示(鎌倉市)



図-9 実験コースと仮定した渋滞区間



図-10 ルート案内と渋滞情報を与えた場合の運転画面



図-11 視線追跡デバイスで視線の動きを表示した画面

表-1 実験結果のまとめ（実験1）

被験者	避難可否	渋滞の回避	総運転時間 (分：秒)	平均車速(km/h) (渋滞区間を除く)	渋滞情報を見た回数	渋滞情報を見ていた時間の合計(秒)
1-1	×	×	8:30	11.3	28	28.5
1-2	×	×	8:10	8.0	6	23
1-3	×	×	8:42	14.5	4	15
1-4	×	×	8:26	8.6	7	9.8
1-5	×	×	9:18	15.5	2	1.0
1-6	×	×	8:18	8.6	4	2.4
1-7	×	×	8:50	16.9	3	2.8
1-8	×	○	8:16	11.2	19	35.4



図-12 走行の軌跡（実験1）

4. 実験1：渋滞情報の提供

(1) 実験の概要

実験1では、「ドライビングシミュレータの動作確認のため」と称し、千葉大学の学生8人(男性6人女性2人)を募り、実験を行った。実験は事前走行と避難実験の2段階で行った。事前走行の目的は、被験者に運転操作に慣れさせることと、おおよその地形を把握させることである。事前走行では津波および渋滞は発生せず、カーナビのルート案内に従い走行するものとなっている。また、被験者に実験コースの紙地図を配布し、コースや目的地を説明した。被験者が問題なく運転できていることを確認した後に避難実験を開始した。

避難実験では、8人の被験者には津波が発生すること

は告知せず実験を行い、運転開始後約500mの地点で、緊急地震速報の警報音とともに「津波！避難！」という文字情報を表示することで津波の発生を被験者に伝達した。また、カーナビの機能として、渋滞の約250m手前の地点で「この先渋滞」というカーナビ音声流れ、運転者に渋滞の存在を伝達した。避難実験は、避難成功地点へ到達するか、津波に冠水するかで終了とした。実験中の被験者の反応特性を分析するため、走行ログデータを記録した。さらに、本研究ではゲーム用の視線追跡デバイス（SENTRY GAMING EYE TRACKER）を導入し、実験中の被験者の視線の動きを記録した（図-11）。

(2) 実験結果

実験結果の概要を表-1、各被験者の走行の軌跡を図-12に示す。被験者 1-1~1-7 は津波警報後ルート案内に従

い走行し、渋滞情報やカーナビ音声により渋滞が発生していることに気付いた後もそのまま渋滞に並び、津波に巻き込まれ避難に失敗している。被験者 1-8 は渋滞を回避するルートを選択して走行した。しかし、最終的には走行速度が遅いなどの理由から避難に時間を要したため、津波による浸水を受け避難に失敗している。

被験者1-8とそれ以外の被験者の行動の違いを調べるため、各被験者の運転中の視線の動きを比較した。1-8以外の多くの被験者は、カーナビ音声により渋滞の存在を認識していたにもかかわらず、カーナビに表示されている渋滞情報を見た回数が10回未満、渋滞情報を見ていた時間の合計が数秒であり、概して信号待ちの時間に見る程度であった。一方、被験者1-8は津波警報以降に明らかに何度も渋滞情報を確認しており、渋滞情報を見た回数が19回、見ていた時間の合計が35.4秒と渋滞情報を重要視していたことがわかった。

このことから、与えられた情報を有効に活用することができるか、またはそのような情報に注意を向けることができるかが、その後の避難行動を分けていると考えられる。そのため、運転者が必要な情報に注意を向けさせるような工夫をすることが効果的な避難誘導の鍵であると考えられる。

5. 実験2：津波情報の強調

(1) 実験の概要

前章の実験結果から、運転者が渋滞情報などの与えられた情報に注意を向けさせるような工夫をすることで、より効果的な避難誘導をすることができると考えられた。そこで、そのような工夫を追加した新たな実験シナリオを構築し、実験を行う。

実験2では、実験1よりも津波警報が強調されるように



図-13 実験 1(上)と実験 2(下)のテロップ比較

変更した。実験1後のアンケート調査では緊急地震速報の警報音とともに「津波！避難！」という文字情報を表示するだけであったため、本当に避難した方がよいのかわからなかったという意見があった。そこで実験2では、警報音の後に「津波が発生しました。避難を開始してください。」という音声メッセージを流すことで運転者に具体的な指示を出した。

さらに、切迫感を伝えるため、表示する文字情報を「つなみ！にげて！」に変更し、すぐに目に入るよう文字を大きく表示した（図-13）。これはNHKの津波警報の際の避難を呼びかけるテロップを参考にしたものである。NHKは東北地方太平洋沖地震を契機に、避難を呼びかける表現を強い口調や命令調に改め、携帯電話等のワンセグでも見やすいようテロップのサイズを大型にするなどの工夫をしている^{13) 14)}。これらの津波警報を、実験1では一度だけ流していたのに対し、実験2では複数回流すことで運転者に切迫感を与えた（図-14）。

以上の変更点は、被験者に避難すべきだと強く認識させることで、渋滞情報に注意を向けさせることが狙いである。本実験は千葉大学の学生11人(男性6人女性5人)を募り実験を行った。これ以外の実験条件は、全て実験1と同じである。

(2) 実験結果

実験結果の概要を表-2、各被験者の走行の軌跡を図-15に示す。被験者2-2, 2-4, 2-10以外の被験者は津波警報後ルート案内に従い走行し、渋滞が発生していることに気付いた後もそのまま渋滞に並び、津波に巻き込まれ避難に失敗している。

被験者2-4は避難に成功している。被験者2-4は警報を



図-14 実験 2における津波警報伝達地点

表-2 実験結果のまとめ (実験2)

被験者	避難可否	渋滞の回避	総運転時間 (分:秒)	平均車速(km/h) (渋滞区間を除く)	渋滞情報を見た回数	渋滞情報を見ていた時間(秒)
2-1	×	×	8:46	9.8	19	10.7
2-2	×	○	8:08	8.0	9	12.1
2-3	×	×	8:44	9.9	8	4.0
2-4	○	-	4:26	15.2	5	2.1
2-5	×	×	8:39	11.7	2	0.3
2-6	×	×	8:33	9.7	21	11.9
2-7	×	×	8:38	10.3	6	2.8
2-8	×	×	8:31	10.1	3	0.9
2-9	×	×	8:44	14.9	5	4.1
2-10	×	○	8:08	9.4	24	22.7
2-11	×	×	8:46	14.5	9	7.8



図-15 走行の軌跡 (実験2)

表-3 実験1の渋滞情報率

被験者	渋滞情報率 (津波警報以降)	渋滞情報率 (カーナビ音声以降)
1-1	0.0911	0.0223
1-2	0.0058	0.0038
1-3	0.0058	0
1-4	0.0255	0.0287
1-5	0.0046	0.0030
1-6	0.0061	0.0111
1-7	0.0138	0.0357
1-8	0.0949	0.0843
平均	0.0310	0.0236

表-4 実験2の渋滞情報率

被験者	渋滞情報率 (津波警報以降)	渋滞情報率 (カーナビ音声以降)
2-1	0.0288	0.0373
2-2	0.0360	0.0875
2-3	0.0163	0.0400
2-5	0.0010	0.0057
2-6	0.0346	0.0663
2-7	0.0084	0
2-8	0.0028	0.0032
2-9	0.0182	0.0514
2-10	0.0728	0.1020
2-11	0.0328	0.0909
平均	0.0252	0.0484

聞いた後、海岸沿いにいるのは危険だと判断し、海岸から離れる方向へ向かって走行した。しかし、地図を確認するなどして避難経路を選択していた様子はなく、被験者2-4自身も「正直どこを走っているかよくわかっていなかった」と実験後のヒアリング調査では回答しているので、被験者2-4の避難成功は津波警報の強調によるものではないと考えられる。

被験者2-2と2-10は実験1での被験者1-8と同様に、渋滞に並ぶのは危険と判断し、渋滞を回避するルートを選択

して走行した。しかし、最終的には走行速度が遅いなどの理由から避難に時間を要したため、津波の浸水を受け避難に失敗している。

このように実験2と実験1の結果に大きな差はなく、避難率が向上しているとは言えなかった。津波警報を強調したことにより、運転者に渋滞情報に注意を向けさせることができたのかを検証するため、運転時間(秒)に対する渋滞情報を見ていた時間(秒)の比を渋滞情報率と定義し、実験1と実験2で比較した。表-3、表-4は津波警報を聞いてから渋滞に遭遇するまでの区間と、カーナビ

音声の渋滞通知を聞いてから渋滞に遭遇するまでの区間のそれぞれで渋滞情報率を求めたものである。

渋滞を回避すべきと判断した被験者（1-8, 2-2, 2-10）は、特にカーナビ音声を受けてから渋滞情報に注意を向けていることがわかる。また、実験1と実験2で比較すると、カーナビ音声以降の渋滞情報率に大きな差があり、実験2の被験者の方が渋滞情報に注意を向けていることがわかる。渋滞情報を見た回数で比較した場合も、実験1では平均9.1回に対し実験2では平均10.1回と僅かではあるが、実験2の被験者の方が渋滞情報に注意を向けている。このことから、本実験では津波警報を強調したことによって、避難を意識させ、運転者に渋滞情報に対して注意を向けさせることができた。しかし、渋滞情報に注意を向けさせるだけでは、避難率向上の直接的な効果とはならなかった。

渋滞に並んだ被験者に渋滞に並んだ理由を尋ねたところ、実験1では多くの被験者があまり深く考えていなかったのに対し、実験2では「知らない土地であり、他の道に詳しくないため渋滞に並んだ。」「回り道と渋滞のどちらが早いかわからなかったから。」などの回答が見られた。そこで、渋滞情報に目を向けさせるだけではなく、どう行動するのがよいか判断するための十分な判断材料を提示することが効果的な避難誘導に重要であると考えられる。また、知らない土地で避難をする運転者に対してどのような避難誘導が必要なのかを検討する必要があると思われる。

6. まとめ

本研究では、効果的な避難誘導の提案を目指し、新たな実験シナリオを構築し、2つのシミュレーション実験を行った。カープローブデータや道路交通センサスを用いて地震発生時の交通状況の特徴を分析し、その結果を既往研究のシミュレーション装置に反映することで、周辺の道路交通状況を考慮したものに改良した。

本研究では、被験者に渋滞情報を提供した場合の走行実験（実験1）と実験1よりも渋滞情報を強調した場合の走行実験（実験2）の結果を比較した。実験1の結果では、津波避難における渋滞情報の有効性は確認できなかったが、運転者が様々な情報に注意を向けさせるような工夫をすることが効果的な避難誘導の鍵であると考えられた。

実験2では、実験1よりは渋滞情報に注意を向けさせることができた。しかし、多くの被験者に、渋滞時にどのような行動を取るべきか却って悩ませる結果となった。

つまり、渋滞情報に注意を向けさせるだけでは避難率向上の効果は大きくなく、被験者がどう行動するか判断するために十分な情報を提示する必要があると考えられる。今後はシミュレーションの条件を変えて引き続き実験を行い、効果的な避難誘導方法について検討していく予定である。

参考文献

- 1) 総務省消防庁：津波対策推進マニュアル検討報告書(平成14年3月)
- 2) 中央防災会議：東北地方を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査報告会，2011.
- 3) 中央防災会議津波避難対策検討ワーキンググループ：自動車でも安全かつ確実に避難できる方策，2012.
- 4) 山本一敏、柳原純夫：東日本大震災における津波からの避難行動パターン、第14回日本地震工学シンポジウム講演論文集、2014年、pp.3207-3213.
- 5) 三上卓：東日本大震災の津波犠牲者に関する調査分析～山田町・石巻市～、第33回地震工学研究発表会講演論文集、土木学会、CD-ROM、Paper No. 6-547, 8p, 2013.
- 6) 三上卓、後藤洋三、佐藤誠一：東日本大震災津波襲来時の石巻市における住民の行動調査、土木学会第67回年次学術講演会講演概要集、pp.367-368, 2012.
- 7) 榊想太郎、丸山喜久：自動車運転者の津波避難実験のためのドライビングシミュレータの構築、土木学会論文集A1（構造・地震工学）、Vol. 70, No. 4, pp. I_384-I_392, 2014.
- 8) 榊想太郎、丸山喜久：ドライビングシミュレータ実験による津波避難のためのハザードマップ利用の有効性の検討、日本地震工学会論文集、Vol. 16, No. 1, pp. 1_274-1_284, 2016.
- 9) 須藤三十三、浦川豪、福重新一郎、濱本両太、林春男：広域的な災害発生後のプローブ情報の活用 - 東日本大震災での事例を通して、情報システム学会誌、Vol. 8, No. 1, pp. 30-41, 2012.
- 10) 交通工学研究会：平成22年度道路交通センサス一般交通量調査DVD-ROM, 2012.
- 11) FORUM8：UC-win/Road, <http://www.forum8.co.jp/>
- 12) Google マップ：<https://www.google.co.jp/maps/place/@35.333922,139.5057027,13z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x6018459b80ac5619:0x5700747a399f2502!8m2!3d35.3192254!4d139.5466868>
- 13) NHK 放送文化研究所：津波警報・NHKが強い口調で避難呼びかけ、<https://www.nhk.or.jp/bunken/summary/research/focus/545.html>
- 14) NHK 放送文化研究所：津波警報改訂でテレビ速報画面が一新、<http://www.nhk.or.jp/bunken/summary/research/focus/570.html>

EXPERIMENT ON THE VEHICULAR EVACUATION FROM TSUNAMI CONSIDERING TRAFFIC SITUATION

Amagi KOYAMA and Yoshihisa MARUYAMA

This study performed a series of driving simulator experiments to investigate an effective way to transmit evacuation information to drivers in case of tsunami. The traffic information was transmitted through a car navigation system, and eye movements were recorded during an experiment. The 19 examinees were employed for the two types of experiments, and the results were compared to reveal the effective way to transmit the information to the drivers. According to the results of the experiments, the information of traffic congestion is not sufficient to improve the evacuation rate. It is essential to instruct proper behaviors to the drivers during tsunami.