

災害時避難対策評価のための歩車錯綜シミュレーションフレームワークの構築

花房 比佐友¹・小宮 粹史²・堀口 良太³・桑原 雅夫⁴

¹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新駿河台ビル9階)
E-mail:hanabusa@i-transportlab.jp

²非会員 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新駿河台ビル9階)
E-mail:komiya@i-transportlab.jp

³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新駿河台ビル9階)
E-mail:rhoriguchi@i-transportlab.jp

⁴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6-6-06)
E-mail:kuwahara@plan.civil.tohoku.ac.jp

本研究では、地震や津波など災害時における歩行者および自動車の避難行動を模擬し、市町村～都市圏規模での避難対策を評価するための交通シミュレーションフレームワークを開発することを目的としている。本稿では、本フレームワークの概念を紹介し、基本となる自動車の交通流モデルと歩行者の移動モデル、及び避難時の交通流動再現において重要と考えられる、歩車錯綜挙動とそれに伴う自動車交通流への影響についてのロジックを説明する。

一方、本フレームワークでは、評価の目的に応じて、災害イベントモデル（道路通行不可によるリンク閉鎖など）や非難行動モデルを実装できる仕組みが用意されている。災害イベントモデルと非難行動モデルを実装した歩車錯綜シミュレーションモデルで、都市部の道路ネットワークにおける避難対策のケーススタディを実施するための入力データの要件等についても概説する。

Key Words : *Traffic Simulation, Pedestrian, Vehicle, Evacuation, Natural disaster*

1. はじめに

自然災害からの避難計画など防災・減災に関する多くの研究は、今まで我々が経験してきた多くの自然災害の経験を背景に研究されている。その中でも、交通シミュレーションを活用した研究については、自動車交通に対する施策研究が多い。たとえば大島ら¹⁾や大口ら²⁾は東日本大震災時の都内における交通状況を交通シミュレーション上で再現し、交通渋滞緩和のための施策を評価している。一方で、災害時の避難評価向けに歩行者と自動車を同時に扱うシミュレーションモデルも活用されており、Erickら³⁾や印南ら⁴⁾は津波イベントを導入して、歩行者、及び自動車の避難シミュレーションを行っている。また、その計算規模は、交通シミュレーションの活用ノウハウの蓄積やデータの整備状況、PCの計算性能など、シミュレーションの活用環境の向上によって益々大規模になっていく傾向がある。

歩行者と自動車交通を一つのシミュレーション上で同時に扱うのは今までのシミュレーションモデルでも様々なところで研究・開発されている。しかしながら、大都市圏を対象とするような、大規模災害後にみられる通常とは異なる交通状況下における（歩行者交通と自動車交通の錯綜に起因する）都市内部の流動性の低下に関する現象理解や有効な対策について、現時点で多くの知見が蓄積されているわけではない。たとえば東日本大震災の東京都内では、グリッドロックといわれるほどの大規模で深刻な交通渋滞が発生しているが、加えて公共交通が運休となったために徒歩で帰宅する多くの人が駅周辺や歩道から溢れ、自動車交通に影響を及ぼしている道路も見受けられた。歩行者の立場からも、過飽和な状況における非難行動あるいは帰宅行動は、歩道の流動性を悪化させるばかりでなく、歩行時の安全性の確保が難しくなる可能性もある。そのため、どのような戦略で安全にかつ速やかに避難所へ誘導するか、あるいは安全な場所に

いる歩行者をどのくらい待機させると自動車交通、歩行者交通の流動性を最大限に維持することができるのかは、今後の大規模災害時の避難施策研究において大きな関心であると考えられる。もちろん、歩行者交通だけでなく、自動車交通においても、東京都などで設定されている緊急輸送道路⁹⁾が適用され、災害時の交通マネジメント施策を導入することで、潜在しているボトルネックの発見や、どの程度全体の交通の流動性が確保できるかを様々なシナリオで評価し、施策の方向性を見出すことが必要である。

本研究においては、大都市圏レベルの道路ネットワークへの適用を目的とした、歩車錯綜を考慮した交通シミュレーションフレームワークの構築を目的としている。本フレームワークには、地震や津波など災害時における歩行者および自動車の避難行動を模擬し、避難対策を評価するための機能を実装した。本稿においては、本フレームワークの概念を紹介し、基本となる自動車の交通流モデルと歩行者の移動モデル、歩車錯綜挙動についてのロジックを説明する。また今後の方針として、性能検証（Verification）と実用検証（Validation）を行い、首都直下型地震を題材としたケーススタディを実施する計画についても紹介する。

2. 歩車錯綜シミュレーションの仕組み

本章では、歩車錯綜シミュレーションフレームワークの開発コンセプト、および全体構成について説明する。

(1) 開発コンセプト

本研究における歩車錯綜交通シミュレーションフレームワークは、広域にわたる道路ネットワークを対象に、災害発生時における交通状況を再現し、その対策を評価できるように以下のコンセプトで開発した。

- 10～20km四方、数万リンク以上のエリアを対象とした大規模交通シミュレーションが実施できること。
- いろいろな交通モードを考慮できるよう層別された交通網を扱えること。
- 歩車錯綜による自動車交通の容量低減等が表現できること。
- 災害イベントモデルによる道路閉鎖など道路ネットワークに関連する被災状況を再現できること。
- 災害時の避難行動モデルを実装できる仕組みであること。

(2) 全体構成

図-11にシミュレーションフレームワークの概略図を示

す。シミュレーションフレームワーク内においては、シミュレーション全体を実行管理するメインルーチンによって、歩行者交通シミュレーションモデル、自動車交通シミュレーションが実行され、その間で歩車錯綜モデル、災害イベントモデル、避難行動モデルが両挙動（主に経路選択に関わる）を決定する。本フレームワークにおいては、2つのモデル以外に別のシミュレーションモデルを実行できる環境を整えており、他シミュレーションモデル間の相互作用をモデル化して実装することで同時実行も可能となる。なお、本研究において実装されているそれぞれのモデルについては後述する。

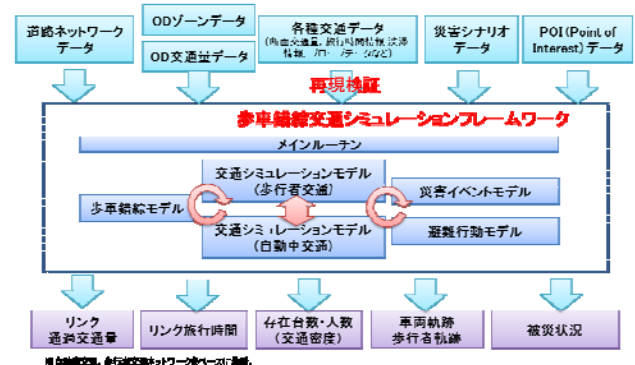


図-1 シミュレーションフレームワーク

入力データとしては、一般的な交通シミュレーションに必要な道路ネットワークデータ、OD交通量と発生・集中ゾーンデータが基本となり、現況再現の検証用、あるいはパラメータ調整用として各種交通データが必要となる。自動車交通、歩行者交通ともにほぼ同様のデータ構造としており、歩車錯綜を行う際は、各ネットワークにおける交錯点に関する情報を作成する。図-2に道路ネットワークと発生・集中ゾーン構成の例を示す。



図-2 道路ネットワークと発生・集中ゾーン構成の例

また、災害時避難シミュレーションを行うための災害シナリオデータ（道路リンクの閉鎖イベントや無信号イベントなど）は実際の被災記録や今後の災害を想定した被害想定データを基に作成する。また、避難の際に家族を迎えに行くなどの立ち寄り行動や最寄りの避難所、公

公共交通の結節点など避難行動に関わる情報としてPOIデータを入力できる仕組みとなっている。このデータは、学校や病院などその地点における施設の種別や位置データだけでなく、避難の際の行動目的（立ち寄り先など）を持つことができる。図-3にPOIデータの例を示す。

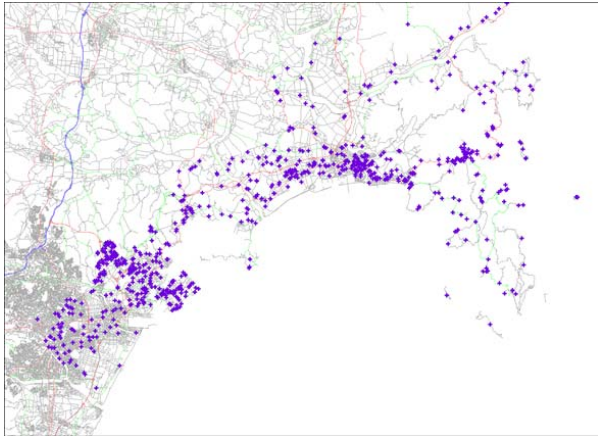


図-3 POIデータ（避難所など）の例

出力データにおいては、一般的な交通シミュレーションモデルが出力する結果（リンク通過交通量、リンク旅行時間、存在台数・人数など）のほかに、各車両・歩行者の移動履歴や災害イベントモデルによって走行・歩行不能となった車両・歩行者についての情報を出力できるようになっている。

3. 歩車錯綜ネットワークの構成

ここで、本フレームワークが扱う、自動車道路ネットワークと歩行者道路ネットワークの構成について説明する。自動車道路ネットワークと歩行者道路ネットワークは、基本的に別々に扱い、それぞれのネットワーク内において移動するという前提を置いている。その中で、交差点など物理的に交錯が起こる箇所においては、錯綜ポイントとして両者のネットワーク間で関係性を定義する。ここでの関係性とは、歩車錯綜による車両側道路の車両停止や容量低下、および歩道が過飽和になることによる自動車用道路の容量低下を示す。図-4にネットワーク構成を示す。

さらに、詳細な表現として、交差点における自動車リンク、歩行者リンクの扱いを図-5に示す構成とした。歩行者リンクにおいては双方向歩行可能であり、歩行空間に関する情報（歩道幅員）を持つ。また、交差点内の歩行者リンクの交点（歩行車ノード）においては、滞留スペースを定義し、ある一定の人数が信号待ち等で滞留できるような機能を実装した。図-5に交差点における歩車ネットワークの構成を示す。

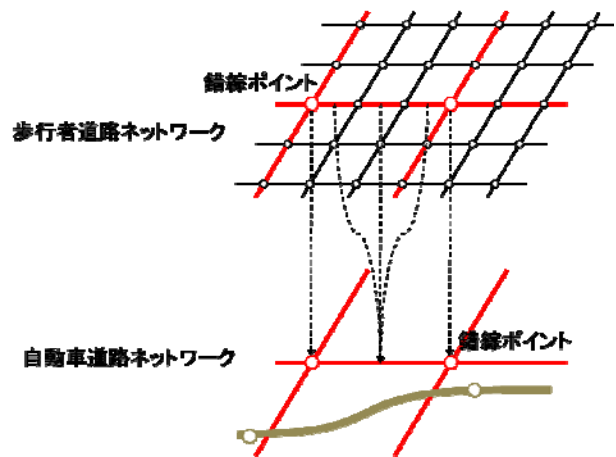


図-4 全体ネットワーク構成

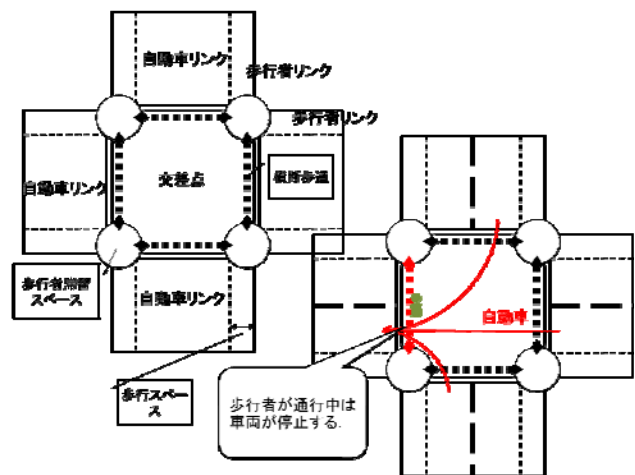


図-5 交差点における歩車ネットワーク構成

4. 交通流モデルと錯綜挙動

本章においては、本フレームワークに適用される交通流モデルの移動原理、およびについて説明する。

(1) 自動車交通流モデル

自動車交通流モデルにおいては、広域道路網をシミュレーションできるSOUND⁹⁾を適用している。SOUNDは、主に経路選択サブモデルと車両移動サブモデルで構成され、ネットワーク上のリンクコストを一定の情報更新間隔で更新しながら各車両の経路を決定し、車両移動サブモデルによって車両が移動する。

車両移動ロジックは、FIFO (Flow In Flow Out) を減速とした待ち行列モデルをベースとしており、そこにKinematic Wave 理論⁷⁾⁸⁾を適用してリンク内の状態を管理する方式を採用している。各リンクにおいては、自由流速度、リンク容量、ジャム密度 (Fundamental Diagram) を基本パラメータとして、シミュレーション中に計測されるリンク上流端、下流端の累積交通量を用いてリンクへの流入量を制御している。また、リンク内の車両移動

に関しては、Variational Theory⁸⁾を適用し、計算されたリンク内の累積交通量から各車両の走行位置を求める手法を実装している。なお、スキャンインターバルは1秒以上としている。これらの手法は比較的計算負荷が少ないため、大規模ネットワークにおける交通状況を効率よく計算することが可能である。

経路選択モデルにおいては、最短経路（距離、または時間）モデル、確率選択モデル（Dialのアルゴリズム）が実装されている。経路選択モデルは、道路ネットワークのリンクとノード、交通規制情報を基にして右左折コストが表現可能な経路選択用ネットワークを構築する。車両は、経路選択モデルから与えられる経路情報によって目的地に向かって走行する。避難行動モデルにおいては、これらの経路選択モデルをベースにして機能拡張したものであり、状況に応じて避難行動を行う処理が実装されている。

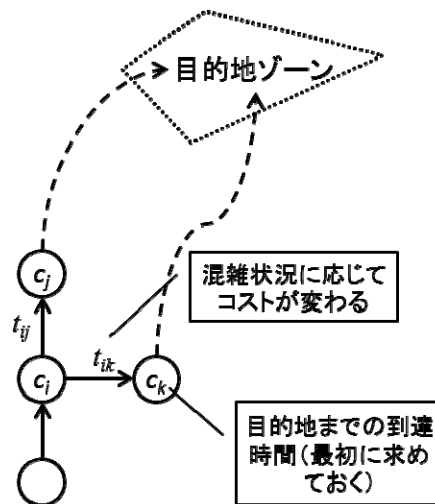


図6 歩行者の経路選択モデルのコスト計算概要

(2) 歩行者交通流モデル

歩行者交通流モデルにおいても、主に経路選択モデルと歩行者移動モデルで構成されている。

経路選択行動モデルについては、SOUNDの仕組みを踏襲しつつ、双方向リンクに対応できる機能を追加したものである。また、時間のかかる経路探索計算はなるべく行わず、歩行者経路は、目の前のローカルな混雑状況には影響されるが、ずっと先の方の状況には影響されないという方針でモデルを構築した。以下に動作概要を示す。また、図-6に経路選択モデルのコスト計算イメージを示す。

- (a) 計算開始時に、各交差点ノードから各目的地ゾーンまでの最短距離を求めておく。
- (b) 避難所のように、「どこでも良いから近いところ」を目的地にする場合は、全ての避難所から到達できる仮想の目的地ゾーンを設置して、計算上は1つの目的地を目指すようにする。
- (c) 歩行者は、分岐部（交差点）において、次にどの方向に進むかを次のルールで決める。
 - (ア) 目的地ゾーンに近づくこと。
 - (イ) 複数の方向が選択できる場合は、目的地ゾーンまでの距離で重み付けされた確率に従う。
- (d) 歩行者が集中して速度が低下する場合は、分岐部での重み付けを変えて選択確率に反映させる。
- (e) 一方、歩行者の移動モデルにおいては、隣り合う歩行者リンク、ノード（滞留スペース）を一つの「ブロック」と見なして接続し、一定時間おき（1秒）に、それぞれのブロック間を移動する歩行者交通量をブロック密度法¹⁰⁾で求める方式を採用した。図-7にブロック密度法による流量計算イメージを示す。

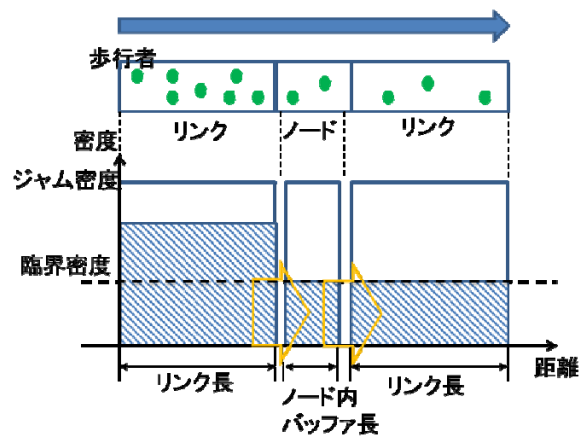


図7 ブロック密度法による流量計算（片側通行）

ブロック密度法を適用することにより、歩行者リンクにおいても、自動車交通と同様にFundamental Diagramの形をパラメータに持つ方式とし、歩行者も離散的に扱う（最小1パケット1人）ようにした。リンク・ノード内においては、歩行者密度に応じた歩行速度が計算できるが、各歩行者の歩行位置については厳密な計算は行わず、原則リンク内の滞留時間を計算しながら各リンク・ノード間の移動を行う。図-8に歩行者密度と歩行速度の関係について示す。

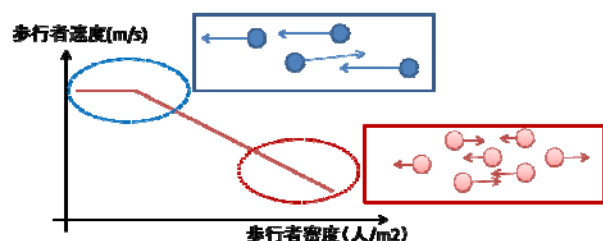


図8 歩行者密度と歩行者速度の関係（イメージ）

(3) 歩車錯綜挙動モデル

歩車錯綜挙動においては、歩行者道路ネットワークと自動車道路ネットワークとの錯綜ポイントが定義されている箇所に関して適用される。本フレームワークで考慮している錯綜ポイントは、以下の2つである。

- (a) 交差点における横断歩道
- (b) 交差点間道路（自動車リンク）と平行する歩道（歩行者リンク）

交差点における横断歩道においては、自動車信号が設置されている場合はその信号に従って歩行者が停止・歩行する。逆に、無信号の場合（の状態になった場合）は歩行者優先で、歩行者が歩行中（歩行者リンク内の密度がゼロより大きい）と判断されると自動車は手前のリンクで停止する挙動となる。

一方で、交差点間道路においては、歩行者リンク内の歩行者密度が指定された密度以上になった場合には、歩道から歩行者が溢れだすと仮定し、平行して設置されている自動車リンク容量値が低減する挙動とした。

5. 災害イベントモデルと避難行動モデル

(1) 災害イベントモデル

災害イベントモデルにおいては、道路閉鎖イベント、信号無灯火に伴うリンク容量低下イベント、特定方向が不通になる方向規制イベントが実装されている。災害避難シミュレーション実施の際は、被災予測データ等からどの道路がどの程度ダメージを受けるかを設定し、リンク閉鎖、容量低下、方向規制のいずれかのイベントデータを作成する。

(2) 避難行動モデル

非難行動モデルにおいては、発災後の自動車交通、および歩行車交通の非難行動を表現するため、主に以下の基本機能を実装している。

- (a) 運転中の目的地変更（避難所への避難）
- (b) 運転前（出発前）の出発時刻変更
- (c) 自動車乗り捨てによる徒歩移動

図-9、図-10に避難行動イメージを示す。発災前においては、通常の行動をとるため、すでに出発して走行中の車両、移動中の歩行者は当初の目的地へ向う。ただし、トリップの予定がなかった車両・歩行者については災害イベントが発動しない限り発生しない。その後、災害が起こると、ある車、歩行者は最寄りの避難所へ向い、トリップの予定がなかった車両・歩行者は避難行動に移る。その際避難所までたどり着く車両・歩行者もいるが、津波などによって被災する（そこで移動が中止される）車両・歩行者も存在する。一方で、出発を遅らせる、あるいは取りやめる車両・歩行者も現れ、通常の交通状況と

は異なる、混乱した状況が再現される。また、自動車交通の流動性が悪くなり、ある一定の時間以上同リンクに滞在すると、自動車を乗り捨てて歩行者として避難する挙動も実装した。

なお、長尾ら¹¹⁾が実施した避難シミュレーションにおいては、本フレームワークを活用した避難行動モデルが実装されており、石巻市を対象とした施策評価から、非難行動シミュレーションの有効性が示されている。



図-9 発災前挙動

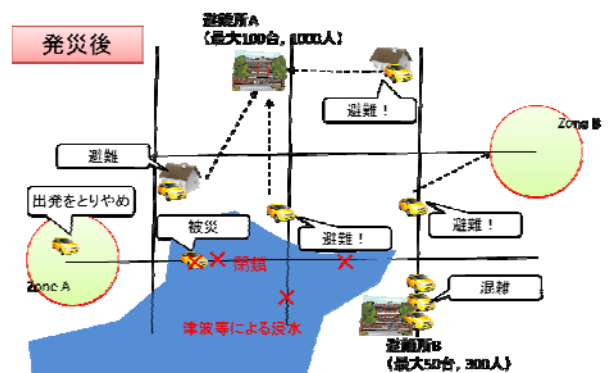


図-10 発災後挙動

6. 今後の展開

今後は、構築した本フレームワークを、日本地震工学会の津波シミュレーション性能検証マニュアル¹²⁾に沿った基本的検証と妥当性確認を実施する予定である。

検証マニュアルによると、基本的検証、妥当性確認それぞれにおいて以下の項目についての検証実施を提示している¹³⁾。

- (a) 基本的検証 (Verification)
 - (ア) 発生 (徒歩・車両)
 - (イ) 移動速度 (徒歩・車両)
 - (ウ) 避難路選択 (徒歩・車両)
 - (エ) 避難路形状による影響 (徒歩のみ)
 - (オ) 避難路混雑による影響 (徒歩・車両)

- (b) 妥当性確認 (Validation)
 - (ア) 対象地区の空間データ
 - (イ) 避難車属性, 発生数/位置データ
 - (ウ) 出力結果の開示

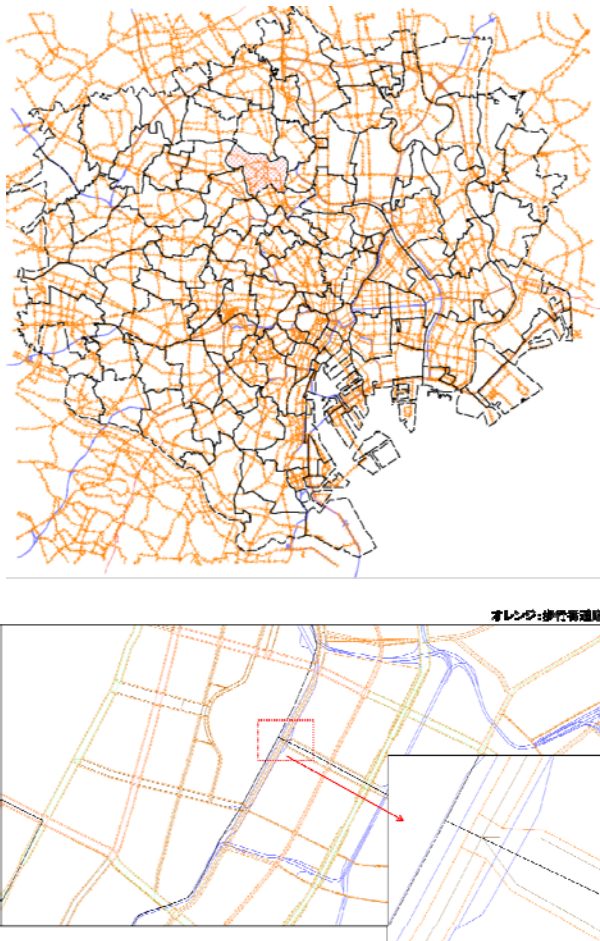


図-11 東京23区の自動車・歩行車道路ネットワーク

検証後, 本研究グループ内において実際の首都直下型地震を題材に避難対策施策評価を実施していく予定である. 図-11シミュレーション対象となる23区の自動車・歩行車道路ネットワークを示す. 本研究においては, 歩行車道路ネットワークは自動車道路ネットワークをベースとして作成した.

謝辞: 本研究は, 国立研究開発法人情報通信研究機構の「ソーシャル・ビッグデータ利活用・基盤技術の研究開発」課題Aソーシャル・ビッグデータ利活用アプリケーションの研究開発「多様なデータ融合による災害時と平常時のモビリティ支援」プロジェクトにおける活動の一環としてすすめられている.

本プロジェクトに参加しているDOMINGO (Data

Oriented Mobility Information Group) メンバー, 特に株式会社オリエンタルコンサルタンツ江藤氏, 大畑氏, 日本気象協会の須藤氏には, 災害避難シミュレーション開発にあたっての仕様作成やシミュレーション活用データ等について多くの助言をいただいた. ここに感謝の意を表する.

参考文献

- 1) Daisuke Oshima, Shinji Tanaka, Takashi Oguchi: Evaluation of traffic control policy in disaster case by using traffic simulation model, 19th ITS World Congress, Vienna, Austria, 2012
- 2) 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論文集, 2013.09.
- 3) Erick Mas, Anawat Suppasri, Fumihiko Imamura, Shunichi Koshimura: Agent-based Simulation of the 2011 Great East Japan Earthquake/Tsunami Evacuation: An Integrated Model of Tsunami Inundation and Evacuation, 41 Journal of Natural Disaster Science, Volume 34, Number 1, 2012
- 4) Junji Innami, Yozo Goto, Takashi Suematsu, Muzailin Affan, Yudha Nurdin: Development of Tsunami Evacuation Simulation and its using as Disaster Educational Program, International Symposium on Earthquake Engineering, JAEE, Vol.1, 2012.
- 5) http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/douro/kinkyu_yusou/kinkyu_home.html
- 6) Tohisu Yoshii, SOUND: A Traffic Simulation Model for Oversaturated Traffic Flow on Urban Expressways, WCTR, 1995
- 7) G. F. Newell, A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, part I: General theory, Transportation Research Part B: Methodological, Volume 27, Issue 4, August 1993, Pages 281–287
- 8) G. F. Newell, A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, part II: Queueing at freeway bottlenecks, Transportation Research Part B: Methodological, Volume 27, Issue 4, August 1993, Pages 289–303
- 9) Daganzo, C.F.: A variational formulation of kinematic waves: Basic theory and complex boundary conditions, Transportation Research Part B 39 (2), 187–196, 2005.
- 10) 堀口良太: 交通運用策評価のための街路網交通シミュレーションモデルの開発, 東京大学学位論文, 1996
- 11) 長尾一輝, 大畑長, 柿元祐史, 花房比佐友, 二上洋介: 大規模地震時における自動車避難行動に基づく避難施策の評価, 第 49 回土木計画学春大会, 2014.06.
- 12) 日本地震工学会: <http://www.jaee.gr.jp/jp>
- 13) 津波避難シミュレーションの「検証と妥当性」: <http://vri.co.jp/pdf/150209vandv.pdf>

A TRAFFIC SIMULATION FRAMEWORK OF PEDESTRIAN AND VEHICLE FOR THE EVALUATION OF EVACUATION MEASURES UNDER NATURAL DISASTER

Hisatomo HANABUSA, Tadashi KOMIYA, Ryota HORIGUTCHI, and Masao
KUWAHARA

In this study, we developed a traffic simulation framework of pedestrian and vehicle to evaluate the evacuation plans under natural disasters such as earthquake and tsunami. In this paper, we introduce the concept of our framework and explain the traffic model and the road crossing behavior model of pedestrian and vehicle in the simulation. This framework has a function to be attached the disaster event model (link closing and lane closing). And the evacuation behavior model can be installed depending on the purpose of the evaluation of evacuation measure.