大規模地震時における 自動車避難行動を考慮した避難施策の評価

長尾 一輝¹・大畑 長²・柿元 祐史³・花房 比佐友⁴・二上 洋介⁵・
江藤 和昭⁶・桑原 雅夫⁷

¹正会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ東北支店（〒980-0811 仙台市青葉区一番町4丁目6-1）
E-mail: nagao-kz@oriconsul.com

²正会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ東北支店（〒980-0811 仙台市青葉区一番町4丁目6-1）
E-mail: ohhata@oriconsul.com

³正会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ東北支店（〒980-0811 仙台市青葉区一番町4丁目6-1）
E-mail: kakimoto@oriconsul.com

⁴正会員 株式会社アイ・トランスポート・ラボ（〒101-0052 東京都千代田区神田小川町3-10）
E-mail: hanabusa@i-transportlab.jp

⁵非会員 石巻市総務部（〒986-8501 石巻市穀町14番1号）
E-mail: Yosuke.Futakami@city.ishinomaki.lg.jp

⁶正会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ東北支店（〒980-0811 仙台市青葉区一番町4丁目6-1）
E-mail: etoh@oriconsul.com

⁷正会員 東北大学大学院情報科学研究科（〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6番3号09）
E-mail: kuwahara@plan.civil.tohoku.ac.jp

東日本大震災では、避難者の多くが自動車を利用したことにより、各地で激しい交通渋滞が発生し、避難途中で津波に巻き込まれる等、多くの犠牲者を出した。こうした大規模地震時の交通渋滞は、津波避難の遅れだけでなく、交通事故の誘発や緊急車両の通行障害など、様々な影響をもたらすことから、自動車避難者が迅速かつ確実に避難できる方策の検討が急務となっている。

本研究では、災害時の自動車避難行動モデルを組み込んだ避難行動シミュレーションを構築し、発災時の交通状況を再現した。さらに、当シミュレーションを用いて、交通集中による渋滞を抑制するための避難施策をハード・ソフト両面から検討し、その有効性を定量的に評価した。

Key Words : evacuation plan, vehicular behavior, earthquake disaster

1. はじめに

東日本大震災では、避難者の多くが自動車を利用したことにより、各地で激しい交通渋滞が発生し、避難途中で津波に巻き込まれる等、多くの犠牲者を出した。また、石巻市では、津波警報が発令された2012年12月7日の三陸沖地震時において、津波被害は発生しなかったものの、東日本大震災と同様に、多くの避難者が自動車を利用し、市内に激しい渋滞を引き起こした。

こうした大規模地震時の交通渋滞は、津波避難の遅れだけでなく、交通事故の誘発や緊急車両の通行障害など、様々な影響をもたらすことから、自動車避難者が迅速かつ

確実に避難できる方策の検討が急務となっている。

こうした課題を解決等を目指し、東北大学を中心とした7団体の研究共同体である「DOMINGO (Data Oriented Mobility Information Group) : データ指向型モビリティ情報生成グループ」(以下、DOMINGOと呼称)では、将来の大規模災害に対する減災に資するための「[1] 道路インフラ整備・管理計画(道路配置、容量など)を支援するシステム」「[2] 災害後の住民の避難に有用な災害・交通状況のモニタリングシステムと交通状況の予測手法」を確立するべく、「1. 多様なデータの一元管理のためのデータベースの構築」「2. 素因と誘因を考慮したリスク解析」「3. 道路交通・災害状況のモニタリング手

法の確立」「4. 徒歩と車両の錯綜考慮型交通シミュレーションの構築」といった融合解析システムの技術開発を行っている¹⁾。

本研究は、DOMINGOにおける技術開発の一環として、石巻市をケーススタディとして自動車避難者の避難方策を検討するものである。具体的には、災害時の自動車避難行動モデルを組み込んだ避難行動シミュレーションを構築し、発災時として2012年12月7日の三陸沖地震時における交通状況を再現する。さらに、当シミュレーションを用いて、大規模地震時における交通集中による渋滞を抑制するための避難施策をハード・ソフト両面から検討し、その有効性を定量的に評価する。

2. 既存研究の整理と本研究の位置づけ

本研究の目的に沿い、大規模地震をはじめとする災害時における避難行動の特性にかかる調査・研究や避難行動を考慮した避難シミュレーションの開発、避難施策評価に関する研究の観点から既存調査・研究を整理し、それを踏まえ、本研究の位置づけを整理する。

(1) 避難行動に関する調査・研究

東日本大震災における避難行動に関する調査として、国土交通省の調査²⁾は太平洋沿岸市町村を対象に浸水域内に居住していた9,574人を対象として津波からの避難実態について、移動手段、移動距離、避難時のトリップなどを訪問聞き取り形式で調査している。本調査は避難行動パターン別に移動開始時刻分布を把握しているのが特徴の一つである。内閣府³⁾は岩手県、宮城県、福島県の沿岸地域における被災者870人を対象に面接方式で調査を行っている。本調査は避難行動パターン別にすぐに避難をしなかった理由を詳細に把握しているのが特徴である。サーベイリサーチセンター⁴⁾は宮城県沿岸部市町の451人を対象に、避難行動に与えた影響や情報、避難先選択、避難手段について調査を行っている。ウェザーニューズ⁵⁾は太平洋沿岸の1道6県にて被災された方を対象にインターネットを通じて調査を行っている。本調査は、回答者を通じて亡くなられた方に関する避難行動内容を併せて聞き取りを行っている点が特徴である。また、本研究で対象とする石巻市⁶⁾では、三陸沖地震(M7.3, 2012年12月7日)時の避難行動に関する調査を行っている。本調査は東日本大震災の1年半後に、再び市内で起きた避難渋滞に至った背景などについて聞き取りを行っている点が特徴である。その他に、柳原・村本⁷⁾は東日本大震災における石巻市内の避難行動についてアンケート調査を行い、移動手段別の移動距離について分析を行っている。

また大規模地震時における避難行動に関する研究としては、金井・片田⁸⁾は、避難意思決定において「体感した揺れの大きさ」「発表された予想津波高さ」「避難情報の種類」の違いが避難行動に影響することを明らかにしている。宋・関本⁹⁾は東日本大震災前後にまたがる約15カ月間の160万人の携帯電話GPSデータの記録を用いて、日常活動と避難行動の関係を分析している。ここでは、携帯GPSを登録した人のみを対象としており、高齢者や子供などの携帯を所持する割合が低い年齢層のサンプルは少数であると考えられる。また、浦田・羽藤¹⁰⁾は地震発生から避難開始までの行動と避難開始(避難完了)時刻との関係を分析し、避難開始時刻決定への影響を定量的に示している。佐藤ら¹¹⁾は心理的作用からの避難遅延要因について分析を行っているほか、神原ら¹²⁾は高齢者の避難行動に着目した分析を行っている。

(2) 避難シミュレーションによる施策評価に関する研究

大規模地震時の施策について避難シミュレーションを用いて評価・分析した研究として、今村ら¹³⁾は広域な範囲を対象とした個人単位での避難行動を表現する避難シミュレーションモデルを構築し、奥尻島青苗地区に適用し、避難開始時刻や避難手段選択の差異による避難率への影響を分析している。片田ら¹⁴⁾、¹⁵⁾は災害情報の伝達や避難行動、災害状況を表現する災害総合シナリオシミュレーターを開発し、津波浸水による人的被害の発生状況をシナリオ分析している。村木・狩野¹⁶⁾、¹⁷⁾は、徒歩避難を対象として避難者エージェントの属性の違いや相互作用を考慮した広域災害避難シミュレーションを開発し、災害情報に関する知識所持率や情報の伝達率による避難到達率への影響を分析している。森田ら¹⁸⁾、¹⁹⁾は東日本大震災で被災した石巻市を対象として、当時のアンケート調査結果に基づき避難行動を設定した上で、利用者均衡配分を用いてシミュレーションを行っている。施策評価は石巻市防災計画で掲げる各種施策(避難訓練や避難ビル整備)のケースに対し分析を行っている。熊谷²⁰⁾はリアス式沿岸部の徒歩避難者の避難行動を表現する避難シミュレーションを構築し、その適用性について実際の避難行動とシミュレーション結果とを比較、検証している。大口ら²¹⁾は東日本大震災時に東京都23区で発生した大規模自動車渋滞を交通シミュレーションで再現し、帰宅交通の出発時刻分散などの施策を評価、分析している。

(3) 本研究の位置づけ

避難行動に関する調査・研究及び避難シミュレーションによる施策評価に関する研究の動向を踏まえ、本研究の位置づけを整理する。

東日本大震災における避難行動に関する調査・研究の

視点からは、これまでに様々なアプローチで調査・研究が行われていることから、本研究はこれらの知見を踏まえることとし、避難者の諸行動を避難行動シナリオとして設定できる避難シミュレーションモデルを構築し、各種避難施策を評価するものとする。

次いで、避難シミュレーションによる施策評価に関する研究の視点から本研究の位置づけを整理する。東日本大震災以前から避難シミュレーションを用いた分析は精力的に行われているものの、防災基本計画において津波避難時は徒歩避難原則がうたわれているように、徒歩避難に主眼を置いた研究が多く見られる。一方、筆者らのプローブデータを用いた調査²⁾を通じては、東日本大震災時、石巻市ではピックアップ行動や自動車の乗り捨てなど自動車利用者の特徴的な避難行動が見られたことが明らかとなっているが、そのような避難時特有の行動を表現し、かつ、そのような行動がもたらす自動車渋滞を考慮できるシミュレーションモデルを用いた避難施策の評価、分析事例は見られない。そこで本研究は、自動車避難者の特有の避難行動を表現できるシミュレーションモデルを開発し、それらに起因する渋滞影響を考慮した上で避難施策評価を行うこととする。

3. 石巻市における三陸沖地震時における交通渋滞の実態

大規模地震時における自動車避難施策を検討するには、避難時の渋滞発生要因、課題を明らかにした上で、課題解決のための施策検討が必要と考えられる。そこで本章では、2012年12月7日の三陸沖地震時における石巻市の交通渋滞の実態を分析し、その結果等を踏まえ、石巻市

における大規模地震時の渋滞要因と課題を整理した。

(1) 石巻市における平常時の渋滞状況

地震発生時における石巻市の交通渋滞の実態分析にあたり、まず、平常時における交通渋滞の実態を整理した。図-1は宮城県渋滞対策連絡協議会において制定されている宮城県内の主要渋滞箇所のうち石巻市周辺を示したものである。また、車両感知器の交通量データによる主要な道路断面の交通量及び旅行速度の時間変動、及び道路利用者が感じている渋滞箇所を図-2に示す。

出典：国土交通省東北地方整備局ホームページ（一部加工）
図-1 石巻市付近の主要渋滞箇所（H25.1制定）

図-2 主要道路断面における交通量、速度の時間変動と道路利用者が感じている渋滞箇所

これらの図より、平常時においては内陸部と石巻市街地や石巻港方面を結ぶ路線と国道45号との交差点付近、石巻市街地中心部へ向かう路線、中心市街地（JR石巻駅、石巻市役所付近）等が主な渋滞箇所となっていることが分かる。特に、石巻市街地は旧北上川や運河に囲まれた島状の地形のため、限られた渡河部（国道398号中央三丁目など）に交通が集中し、激しい混雑が発生している。また、中心市街地部を通る国道398号は、交通量が多いことに加え、中央三丁目付近の狭幅員部、クランク部などにおける容量低下が激しい混雑の要因となっている。その他、JR石巻駅付近の踏切部といった幹線道路以外の抜け道における渋滞も指摘されている。

ここで主要道路断面における交通量（図-2）を見ると、都市部の道路では本来朝夕のラッシュ時に交通量が集中し、夜間や昼間は交通量が減少するのが通常であるが、石巻市の道路においてはこの傾向が見られず、昼間は常にラッシュ時と同等の交通量となっている。これは、東日本大震災の復旧、復興需要に伴う交通量の増大に加え、道路ネットワークの未整備（中心市街地が島状、渡河部が少ない）により、交通の需要を捌くための交通容量を現状では担保していないことが原因と示唆される。そのため、幹線道路のみならずJR石巻駅付近の踏切部といっ

た幹線道路以外の抜け道においても渋滞が発生していると考えられる。

(2) 石巻市における地震発生時の渋滞状況

2012年12月7日の三陸沖地震時（表-1）における石巻市の交通渋滞の実態を整理した。

a) 車両感知器の交通量データによる渋滞状況の把握

図-3は、車両感知器の交通量データにより、平常時に混雑が発生する主要断面において、三陸沖地震発生時の交通量及び旅行速度の時間変動を示したものである。

図-3を見ると、各地点ともに地震発生時間帯（17時台）において平常時と比較して速度が低下しており、平常時を上回る混雑状況が確認できる。これは、車避難により道路混雑が通常より増大していることが要因と考えられる。

表-1 三陸沖地震（2012年12月7日）の概要

発生日時	平成 24 年 12 月 7 日 17:18 分
マグニチュード	7.3
場所及び深さ	牡鹿半島の東 240km, 深さ 10km
最大震度（石巻市）	震度 5 弱
津波警報	宮城県沿岸（17:22 発令, 19:20 解除）
津波高（石巻市）	1.0m（石巻市鮎川）

図-3 主要道路断面における交通量、速度の時間変動（平常時と三陸沖地震発生時の比較）

次に、18時台になると交通量が各地点ともに平常時と比較して大幅に低下し、これに伴い速度が回復傾向にある。これは、概ねの避難が完了し、走行車両が減少したことを示していると考えられる。なお、この交通量が減少する傾向は津波浸水エリア（旧北上川沿岸部）において顕著に見られる。

19時台になると、平常時と比較して交通量が増加し、これに伴い速度も低下している。これは、津波警報の解除（19時20分）により、避難場所からの帰宅、待機していた業務交通等が発生し、交通需要が増加したものと想定される。

b) プローブデータによる渋滞状況の把握

図-4は、三陸沖地震発生後（17時18分～18時）におけるプローブカーの走行軌跡を示したものである。当軌跡図は車両1台1台の3秒ピッチの位置をプロットし、4段階の走行速度ランク(km/h)で色分けしたものである。

図-4で赤色で表示されている軌跡は10km/h未満を表しており、吹き出しa)のように浸水エリア外や高台へ向かう方向で著しい渋滞が発生していることが分かる。

下段の走行軌跡を拡大した図を見ると、吹き出しb)のように学校、病院等の施設に立ち寄る車両が確認でき、施設周辺で速度低下が生じていることが分かる。

図-4 三陸沖地震発生時におけるプローブカーの軌跡（上段：石巻市周辺を含む広域図，下段：石巻市および東松島市付近の拡大図）

また、吹き出しc)からは並行して近接する南北ルートのうち、速度低下が見られるルートと速度低下が見られないルートが存在しており、特定の道路（図中[1]と[2]のルート）に避難交通が集中していることが確認できる。このような状況から、避難時は平常時と異なる経路選択行動をとっていることが窺える。なお、各3ルートの道路条件は、ともに一方通行ではない道路であるものの、比較的速度低下の見られないルート[3]のみに信号交差点が設置される（ルート[1]、ルート[2]は信号交差点の無い生活道路としての性格が強いと考えられる）。ルート[1]を利用したドライバーの時刻別位置情報を遡ったものが軌跡Aである。このドライバーは速度低下区間を避けるように経路選択していることが分かる。当ドライバーは極端な例ではあるが、大規模地震時には平常時とは異なる経路選択をとることが想定される。

c) 地域住民へのアンケート調査結果から把握された地震発生時における避難行動の状況

三陸沖地震時の避難行動の状況について、石巻市が地域住民に対し実施したアンケート調査結果⁹⁾により報告されている主な内容を以下に示す。

このアンケートでは、三陸沖地震時の避難行動の状況や、今後希望する避難手段等について設問している。まず、図-5は三陸沖地震時の避難行動の状況に対するアンケート結果である。避難有無については、全体の6割の住民が避難している。避難場所については、約半数の住民が高台や津波浸水域外へ避難しており、東日本大震災の教訓や津波避難訓練（2012年7月8日実施）が活かされたとしている。その一方で、高台である日和山や牧山では渋滞が発生し、車を利用した避難による渋滞の発生が顕在化したことも報告されている。

避難方法については車両による避難と徒歩による避難の割合がほぼ半々であり、車で避難した理由として「車が大切、車も守りたいから」との回答が全体の16%となっている。これは、東日本大震災で車両が被災し、もう

※アンケート調査結果⁹⁾を基に集計
図-5 三陸沖地震時の避難行動の状況

※アンケート調査結果⁹を基に集計

図-6 今後希望する避難手段

失いたくないと考えている住民が多いことが要因と考えられる。それ以外の理由としては「要援護者（高齢者、赤ちゃん）がいるから」との回答が「車が大切、車も守りたいから」と同程度の割合となっているほか、「距離的に遠いから」も次いで多い。一方、徒歩による避難を行った理由として最も多かったのは「避難する場所が近いから」であった。

図-6は、今後希望する避難手段に対するアンケート結果である。これを見ると、今後についても約4割の住民が車避難を希望していることが分かる。東日本大震災や三陸沖地震において車避難による渋滞を経験しているにもかかわらず、依然として上述した理由により車避難を希望する住民は多いものと考えられる。

(3) 石巻市における大規模地震時の渋滞要因と課題

ここまでの整理結果から、石巻市における大規模地震時の渋滞要因と課題を考察した。

まず、平常時から交通容量に余裕の無い道路が多いことにより、地震時に避難交通が集中すると幹線道路や避難施設付近の道路で激しい渋滞が発生していることが確認された。このことから、ボトルネック交差点の容量増大や、島状の地形を有する石巻市の特徴を踏まえた渡河部の交通容量の増大等による道路ネットワークの整備が課題と考えられる。

地震発生時のプローブデータを見ると、施設に立ち寄る車両や特定の道路への避難交通の集中も見られ、これらも地震発生時の渋滞を増大させていると考えられる。

また、アンケート調査結果では避難所付近には避難者の駐車場が少なく、路上駐車が発生するとさらに渋滞が悪化する状況が報告されている。このことから、高台における学校の校庭の開放や広場の活用等も含めた適切な避難施設の配置や、避難者への避難場所の情報提供（事前教育、広報）が必要であると考えられる。

地震時の避難方法については、アンケート調査結果によると今後も約4割の住民が車避難を希望している。地震発生時は家屋の倒壊、落下物、道路の損傷などによって渋滞や交通事故等が発生する恐れがあることから、避難方法は徒歩避難が原則であり、徒歩避難に対する継続

図-7 交通流シミュレータ SOUND を活用した災害時避難行動シミュレーションのフレームワーク

的な周知が課題である。その上で、災害時要援護者の存在やその他地域の実情等により、やむを得ず自動車避難をせざるを得ない場合もあることから、徒歩避難と車避難の役割分担の明確化が必要と考えられる。なお、車避難に関しては、石巻市のアンケート調査結果⁹の報告においては「車両によらなければ避難できない要援護者もいることから、不用意な車両による避難は避けるなど車両による避難のあり方、ルール作りについて、専門家の意見を交え、慎重に対応する必要がある」との報告がなされている。

4. 災害時の自動車避難行動モデルを組み込んだ避難行動シミュレーションの構築

本研究では、災害時における交通集中による渋滞の抑制に資する避難施策を検討するため、災害時の自動車避難行動モデルを組み込んだ避難行動シミュレーションを構築した。本章では、この避難行動シミュレーションの概要を説明する。

(1) 避難交通シミュレーションのフレームワーク

図-7に避難シミュレーションのフレームワークを示す。本業務における避難交通シミュレーションは、広域ネットワークでの交通施策評価に定評のある交通流シミュレータSOUND（株式会社アイ・トランスポート・ラボ作成）を基本として、[1] 災害イベントモデル、[2] 避難行動モデルの機能を加えることで、車両による避難行動が再現できる避難シミュレーションを構築している。ここで、[1] 災害イベントモデル、[2] 避難行動モデルとは、それぞれ以下に示すものである。

- [1] 災害イベントモデル：地震による道路閉鎖、津波による道路浸水等のシナリオを受けて、各時刻における道路閉鎖をシミュレーションへの与件として設定する。
- [2] 避難行動モデル：発災時以降の避難行動開始割合の時間変化をシナリオとして指定し、各ゾーンで発生する避難者が、付近の緊急避難所や高台などの一次避難場所などへ避難先を設定し避難行動をとるものとする。

このフレームワークは金ら^{23), 24)}と同じ考え方によるものであるが、当シミュレーションは、後述のとおり避難行動モデルの改良を図った点が、金ら^{23), 24)}と異なる点である。

(2) 災害時避難行動シナリオの設定

大規模地震発生時の人々の避難意思決定は、避難行動シナリオを設定することにより表現した。

避難行動シナリオの設定メニューを表-2、被災者属性別の意思決定フローを図-8に示す。

被災者の属性は、避難車両（被災者）を「道路残留避難交通」「発災後当初出発予定交通」「発災後当初滞在予定交通」の三者に分類する。ここで、各々の属性は以下に定義される。

- 道路残留避難交通：地震発生時刻に道路上に残留していた避難交通を指す。
- 発災後当初出発予定交通：地震が発生しなければ地震発生時刻以降に自動車での移動を予定していた交通を指す。当該交通は、平常時の道路交通センサスODデータから判断しており、当該データで定義される全移動目的の交通を対象としている。
- 発災後当初滞在予定交通：地震が発生しなければ地震発生時刻以降に自動車での移動を予定していなかった潜在的な避難交通を指す。当該交通は自宅や学校、買い物先などの施設に滞在しており、かつ当初に自動車での出発を予定していなかった人々を対象としている。

避難時の各段階における行動選択（避難有無、目的地選択、行動開始時刻選択、経路選択）については、各行動に対する意思決定の選択率を与えることにより設定する。各行動に対する意思決定の選択率は、2012年12月7日三陸沖地震時におけるアンケート調査結果⁶⁾や国土交

表-2 避難行動シナリオの設定メニュー

行動選択	シナリオ設定内容	パラメーター設定
被災者属性	- 避難車両（被災者）を次の三者に分類 - 道路残留避難交通（地震発生時刻における道路上の車両） - 発災後当初出発予定交通（地震発生時刻以降に移動を予定していた車両） - 発災後当初滞在予定交通（新たに発生する避難車両）	- 道路残留避難交通：交通シミュレーションで再現。 - 発災後当初出発予定交通：H22道路交通センサスODマスターデータ。 - 発災後当初滞在予定交通：H24.12月時点の住民基本台帳人口。
避難有無	「避難する／しない」の意思決定を設定 - 本研究ではH24.12月当時の避難状況ならびに3.11の避難状況を踏まえて被害者属性に関わらず一律設定	- 石巻市アンケート「三陸沖を震源とする地震に伴う津波警報 緊急調査集計結果」 - 一本稿 図-5
避難手段	発災後当初出発予定交通および発災後当初滞在予定交通を対象に避難手段の意思決定を設定	- 石巻市アンケート「三陸沖を震源とする地震に伴う津波警報 緊急調査集計結果」 - 一本稿 図-5
目的地選択	避難開始時の所在地から最寄りの避難所（or 自宅）を避難先の目的地とする	—
行動開始時刻選択	- 地震が発生してから行動を開始するまでの時間を設定（時間経過別避難開始割合、当初出発予定時刻の変更割合） 「地震直後に避難する／ピックアップなどの用事後に避難する」割合を設定	- 国土交通省都市局アンケート「3.11津波（最大波）到達までの避難行動の有無について」 - 一本稿 図-9 - 東北大学自主調査アンケート「H24.12.7避難者の避難先の決め方」 - 一本稿 図-10
経路選択	- 地震前：ロジット型経路選択モデル - 避難時：最短コスト経路選択モデル（コスト：最短距離、現在旅行時間により設定）	- 経路選択パラメーターは2種類 - 地元住民型 30分更新 - 来訪者型 60分更新

通省が実施した東日本大震災におけるアンケート調査結果²⁾といった既往の調査結果（図-5など）を参考とするとともに、本研究において災害時の避難行動に対するアンケート調査を実施することにより避難行動に対する情報を収集し、設定した。なお、第一の行動選択として「避難行動の有無」があり、本研究では既往のアンケート調査結果⁶⁾から把握した避難有無の選択割合を適用した。

なお、金ら^{23), 24)}のシミュレーションにおいては、被災

道路残留避難交通

発災後当初出発予定交通

発災後当初滞在予定交通

図-8 各属性の意思決定フロー

者の属性として「道路残留避難交通」と「潜在避難交通（新たに発生する避難車両）」の二種類のみを考慮していた。しかしながら、潜在避難交通は地震が発生しなかった場合に、自動車の保有有無や自動車移動予定の有無（＝自動車利用が可能な立場の方）で避難時の移動手段が異なると考えられることから、当シミュレーションでは潜在避難交通を「発災後当初出発予定交通」「発災後当初滞在予定交通」に分類した。ただし、既往のアンケート調査結果⁶⁾からは自動車利用が可能か否かの違いによる避難手段選択の差異に関する知見は得られなかったため、本シナリオではそれぞれ同一の避難手段選択率を適用している。

行動開始時間選択に関しては、国土交通省が実施した東日本大震災におけるアンケート調査結果²⁾（図-9）を基に設定した。また、3章で述べたとおり、地震発生時のプローブデータを見ると、施設に立ち寄る車両や特定の道路への避難交通の集中も見られ、これらも地震発生時の渋滞を増大させていると考えられる。当シミュレーションではこの点を踏まえ、行動開始時刻選択において、地震直後に避難するか、ピックアップなどの用事後に避難するかを考慮できるように改良を図った。さらに、本研究で石巻市を対象に行ったアンケート調査（図-10）からは、避難をしない当初出発予定者において、「当初目的」は変更しないが「出発時刻」を変更した方が存在することが分かった。このような行動は避難時の交通状況に大きく影響を及ぼすと考えられるため、当シミュレーションでは、当初出発予定交通の行動開始時刻変更を考慮できるよう機能を改良した。

最後に、3章の地震発生時のプローブデータの走行軌跡で見られたように、避難時の経路選択行動は平常時と異なる経路選択行動をとられることが想定される。

そこで当シミュレーションでは避難交通を「地元住民型」と「来訪者型」の2種に分け、経路選択を行わせるものとした。さらに、大規模地震当時に石巻市内で実際に避難行動をとった方（石巻市職員）にヒアリングを行い、当事者の感覚を踏まえて以下のパラメーターを仮定した。

図-9 地震発生後の行動開始時刻
(国土交通省アンケート調査結果²⁾)

経路選択行動パラメーターの設定

地元住民型：生活道路などの抜け道に明るい

ODパターン：石巻市内々交通、内外交通

現在旅行時間weight 0.6 自由旅行時間weight 0.4

時間情報更新間隔：30分

来訪者型：地域の地理・道路に暗い

ODパターン：石巻市外内交通、外外交通

現在旅行時間weight 0.4 自由旅行時間weight 0.6

時間情報更新間隔：60分

経路選択モデルにおける一般コストの計算式

$LinkCost = distCoef \times c_0 + timeCoef \times c_1 + c_2$;
ここで、

$LinkCost$: 方向別リンクコスト
 $distCoef$: 距離項係数、自由旅行時間weight
 $timeCoef$: 時間項係数、現在旅行時間weight
 c_0 : 距離コスト[sec]
 c_1 : 旅行時間コスト[sec]
 c_2 : 右左折ペナルティコスト[sec]

(3) 津波シミュレーションの設定

6章において後述するが、本研究では、発災時として2012年12月7日の三陸沖地震時における交通状況を再現し、この再現結果を使用して津波被害による被害程度等を施策毎に比較することにより、避難施策の有効性を評価する。ここで、三陸沖地震時においては津波被災が発生しなかったことから、本研究では三陸沖地震時に東日本大震災と同規模の津波が発生したと仮定することにより、津波被害による被害程度等を算出することとした。

東日本大震災時における津波浸水シミュレーションは日本気象協会（DOMINGOの参加団体）が独自に計算したシミュレーション結果を当避難行動シミュレーション用の入力形式に加工し利用した。この津波浸水シミュレーション結果を用いて、50cm以上浸水した道路区間を通行不能リンクとすることにより、津波浸水による道路閉鎖区間を表現した。

図-10 当初出発予定交通のうち避難をしなかった方の移動開始時刻の変更割合（東北大学、(株)オリエンタルコンサルタンツ自主調査）

(4) 道路ネットワークの構築

ネットワークデータは、住友電工システムソリューションによる全国デジタル道路地図データベースを用いて対象範囲（市街地エリア）における基本道路（都道府県道以上及びそれ以外で幅員5.5m以上の道路など）及び細道路（基本道路以外で幅員3.0m以上の道路）により現況の道路網を再現した。信号現示については、石巻市街地部信号現示情報を用いて、方向別のスプリット情報を電子化し、ネットワークデータに反映させた。

(5) ODデータの作成

本研究では、平成22年度国土交通省自動車起終点調査結果をもとに作成された平成22年度道路交通センサスOD集計用マスターデータを用いて、同調査当時の石巻市内の人口分布変化（東日本大震災の影響など）を考慮し、ODデータ（平常時、発災時）を作成した。

平常時ODの作成フローを図-11に示す。作成にあたっては、避難渋滞をより適切に表現するため町丁単位に分割し作成するとともに、本研究における避難行動モデルはトリップ目的別に避難行動を記述することから、トリップ目的属性別に作成した。また、本研究でシミュレーションを実施する2012年12月7日の三陸沖地震時は東日本大震災以降であり、平成22年度道路交通センサスOD調査の実施日より人口分布の大きな変化が想定されることから、対象エリア内（石巻市、東松島市）の人口分布変化を反映した。さらに小林ら²⁵⁾の手法を用いて車両感知器の交通量による補正を行った。

発災時は、本研究では前述のとおり「道路残留避難交通」「発災後当初出発予定交通」「発災後当初滞在予定交通」の三者に被災者属性を分類して避難交通を再現している。ここで、「道路残留避難交通」は発災時に道路上の残留交通、「発災後当初出発予定交通」は平常時

図-11 平常時ODの作成フロー

ODとなるが、「発災後当初滞在予定交通」は別途を設定する必要がある。本研究では居住人口（平成24年12月時点の住民基本台帳人口）を基に設定することとし、ゾーン*i*の発災後当初出発予定交通としての発生交通量 X_i は、 $X_i = \eta * N_i$ と表される。また、目的地は避難行動シナリオ（図-8）により定められる最寄りの避難所もしくは自宅となる。ここで、 N_i はゾーン*i*の居住人口（平成24年12月時点の住民基本台帳人口）である。 η はパラメータであり、発災前後のシミュレーション上の路上走行台数の増加率が三陸沖地震におけるプローブデータの軌跡数の変化（約2倍）とほぼ同等となるように設定した（図-12）。

5. 避難交通シミュレーションの再現性

前章において構築したシミュレーションが現状の平常時及び発災時の交通状況をどの程度再現できているかを把握するため、現況再現性の検証を行った。

(1) 平常時の交通状況の再現

発災時の交通状況の再現にあたり、まず、災害が発生していない平常時における交通状況の再現性を確認した。

検証対象日時は三陸沖地震の前日となる2012年12月6日の15:00~19:00とした。再現性の検証データは同日の車両感知器（58地点）の交通量データを用い、実測値とシミュレーションによる推計値の時間帯別交通量を比較検証した（図-13）。

図-12 三陸沖地震における発災前後のプローブデータの軌跡数

図-13 平常時におけるリンク交通量の実測値と推計値の比較検証結果

図-13を見ると、全体的に実測値の交通量と比較して推計値がやや少ない傾向にあるものの、全体的に45°線の周辺に分布（実測値÷推計値）しており、また相関係数は全ての時間帯において0.9程度、RMSEも150～170程度となっていることから、当シミュレーションは概ね平常時の交通状況を示していると考えられる。

なお、実測値の交通量と比較して推計値がやや少なくなった要因としては、ネットワーク上の普段使用されていない細街路に車両が一部流れ、車両感知器のある幹線道路の交通量が少なくなったことなどが想定される。

図-14は平常時のタピーク時におけるシミュレーション演算による渋滞状況を示したものである。同図より、内陸部と石巻市街地や石巻港方面を結ぶ路線、国道45号との交差点部、石巻市街地中心部に向かう路線、中心市街地（JR石巻駅付近）で渋滞の発生が見られる。これは車両感知器の交通量データ等から把握された現状の平常時における渋滞状況（3章にて前述）とほぼ同様の傾向であり、当シミュレーションにより実際の平常時の渋滞状況が概ね再現できていると考えられる。

(2) 発災時の交通状況の再現

次に、発災時の交通状況の再現性を確認した。

検証対象日時は三陸沖地震が発生した2012年12月7日の15:00～19:00である。検証データは平常時と同様、同日の車両感知器（58地点）の交通量データを用い、実測値とシミュレーションによる推計値の時間帯別交通量を比較検証した（図-15）。

図-15を見ると、実測値と推計値の相関係数は、18時台がやや低いものの、発災直後を含む17時台は0.87程度、RMSEも17時台で150程度となっている。

図-16は発災時におけるシミュレーション演算による渋滞状況の推移を示したものである。同図より、地震発生後において、地震発生前に発生していた幹線道路の渋滞が延伸し、石巻市街地のほぼ全域に渡り渋滞している状況が確認できる。また、幹線道路の重渋滞による細街

図-15 発災時におけるリンク交通量の実測値と推計値の比較検証結果

図-14 シミュレーション演算による平常時渋滞発生状況
(2012年12月6日 17:45時点)

図-16 シミュレーション演算による発災時渋滞発生状況

路を含む交差道路への渋滞の波及や、避難場所へ向かう交通による影響として、高台の日和山へのアクセス道路における渋滞や津波浸水域外へ北上する渡河部における渋滞も確認でき、発災後における避難渋滞が概ね再現できていると考えられる。なお、発災時の渋滞状況の再現結果について地域住民（石巻市職員）へヒアリングを実施したところ、実際の発災時と同様の渋滞状況とのことであり、地域住民の目線からも概ね再現性が確保されていることを確認できた。

6. 避難施策検討

3章で整理した石巻市における大規模地震時の渋滞要因と課題を踏まえ、自動車での避難施策を検討した。

(1) 避難施策の立案にあたっての基本的な考え方

3章で整理した災害時避難の問題・課題を踏まえ、避難施策の立案にあたっての基本方針と対応策を整理すると表-3のとおりとなる。問題・課題は「避難施設」「道路ネットワーク」「自動車避難」に関するものに大別され、それらへの対応策として「[1] 避難所の整備」「[2] 避難道路の整備」「[3] 交通規制」「[4] 徒歩避難の促進」の切り口から施策を検討した。

(2) 避難施策の内容

前節に示した対応策[1]～[4]について、それぞれの避

難施策を具体的に検討した。

a) 自動車避難対応の避難施設の整備

発災時において避難者の駐車場が少ないことや、避難所付近における路上駐車存在等により渋滞が悪化する状況を踏まえ、自動車避難対応の避難施設の整備を施策として設定した。具体的には図-17に示すとおり、石巻市津波避難計画²⁶⁾に基づき避難所を整備し、かつ高台の学校において校庭を開放して駐車スペースを確保したケースを設定した。

表-3 避難施策の立案にあたっての基本的な考え方

問題・課題	対応の基本方針	対応策
■避難施設に関する問題、課題 ・避難所の設置数、立地条件、自動車避難対応の有無（駐車場の有無など）。	■避難所の増設や駐車場の確保	[1] 避難所の整備 ・新設や駐車場の確保
■道路ネットワークに関する問題、課題 ・石巻市の地勢にあった道路ネットワークとなっていない。 ⇒河川に囲まれた島状の地形により渡河部が少ない。 ⇒沿岸部から内陸部へ向かう主要交差点が終日混雑している。	■地域の実情にあった道路ネットワークの強化	[2] 避難道路の整備 ・道路の新設や拡幅（渡河部の増設等） ・混雑交差点の改良
■自動車避難に関する問題、課題 ・車避難と徒歩避難の割合が適切でない。 ・津波到達時間、避難場所までの距離、災害時要援護者の存在、避難路の状況などの制約から自動車により避難せざるを得ない住民の需要がある。	■自動車避難と徒歩避難の適切な役割分担 ・自動車避難から徒歩避難への転換	[3] 交通規制 ・沿岸部への進入禁止
		[4] 徒歩避難の促進 ・避難所近傍は徒歩避難を前提

図-17 「[1] 避難所の整備」の設定ケース

(石巻市津波避難計画²⁶⁾に基づく避難施設の整備に加え、高台の学校において校庭を開放して駐車スペースを確保)

b) 避難道路の整備

平常時から交通容量に余裕の無い道路が多く、避難のための交通が集中すると幹線道路や避難施設付近の道路で激しい渋滞が発生していることを踏まえ、石巻市復興整備計画²⁷⁾に基づく道路の新設・拡幅（石巻市の地勢を踏まえた旧北上川の渡河部の増設等）や、幹線道路の交差点を改良するケース（図-18）を設定した。

c) 交通規制

東日本大震災時においては、市街中心部の高台である日和山へ向かう避難車両の集中等により、市街中心部の津波浸水域内において激しい渋滞が発生し、被害が拡大した。ここで、津波による被災車両を減少させるためには、大規模地震の発生後に可能な限り津波浸水域内の走行車両を減らすことが重要である。そのためには、前述した避難所や道路整備といったハード面からの対策のほか、ソフト面からの対策として、津波浸水域内への交通の流入規制により地震後新たに津波浸水域内へ流入する車両を抑制することも、被害の軽減に有効と考えられる。そこで、発災時の交通規制施策として、市街中心部（島状の地域）へ流入規制を行うケースを設定した（図-19）。

d) 徒歩避難の促進

やむを得ず自動車避難をする住民と徒歩避難をする住民の役割分担を図った場合を想定したソフト施策のケースとして、避難所から居住地までの距離に応じた交通手段の分担を図り、発生する自動車交通を抑制する施策を設定した。具体的には、避難所に対して半径500mの南半円の領域内を徒歩圏内とし、徒歩圏内の住民は全員徒歩避難すると仮定したケースを設定した（図-20）。

図-19 「[3]交通規制」の設定ケース

（市街中心部（島状の地域）および沿岸部全体への流入規制）

図-20 「[4]徒歩避難の促進」の設定ケース

（避難所に対して半径500mの南半円の領域内は全員徒歩避難）

図-18 「[2]避難道路の整備」の設定ケース（石巻市復興整備計画²⁷⁾に基づく道路の新設・拡幅、幹線道路の交差点改良）

(3) 避難施策の評価

前節に示したa)～d)の避難施策に対し、4章で構築した避難行動シミュレーションを用い、施策の有無別や施策毎の比較を行うことにより、各施策の有効性を検証した。

具体的には、a)～d)の組み合わせにより「ケース1：施策無し」「ケース2：[1] 避難所の整備」「ケース3：[1] + [2] 避難道路の整備」「ケース4：[1] + [3] 交通規制」「ケース5：[1] + [4] 徒歩避難の促進」「ケース6：全施策実施」の6ケースを設定し、ケース間での比較を行うことにより検証した。なお、4章の(3)津波シミュレーションの設定にて示したとおり、本項では三陸沖地震時に東日本大震災と同規模の津波が発生したと仮定することにより、津波被害による被害程度等を算出することとした。

a) 「[1] 避難所の整備」の効果

図-21は、「ケース1：施策無し」「ケース2：[1] 避難所の整備」を用い、「[1] 避難所の整備」実施有無での日和山周辺における交通状況の比較を行ったものである。図-21を見ると、施策を実施しない場合は、避難所に入れない車により、日和山に向かう道路の渋滞が延伸していることが分かる。一方、避難所の整備がある場合は、日和山に向かう道路の渋滞が軽減している。これは、駐車スペースが増えたことにより避難所の駐車場にスムーズに入れたためであると考えられる。

図-21 「[1] 避難所の整備」実施有無での日和山周辺における交通状況の比較

図-22 「[2] 避難道路の整備」実施有無での交通状況の比較

b) 「[2] 避難道路の整備」の効果

図-22は、「ケース1：施策無し」「ケース3：[1] + [2] 避難道路の整備」を用い、「[2] 避難道路の整備」実施有無での交通状況の比較を行ったものである。

図-22を見ると、施策を実施しない場合は、石巻市中心部や日和山方面へ向かう交通が橋を通るルートに集中し渋滞が発生している。一方で、「[2] 避難道路の整備」を実施した場合は、橋を追加したことにより、石巻市中心部や日和山方面へ向かう交通が分散していることが分かる。

図-23は、シミュレーション結果を用い「[2] 避難道路の整備」実施有無での主要交差点間（大街道新橋交差点→末広町交差点）の所要時間を試算したものである。この結果から、並行道路の新設とボトルネック交差点（末広町交差点）の改良を図ることにより渋滞が解消し、所要時間の大幅な短縮が見込めることが把握できた。

c) 「[3] 交通規制」の効果

図-24は、「ケース1：施策無し」「ケース4：[1] + [3] 交通規制」を用い、「[3] 交通規制」実施有無での交通状況の比較を行ったものである。図-24を見ると、「[3] 交通規制」を実施した場合は、市街中心部（島状の地域）への流入が抑制されることから、渋滞が軽減されることが分かる。

<比較ルート>

<試算結果>

※各ケース、大街道新橋交差点を17:45に出発した車両により比較

図-23 「[2] 避難道路の整備」による主要交差点間の所要時間の変化（大街道新橋交差点→末広町交差点）

図-24 「[3] 交通規制」実施有無での交通状況の比較

【施策無し】

【[1]避難所の整備+[4]徒歩避難の促進】

浸水域外の避難所まで距離がある大橋・水明地区や渡波地区などでは、割合の変化が少ない

避難所が多い日和山周辺では、徒歩避難を促すことにより、避難所に到達できた人の割合が大幅に増加

●：避難所
(車避難可)

地震発生後30分（津波到達時）より前に避難場所（避難所、自宅）に到達できた人の割合（％）

図-25 「[4] 徒歩避難の促進」 実施有無での津波到達前の避難完了割合の変化

図-26 車により避難を完了した人の避難場所への到着率

図-27 被災車両台数の試算結果

d) 「[4] 徒歩避難の促進」の効果

図-25は、「ケース1：施策無し」「ケース5：[1] + [4] 徒歩避難の促進」を用い、「[4] 徒歩避難の促進」実施有無での地震発生後30分より前（津波の到達前）に避難場所（避難所、自宅）に到達できた人の割合を分析したものである。

図-25を見ると、施策を実施した場合は、避難所が多い日和山周辺において、徒歩避難を促すことにより避難所に到達できた人の割合が大幅に増加していることが分かる。一方で、浸水域外の避難所から離れている地区においては、割合の変化が少ないことが分かる。

e) 避難場所への到着率の比較

図-26は、各ケースの車により避難行動を完了した人について、避難場所（避難所、自宅）への到着率の推移を示したものである。

「施策無し」と施策を実施した各ケースの双方ともに、19：00頃に到着率が100%に達しているが、施策を実施したケースの方が早い時間帯での到着率が向上しており、施策を実施した効果によるものと考えられる。

なお、施策を実施したケース間では到着率の推移に大きな差は見られなかった。ただし、ここでは各ケースで車により避難を完了した人に対する到着率を示しており、避難を完了した人数自体や後述する被災車両台数はケース間で差異があることに注意が必要である。

f) 被災車両台数の比較

当シミュレーションでは、各ケースにおける被災車両（避難途中で津波により浸水した車両）の台数の試算も可能である。

試算結果を図-27に示す。これを見ると、「[1] 避難所の整備」により、被災車両台数が約2割削減されることが分かった。また、「[1] 避難所の整備」に加え、その他の施策をあわせて実施したほうが効果が高く、特に「[2] 避難道路の整備」を実施した場合は被災車両台数が約5割、全施策を実施した場合は約6割削減されると試算された。

7. おわりに

本研究では、2012年12月7日の三陸沖地震時における石巻市の交通渋滞の実態をプローブデータや車両感知器データ等により詳細に分析し、石巻市の災害時避難における問題・課題を明らかにした。次に、この分析結果や東日本大震災、三陸沖地震における住民の避難行動に関

する調査結果等を踏まえ、発災時における災害時の自動車避難行動モデルを組み込んだ避難行動シミュレーションを構築した。当シミュレーションによる計算結果を三陸沖地震時の実際の交通状況と比較、検証したところ、石巻市における災害時の渋滞状況を概ね再現できていることが分かった。よって、当シミュレーションに組み込んだ自動車避難行動モデルの考え方や、当シミュレーションの大規模地震時における車による避難行動の再現モデルとしての妥当性は高いと考えられる。

なお、避難行動意思決定に設定したパラメーターは、前述のとおり既往の調査結果や本研究で実施したアンケート調査結果に基づいている。ただし、今回、これらの調査結果からは避難者の滞在地や移動手段別といった細かな属性別の避難行動を把握するには至っておらず、一律のパラメーターを設定しているものもある。避難者属性を詳細に考慮（避難行動パラメーターを変化）した場合のシミュレーション計算結果への影響を把握しておくことも重要と考えており、今後の課題としたい。

さらに、本研究では石巻市における大規模地震時の渋滞要因と課題を踏まえ、大規模地震時における交通集中による渋滞を抑制する施策等、自動車での避難施策をハード・ソフト両面から検討するとともに、構築したシミュレーションを用いて各施策の効果を検証した。その結果、各施策に対し実施による効果を定量的に示すことができた。よって、当シミュレーションは大規模地震時の自動車での避難施策の評価に対し有効であり、さらにハード・ソフトの様々な施策の評価に対応可能であると考えられる。

石巻市における施策の評価結果としては、本研究で立案した「[1] 避難所の整備」「[2] 避難道路の整備」「[3] 交通規制」「[4] 徒歩避難の促進」のそれぞれの施策について有効性が確認でき、さらに「[1] 避難所の整備」に加え、道路整備等の施策をあわせて実施したほうがより効果が高いことが示された。よって、石巻市において今後大規模地震時の車避難への対応を検討する際は、まず「[1] 避難所の整備」としての駐車場の新設、増設を基本としつつ、道路整備等の追加施策についても、優先度の高い施策から段階的に実施していくことが望ましいと考えられる。

ただし、今回の石巻市における施策検討及び効果検証は、あくまで提案したシミュレーションの妥当性検証に主眼を置いたものであり、地域の避難施策の検討としては簡易的な内容である。よって、自動車による避難施策の詳細検討（避難駐車場の詳細な配置計画等）への適用は今後の課題である。

また、本研究の知見を踏まえた他地域における避難施策の検討も今後の課題であるが、当シミュレーションは災害時における交通特性や住民の避難行動に関する調査

結果等を踏まえ、災害時の行動特性や交通特性を考慮したものとなっており、このモデル構成は他地域へも適用可能と考えている。また、住民の避難行動に関する調査結果等により得られた災害時の避難需要の発生状況に関する知見に加え、石巻市への適用結果により以下の知見を得ることができ、これは他地域に対する検討に対しても有益と考える。

- ・石巻市と同様の地域（道路ネットワーク、需要規模など）の地域におけるモデルのパラメータ設定の知見が得られた。
- ・大規模災害時は、避難交通により潜在的な問題箇所（避難所の駐車場など）が発生することについて、知見が得られた。
- ・避難所の整備や道路整備、交通規制、徒歩避難の抑制といった避難施策の有効性について、知見が得られた。

これらの知見は、石巻市と同様の地域や、東日本大震災と同規模の災害に対しては直接的な知見であり、さらに異なる地域や災害に対しても、今回の適用結果をベンチマークとして、その対策立案や効果について推し量ることが可能であると考ええる。

その他、津波以外の火災や水害、建物の倒壊等へも対応したモデルへの拡張等も今後の課題としたい。

謝辞：本研究の分析にあたり、DOMINGOプロジェクトのメンバーとしてご協力頂いた東北大学大学院情報科学研究科 三谷 卓摩 助教、本田技研工業株式会社 今井武氏（当時）、一般財団法人日本気象協会 古市信道氏、アジア航測株式会社 浦山利博氏に、ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 大畑長、浦山利博、花井健太、彦坂健太、花房比佐友、今井武、津田博之、江藤和昭：災害時と平常時の交通マネジメントのためのデータ融合解析システムの紹介、第 47 回土木計画学研究発表会講演概要集、CD-ROM、2013。
- 2) 国土交通省都市局街路交通施設課：東日本大震災の津波被災現況調査結果（第 3 次報告）～津波からの避難実態調査結果（速報）～、2013.12.26。
- 3) 内閣府・消防庁・気象庁共同調査：平成 23 年東日本大震災における避難行動に関する面接調査（住民）分析結果、2011.8.16。
- 4) (株)サーベイリサーチセンター：宮城県沿岸部における被災地アンケート調査報告書、2013.5。
- 5) (株)ウェザーニューズ：東日本大震災 津波調査（調査結果）、2011.9.8
- 6) 石巻市総務部防災対策課：平成 24 年 12 月 7 日三陸沖を震源とする地震に伴う津波警報 緊急調査集計結果（検証）、2013。
- 7) 柳原純夫、村上ひとみ：東日本大震災における石巻

- 市内での避難行動, 土木学会論文集 A1, Vol.69, No.4, pp.1013-1020, 2013.
- 8) 金井昌信, 片田敏孝: 2011 年東北地方太平洋沖地震津波襲来時における津波避難意思決定構造の把握, 災害情報, No.10, pp.91-102, 2012.
- 9) 宋軒, 関本義秀: 160 万人の長期移動 GPS 移動データに基づく災害避難行動の分析とシミュレーションモデル構築に関する研究, 平成 24 年度国土政策関係研究支援事業研究成果報告書, 2012.
- 10) 浦田淳司, 羽藤英二: 津波避難時の避難開始時刻に与える事前行動の影響分析—東日本大震災における陸前高田市での避難行動を対象として—, 日本都市計画学会 都市計画論文集, Vol.48, No.3, pp.807-812, 2013.10.
- 11) 佐藤太一, 河野達仁, 越村俊一, 山浦一保, 今村文彦: 心理的作用を考慮した津波避難開始における意思決定モデルの開発, 土木計画学論文集 D3, Vol.69, No.2, pp.64-80, 2013.
- 12) 神原康介, 窪田亜矢, 黒瀬武史, 萩原拓也, 福士薫, 田中暁子: 東日本大震災時における高齢者の緊急避難行動の実態と集落環境による影響, 日本建築学会計画論文集, 第 79 巻, 第 701 号, pp.1593-1602, 2014.7.
- 13) 今村文彦, 鈴木介, 谷口将彦: 津波避難数値シミュレーション法の開発と北海道奥尻島青苗地区への適用, 自然災害科学, Vol.20, No.2, pp.183-195, 2001.
- 14) 片田敏孝, 桑沢敬行: 津波に関わる危機管理と防災教育のための津波災害総合シナリオシミュレータの開発, 土木学会論文集 D, Vol.62, No.3, pp.250-261, 2006.
- 15) 片田敏孝, 桑沢敬行, 信田智, 小島優: 大都市大規模水害を対象とした避難対策に関するシナリオ分析, 土木学会論文集 B1, Vol.69, No.1, pp.71-82, 2013.
- 16) 村木雄二, 狩野均: 地域性を考慮した広域災害避難シミュレーションのためのマルチエージェントモデル, 人工知能学会論文誌, Vol.22, pp.416-424, 2007.
- 17) 村木雄二, 狩野均: マルチエージェントモデルを用いた広域災害避難シミュレーションにおける情報伝達の有効性, 情報処理学会 第 52 回数理モデル化と問題解決研究会, 2004.
- 18) 森田哲夫, 長谷川弘樹, 塚田伸也, 橋本隆, 湯沢昭: 避難行動データに基づく防災対策の効果分析—東日本大震災被災地の石巻を対象として—, 社会技術研究論文集, Vol.12, pp.51-60, 2015.
- 19) 森田哲夫, 吉田朗, 小島浩, 馬場剛, 樋野誠一: 都市環境に関わる諸施策を評価するモデルシステムの提案, 土木学会論文集 D, Vol.64, No.3, pp.457-472, 2008.
- 20) 熊谷謙太郎: 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動への津波避難シミュレーションの適用性, 国土技術総合政策研究所資料, 国総研資料 第 742 号, 2013.6.
- 21) 大口敬, 伊藤麻紀, 水田隆三, 堀口良太: 東京 23 区を対象とした大規模災害時交通シミュレーションと交通渋滞緩和策の評価, 第 33 回交通工学研究発表会, CD-ROM, 2013.
- 22) 桑原雅夫, 原祐輔: 災害時の渋滞現象モニタリング—東日本大震災直後の石巻中心部の事例—, 高速道路と自動車, Vol.56, No.9, pp.48-51, 2013.
- 23) 金進英, 花房比佐友, 桑原雅夫, 大畑長, 堀口良太, 浦山利博, 佐口治, 江藤和昭, 家森崇文, 櫻井康博, 本間基寛, 益田卓朗: 災害時と平常時の交通マネジメントのためのデータ融合と解析, 第 11 回 ITS シンポジウム, CD-ROM, 2012.
- 24) 金進英, 桑原雅夫, 花房比佐友, 今井武: 集計・観測データを用いた交通避難シミュレーションの検証, 第 47 回土木計画学研究発表会講演概要集, CD-ROM, 2013.
- 25) 小林正人, 堀口良太, 花房比佐友, 小出勝亮: ネットワーク交通シミュレーションのための時間帯別 OD 交通量と確率経路選択モデルのロジット感度パラメータ一括推定プログラムの開発, 第 32 回交通工学研究発表会講演論文集, CD-ROM, 2012.
- 26) 石巻市: 石巻市津波避難計画, 2013.
- 27) 石巻市: 石巻市復興整備計画 (第 15 回変更), 2014.

(2015. 2. 27 受付)

EVACUATION PLAN ASSESSMENT CONSIDERING VEHICULAR BEHAVIOR ANALYSIS IN LARGE-SCALE EARTHQUAKE DISASTER

Kazuki NAGAO, Takeshi OHATA, Yuji KAKIMOTO, Hisatomo HANABUSA,
Yosuke FUTAKAMI, Kazuaki ETOH and Masao KUWAHARA

At the time of the Great East Japan Earthquake in 2011, a lot of the evacuees who used vehicles fell victim to the tsunami because of the heavily traffic congestion. Not only in this example, traffic congestion at a large-scale earthquake often has negative influences in various cases, for example occurrence of traffic accidents and obstruction of emergency vehicles. Therefore, it is urgently necessary to work out a plan which can make an evacuation by vehicles quick and reliable. Accordingly, this study aims to represent the traffic situation when an earthquake occurs by developing the evacuation simulator considering the analysis of vehicular behavior in the last Great East Japan Earthquake. Furthermore, a case study is conducted to assess the effects of the evacuation plans considering both structural and non-structural measures for easing traffic congestion.