



大都市避難シミュレーションの構築と混雑危険度の提案

廣井悠¹⁾、大森高樹²⁾、新海仁³⁾

1) 正会員（申請中） 名古屋大学 准教授 博士（工学）

e-mail : hiroi@nagoya-u.jp

2) 日建設計シビル 修士（工学）

e-mail : oomorita@nikken.jp

3) 応用技術株式会社 修士（地球環境科学）

e-mail : shinkai@apptec.co.jp

要 約

本研究は首都圏を対象として大都市避難シミュレーションを構築し、東日本大震災時における首都圏滞在者の移動データを利用して作成した帰宅意思モデルを用いて、帰宅困難者対策の量的評価を行うとともに、災害時における混雑危険度指標を提案するものである。この結果、首都圏において仮に大規模災害時に帰宅困難者の一斉帰宅が行われると、6人/m²を超える密集空間の道路延長距離は東日本大震災の約137倍となることや、このような歩道の混雑を低減するためには就業者の一斉帰宅抑制がより効果的であること、車両の平均移動速度が3km以下となる車道の渋滞は比較的長期かつ広域に発生することが判明した。

キーワード： 大都市災害、避難、シミュレーション、帰宅困難

1. はじめに

2011年3月に発生した東日本大震災時、首都圏では鉄道が運休したことにより515万人ともいわれる大量の帰宅困難者が発生し、各地で車や人の大渋滞が発生した。これほどの数の帰宅困難者が発生した事例は世界でもはじめてであり、これ以降は地方自治体が帰宅困難者対策をこぞってすすめることとなった。なかでも東京都は帰宅困難者対策条例を2013年4月に施行し、都民の義務として大地震後の一斉帰宅を禁止するなど、積極的に対策を行っている。建物倒壊や津波、火災被害とは異なり、東日本大震災時の首都圏では帰宅困難現象による死者は報告されていないにも関わらず、我が国の大都市が積極的に帰宅困難者対策を進める意義は、おおむね1. 歩道の大混雑による群集なだれの発生回避、2. 車道で発生する渋滞による避難・消火・救急など災害対応の遅延解消にあるものと考えられる。それゆえ、帰宅困難者対策の政策評価はこの2点を主な指標として考慮する必要がある。

ところで大都市は複合災害リスクが極めて高いことが知られているが、大都市における市街地火災からの避難や津波避難を考える場合は、このような数多の広域的移動による影響も考慮しなければならない。特に時間制約の強い津波避難は渋滞による避難行動の遅れがとりわけ影響が大きく、局地的な範囲のみを対象とした避難安全検証は不十分であり、大量の帰宅困難者の移動による避難障害もあわせて考える必要がある⁽¹⁾。

本研究は上記の問題意識に基づき、大都市圏を対象とした災害時の広域的な避難シミュレーションを構築することで、1. 現行の帰宅困難者対策を評価するとともに、2. 様々な災害対応に影響を与える道路ネットワークの混雑程度を示す危険度指標を提案し、3. 大都市の市街地避難性能を検証する複合災害避難シミュレーションのひな形とするものである（本稿では主に上記1、2について記述する）。なお、



広域的視点から災害後の大都市内における避難者・帰宅困難者の移動を再現しようとする取り組みは、これまでも中央防災会議(2008)による検討事例¹⁾や、大佛ら(2011)による既存研究²⁾がある。しかしながらこれらが対象とする移動者は原則として徒歩のみであり、自動車による移動者などを扱ったものではない。また上記の研究は仮想的な状況を想定したSP調査によるデータを根拠としてモデル構築を行っているが、本研究では東日本大震災時にアンケート調査で得られた実データを用い、歩道・車道ともにシミュレーションのデータ検証を行っている。この点で本研究は新規性・独自性を有している。

2. シミュレーションの構築

2.1 シミュレーションの概要

本研究で構築する大都市避難シミュレーションは首都圏の自動車と徒歩移動者を両方考慮したものである。なかでも本稿は帰宅意思モデルに基づき帰宅困難者が自宅へ様々な交通手段で移動することによって、歩行者空間で6人/m²を超えるような過剰な密集状態がいつどこで発生するか、また災害対応が著しく遅れる重度の交通渋滞がどのような条件で発生するかを検証し、帰宅困難者対策の政策評価や局地的な避難シミュレーションの基礎資料に用いることを目的とする。用いた道路はDRMデータ(平成26年)の一般都道府県道以上及び平成22年度道路交通センサス対象道路(ただしここでは高速道路は除外しており、またセンサス調査対象外の細街路も考慮していない)であり、歩道幅はセンサスの歩道幅データを使用、道路交通センサス対象外の歩道幅については片側1m×両側とした。このもとで自動車と徒歩移動者が移動を行うマルチエージェント型シミュレーションを構築している。ここでは歩行者と車両はそれぞれ別の広域移動ネットワーク(車道と歩道)上を移動するものとし、それぞれの混雑状況(密集度)によって速度が低下する密度流モデルを採用しており、歩行者の横断やみ出し等による自動車交通阻害は考慮していない。移動速度は中央防災会議1)を参考に、徒歩移動の場合は混雑度が1.5人/m²で時速4km/h、混雑度が1.5人/m²以上6人/m²未満では時速4km/hから時速0.4km/hまで直線的に低減し、混雑度6人/m²以上は0(つまりそれ以上入らない)ものとした。他方で自動車の移動速度は道路交通センサスの非混雑時旅行速度を基本としたが、帰宅車両による混雑状況に応じた速度制限を与えている。混雑状況による速度制限値は平成22年度道路交通センサス調査結果から集計した東京23区内の全ての一般道路における混雑状況と旅行速度の関係を参考に、車両密度を(台/km)、移動速度を(km/h)としたとき、車両密度に対する最大限度の旅行速度を想定して式(1)のように設定した(図1参照、センサスデータ上の上限値)。また歩道の混雑度が0.5人/m²以上の場合は歩行者による車両交通への影響を考え、東京23区内の道路構造と平常時の交通状況での平均的な旅行速度を想定し車両密度に(2)式を適用した(図1参照、対数曲線近似、重決定係数0.41)。さらに車両密度100台/km以上では極度の渋滞状態であるとして速度を1km/hに制限し、車両密度上限を150台/kmとしてそれ以上の車両進入は制限することで渋滞の伝播を表現した。なお、ここでの車両密度は帰宅車両の通行台数に道路交通センサスの14時台の交通量を加えたものとした。これにより、帰宅行動に伴う車両交通が集中し歩行帰宅者も多くなる道路区間では直後の車両移動速度が通常時よりもシミュレーション内では低下しやすくなる。

$$\rho_{car} = 1000V_{car}^{-1.0} \quad (1)$$

$$\rho'_{car} = 750V_{car}^{-1.3} \quad (2)$$

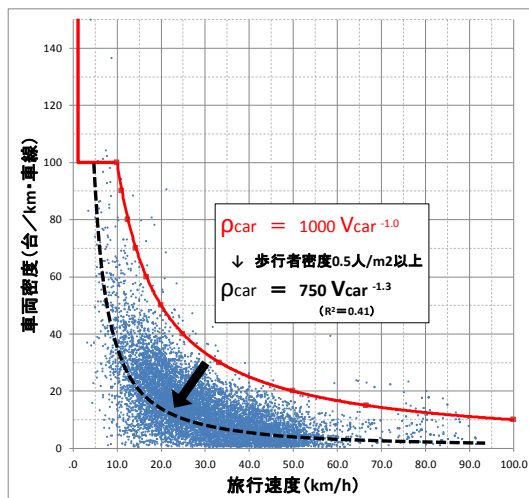


図1 平成22年度道路交通センサス調査結果から得られた東京23区内の全ての一般道路における混雑状況と旅行速度の関係とシミュレーションで設定した自動車の移動速度

2.2 利用するデータと帰宅意思モデル

続いて上記のシミュレーションで用いる移動者データを準備する。ここでは廣井ら³⁾の分析結果を一部援用して用いることとした。この分析は2011年3月下旬、つまり震災から2週間後に行った大規模社会調査のデータをもとに帰宅行動をモデル化したものである。この調査では、地震発生時の帰宅実態を出発時刻と出発地点、立ち寄り時刻と立ち寄り地点、帰宅時刻と帰宅地点及びこれらの交通手段を全て回答者に尋ね、東日本大震災当日のトリップデータを把握している。ここで回答されたトリップはデータのスクリーニングを行うことで、1926サンプルが残ったが(図2、図3)、このデータを用いて帰宅意思モデルを作成している。

表1 社会調査の概要

調査エリア	東京都(507名), 神奈川県(506名), 埼玉県(505名), 千葉県(508名)
調査期間	2011年3月25日～2011年3月28日
調査実施方法	インターネット調査
調査主体	東京大学, 東洋大学, サーベイリサーチセンター
回収状況	回収数2026サンプル

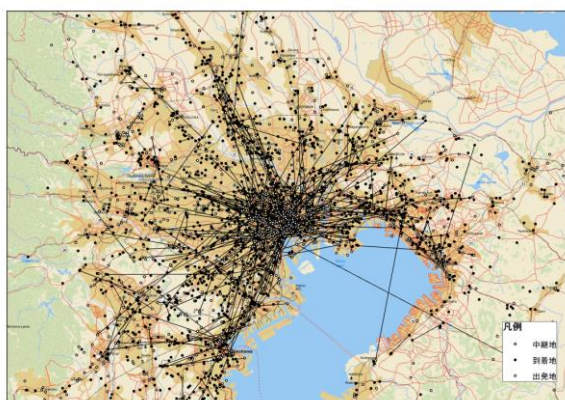


図2 当日のトリップデータ（徒歩のみ）

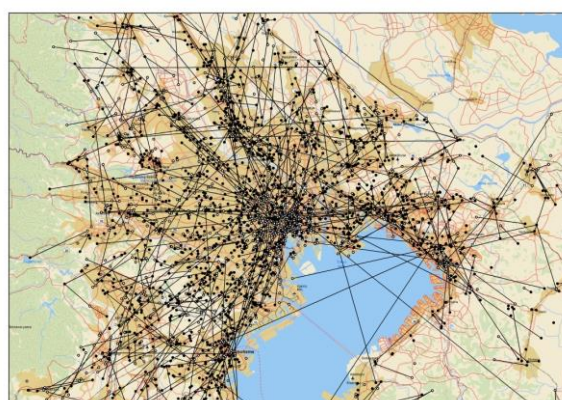


図3 当日のトリップデータ（自動車利用）



ここでは推定精度を向上させるためトリップデータの中で主な交通手段として自分の車・バイク・自転車を用了サンプル及び立ち寄りを行ったサンプルは対象外とした。ここで、帰宅意思の決定にランダム効用理論 (Multinomial Logit Model) をあてはめ、効用関数の確定項を帰宅距離 (km)、安否確認ができなくて困ったかどうか (困ったら 1)、勤務中であったか私用であったか (勤務中なら 1)、65 歳以上かどうか (65 歳以上なら 1) 及び定数項で定義した (これらは社会調査で尋ねた設問の通り。なお、帰宅距離と定数項以外はダミー変数とした)。その後、主な帰宅行動として 1. 車で迎えに来てもらう、2. 徒歩帰宅を試みる、3. その場に滞留する、という 3 パターンの行動用意し選択肢としている。推定する係数は実際の選択結果によって得られる非集計データを用い、(3)式で示される尤度関数を最大とする最尤推定法で求まる (ただし p_{jk} は個人 k が j という選択肢を選択した確率を示しており、それぞれの集合を K 、 J で表わす)。なお、 L の最大化は L の最大化と等価より実際の計算には(4)式を用いた。

$$L^* = \prod_{k \in K} \prod_{j \in J} p_{jk}^{\delta_{jk}} \quad (3)$$

$$L = \ln L^* = \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \delta_{jk} \cdot \ln p_{jk} \quad (4)$$

これに先述のトリップデータをあてはめ、係数とその Hessian 行列を求めることで係数の有意確率及びモデル全体の自由度調整済尤度比を求めた (ニュートン・ラプソン法を用いてプログラムを作成)。その結果が表 2 である。安否確認ダミーと高齢者ダミーの係数は 1%有意とならなかったが、それ以外の係数は有意であった。なお自由度調整済尤度比は 0.362 であり、防災行動を分析するモデルとしては、あてはまりは悪くない。有意であった係数の符号を解釈すると、帰宅距離については距離が長ければ長いほど滞留する傾向にあり、また帰宅距離 20km 前後が車による送迎のピークである。そして勤務中であるほど滞留しやすい (逆にいえば、私用の外出の場合は滞留するための拠点が見つけにくく、徒歩帰宅や車で送迎という選択肢を採用しやすい)。安否確認の説明変数が 1%有意でなかったのは、そもそも震度 5 強程度であった東日本大震災時には家族の安否情報に関するニーズは 2/3 程度で (上記調査より)、安否確認が取れず困ったかどうかは帰宅意思に影響しなかった人がいたためと考えられる。これをもとに通勤外出者、私用外出者ごとの選択確率 (ともに高齢者以外) を距離別に示したグラフが図 4~図 6 である。通勤外出者よりも私用外出者のほうが、距離が遠くても送迎を選択してもらえる結果となっており、送迎の選択確率は帰宅距離 25km 付近で私用外出者については 2 割以上にものぼり、この距離における滞留選択確率と同程度である。

表 2 各係数と自由度調整済尤度比 (**は 1%有意)

	その場に滞留		徒歩帰宅	
帰宅距離	0.0797	**	-0.0761	**
安否確認できず 困ったかどうか	0.3030		0.3617	
勤務中かどうか	0.8238	**	-0.1762	**
高齢者かどうか	0.0178		0.3208	
定数項	-1.3960	**	2.3340	**
自由度調整済尤度比	0.362			

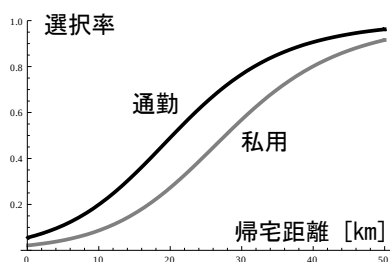


図4 滞留の選択確率

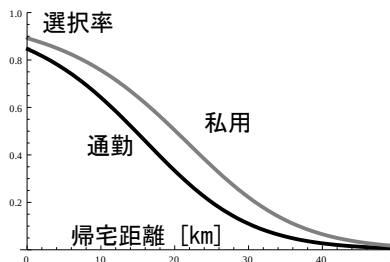


図5 徒歩帰宅の選択確率

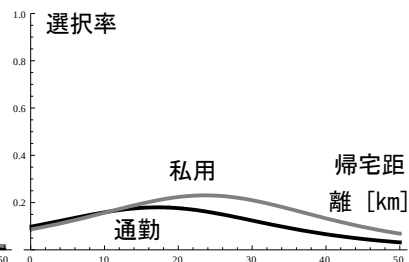


図6 車による送迎の選択確率

ここでシミュレーションの対象領域は1都3県かつ東京駅から40km圏内とし、移動の起終点はPT調査の小ゾーンの中心点（自宅と同じ小ゾーン内への外出は対象外）とした²⁾。シミュレーションの対象者はPT調査をもとに14時時点で東京23区を目的地として自宅から外出している者全員とする（たとえばこのうち「トリップ目的」が通勤・業務の人が、東京23区の事業所内滞在者となる）。自転車・バイクによる帰宅は考慮しないものとし、自分の車で帰宅を試みる人はPT調査の主要交通手段が自動車である人とした。また主要交通手段が公共交通（つまり自分の車、バイク、自転車以外）かつその移動目的が「通勤・通学・勤務」、「私用・その他」の人についてそれぞれ上記の帰宅意思モデルに従い徒歩帰宅・送迎してもらう・帰宅せず滞留の3パターンを選択するとした。この分布を図7に示す。

なおここで、外出者の配置は小ゾーン単位で行い、シミュレーションを開始する災害発生後から自宅所在地の小ゾーン中心点へと対象道路ネットワーク上の最短所要時間経路を基本として移動させることと仮に設定した。一度移動をはじめると途中で帰宅、滞留などの意思決定は変更しないものとし、休憩、立ち寄り、目的地変更、ターミナル駅への移動などは考慮していない。なお、廣井ら³⁾の調査では送迎のうち「迎え」と「送り」は分けられていないが、この教訓から東京都の調査⁴⁾は両者を分けて尋ねており、結果として送迎のうち迎えの割合は47%であったことがわかっている。よって、ここでは送迎の47%において上り下りの双方で交通需要が発生するとした（例えば図6の選択確率のうち47%が迎えに来てもらうと仮定。残りの53%は他者運転車両に同乗と想定し、交通需要は新たに発生しないものとする）。なお、上記のように主要交通手段が「自分の車」である人は、全員が自動車で「すぐに帰宅」して滞留しないと考え、自転車とバイクは混雑に寄与しないものとする。さらには徒歩・自動車ともに、帰宅経路は各人が10分ごとに最短時間経路を迂回も含め逐次更新すると想定した（つまり道路情報については完全情報を想定する）。ところで今回は道路の直接被害による交通障害は考慮しなかったが、地震発生時に高速道路を走行中の車両はすべてICから出て自宅に帰宅するものと想定している。

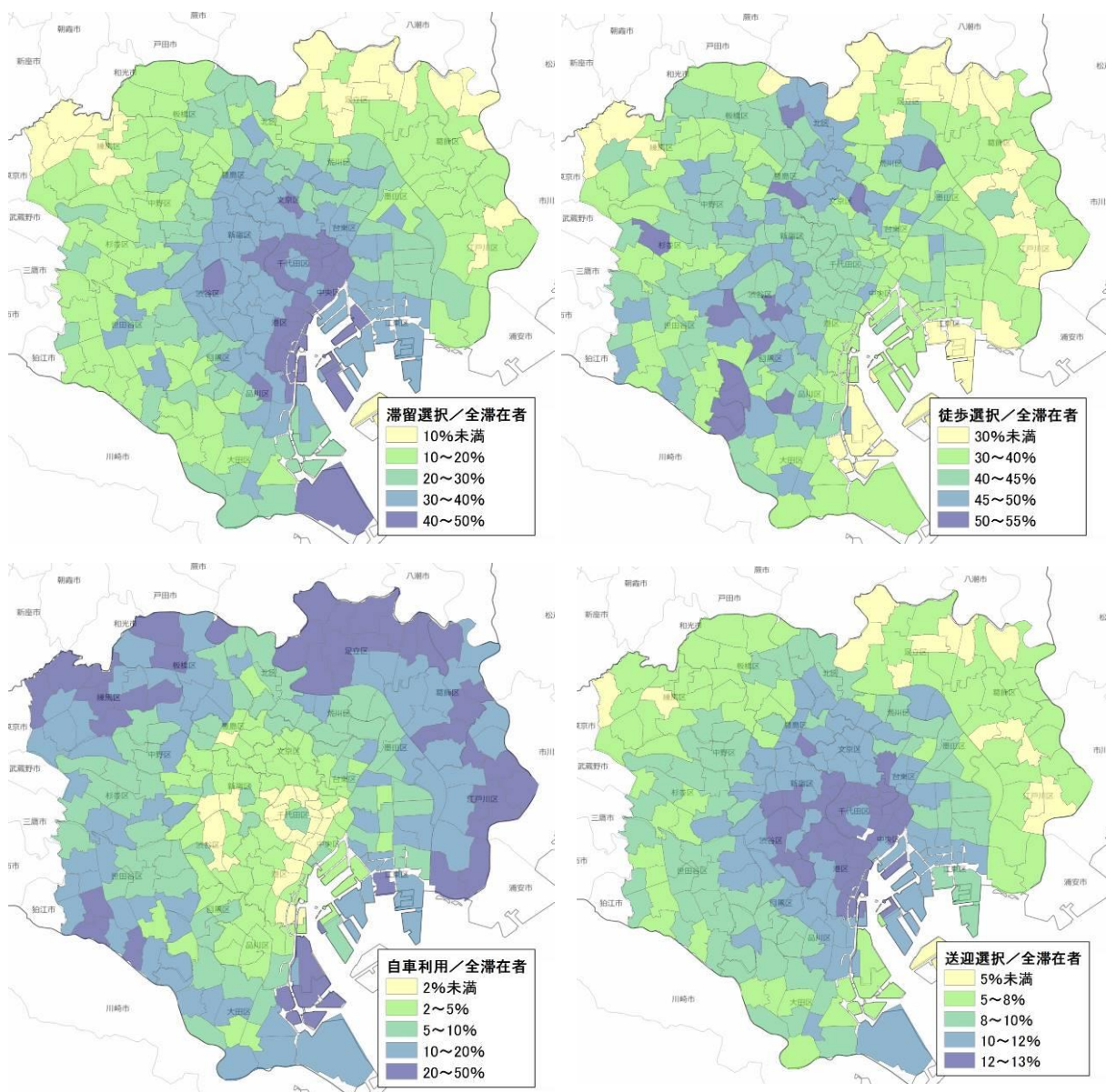


図7 帰宅意思モデルに基づくシミュレーションで用いた移動者の帰宅手段（滞留する割合（左上）、徒歩帰宅を行う割合（右上）、自車で帰宅する人の割合（左下）、送迎を選択する割合（右下））

2.3 東日本大震災時に得られた帰宅データ（歩道・車道）との比較

ここで構築したシミュレーションを東日本大震災時の帰宅データと比較する。図8は東日本大震災時に帰宅した人の帰宅所要時間（横軸）と、その人のシミュレーションで計算された帰宅所要時間（縦軸）を比較したものである。アンケートデータは1時間単位かつ休憩など立ち寄り時間も含むため、回帰式の傾きは0.84、 $R^2 = 0.48$ となった。おおむねシミュレーション結果は東日本大震災の実態を表しているものと解釈できる。

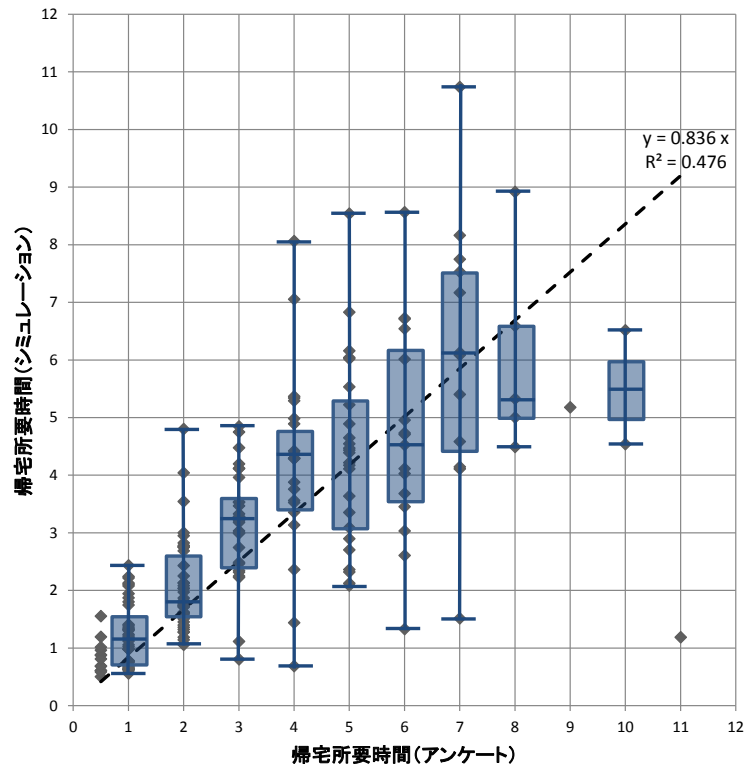


図8 実データとシミュレーションで計算した帰宅所要時間の比較 (N=444)

また同じく車道についても、道路混雑と移動速度の関係を検証した。車道については緊急車両の走行障害を想定して移動速度での検証を行うこととし、東日本大震災発生時の携帯端末による経路探索サイト（株式会社ナビタイムジャパン）利用者のプローブデータ（東京23区内、トリップ移動距離1km以上、震災直後から6時間後までの移動で抽出：サンプル数81区間）をもとに、シミュレーションケース1の区間別移動速度の比較検証を行った。プローブデータと計算結果の区間別移動速度の関係は線形近似の傾き0.89（計算結果のほうやや遅い）で相関係数0.52という結果となり（図9）、検証したサンプルは少ないながらもおおむねシミュレーション結果は東日本大震災の実態を表しているものと解釈できる。今後は、さらに多量のプローブデータとの比較検証を行うことで、混雑と移動速度の関係の簡易モデルの改善検討を行っていく予定である。

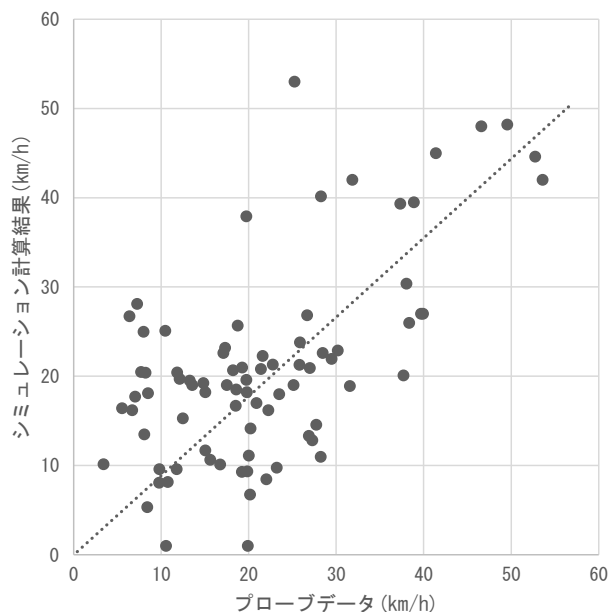


図9 プローブデータ（東京23区内、トリップ移動距離1km以上、震災直後から6時間後までの移動で抽出）とシミュレーションケース1の区間別移動速度の関係（N=81）

3. 帰宅困難者対策の政策評価

本研究で構築した大都市避難シミュレーション（ただし本稿はエージェントを帰宅者のみとする）で様々な政策評価を行う。はじめにケース(1)として東日本大震災を再現した結果を示す。東日本大震災時は平日の就業時間中に発生した震度5強程度の災害であったため、帰宅開始時間もばらつき、かつ滞留できる施設も多く、一斉帰宅状態とはなっていない。このため混雑の発生条件としてはやや緩い条件となる。ここでは帰宅開始時間分布を東日本大震災時と同様（ただし、高層建物内の滞留者が屋外に出てくるまでの時間などは考慮していない）とし、徒歩帰宅、車で迎えに来る選択も東日本大震災時と同様の割合として（つまり帰宅意思モデルは利用せず実データのみを使用した）シミュレーションを行った。

これ以降のケースは首都直下地震など強い揺れを想定したものである。ケース(2)は東日本大震災時と異なり、就業者などの「通勤・通学・勤務」目的の人や、買い物客など「私用・その他」の人がいずれも災害直後に一斉の徒歩帰宅を試みると仮に想定した場合の結果である（ただし車での送迎を選択する人の数は上記の帰宅意思モデルに基づくものとする）。つまり東日本大震災時と徒歩帰宅者の数及びその出発時間分布が大きく異なり、結果としてたいへんな混雑が考えられる想定である（東日本大震災時の滞留者が、仮に全員徒歩帰宅してしまったらという想定）。ケース(3)はケース(2)をベースとしつつ、就業者など「通勤・通学・勤務」目的の人が半分は徒歩帰宅ではなく滞留を選択したとする場合の想定である。つまり徒歩帰宅者の帰宅開始時間分布は一斉でありながら、就業者の一斉帰宅数を半分抑制できた場合の政策効果とみてよい。ケース(4)もケース(2)をベースとしつつ、買い物客などの「私用・その他」の人が半分徒歩帰宅ではなく滞留を選択する場合のシミュレーションである。一時滞在施設の確保をはじめとした、私用外出者の帰宅抑制効果を検証するケースとなる。ケース(5)はケース(2)をベースとして、車で迎えに来る人をゼロとしたケースである。このとき、車で迎えに来てもらうことを選択する人はみな滞留するものとし、自分の自動車で帰宅する人は他ケースと同じくそのまま一斉に帰宅を試みる。

表 3 シミュレーションケースの特徴（仮に設定した計算条件）と結果

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5
帰宅開始時間	東日本大震災時と同様	一斉	一斉	一斉	一斉
従業員の帰宅・滞留	東日本大震災時と同様	全員帰宅	半分が滞留	全員帰宅	全員帰宅
私用外出者の帰宅・滞留	東日本大震災時と同様	全員帰宅	全員帰宅	半分が滞留	全員帰宅
車両による帰宅	PT調査の主要交通手段が自動車	PT調査の主要交通手段が自動車	PT調査の主要交通手段が自動車	PT調査の主要交通手段が自動車	PT調査の主要交通手段が自動車
車両による送迎	東日本大震災時と同様	東日本大震災時と同様	東日本大震災時と同様	東日本大震災時と同様	無し
1㎡6人以上の平均道路延長(歩道, km)	0.04	5.10	1.43	4.24	5.10
3km/h未満となる道路延長(車道, km)	1307	1529	1527	1537	576

これら各ケースの特徴を表3に整理し、計算結果を示す(平均道路延長は1～10時間後の平均を導出)。図10、図11がケース(2)の発災1時間後及び5時間後における歩行者密度であり、図12、図13がケース(2)の発災1時間後及び5時間後における自動車の平均移動速度である。東日本大震災と異なり、万一大規模災害直後に一斉帰宅を許してしまった場合は、首都圏では歩行者密度が6人/㎡以上というきわめて高い密度が散見された。中心部では直後に、周縁部では発災後ある程度時間が経過したのちに混雑が発生しやすいことがわかる(特に周縁部の橋などでは発災1時間後より発災5時間後のほうが混雑している)。また自動車の平均移動速度も、時速3km/h未満の箇所が多く現れることが分かった。一刻も早く現場に到着せねばならない状況下でこのような重度の交通渋滞が起きた場合、災害対応の著しい遅延を許す可能性がある。更にこの傾向は、時間経過につれて首都圏郊外部に向け拡大していくことも分かった。このように、どの道路が・どのような時刻に・どの程度混雑するかを知ることは、滞留者の誘導や一時滞在施設の施設立地問題を考える上で重要な知見である。

図14～図17はそれぞれのケースにおける歩行者密度を示したものである(ただし0.5人/㎡以上のみを抽出、なおケース(5)の歩行者密度はケース(2)とほぼ同様なので割愛)。ケース(1)とケース(2)の比較により判明したことは、滞留場所の喪失や家族の安否が懸念されることにより一斉帰宅が行われやすい首都直下地震時などでは、首都圏の在住者が2011年3月11日に経験した徒歩帰宅者の大行列とは、比べ物にならないほど深刻な状況になるという可能性である。特に上記で述べた群集なだれの危険性が増す6人/㎡の歩行空間は発災後10時間までの計算結果を平均すると、道路延長距離でケース(1)の約137倍発生することがわかり、人的被害の発生リスクが深刻であることも物語っている。このことより一斉帰宅を許してしまった場合と東日本大震災では帰宅困難者をとりまく状況が全く異なることが定量的に判明したほか、首都圏で帰宅困難者対策をすすめる意義を改めて確かめることができた。ケース(2)からケース(4)を比較することで、帰宅困難者対策の具体方針を評価することが可能となる。これによると、少なくとも広域的な視点においては、災害直後の歩行者密度を減らすには就業者の一斉帰宅抑制がとりわけ効果的である(6人/㎡の歩行空間がケース(3)はケース(2)の0.28倍、ケース(4)はケース(2)の0.83倍)。就業者の半分が帰宅抑制することで、東日本大震災時とまではいかないまでも、滞留者密度は大幅に減じることがわかった。反対に、私用外出者の一斉帰宅抑制は就業者の一斉帰宅抑制と比べてやや効果が薄い。上記の帰宅意思モデルによれば、私用外出者は就業者に比べてそもそも滞留しにくいことが明らかになっており(図4)、また一時滞在施設における私用外出者の滞留も、備蓄物資の費用負担や善管注意義務など法的責任の所在、セキュリティの問題など数多もの課題が存在し、一般には事業所への就業者の滞留よりも困難である。それゆえ地域や曜日によっても異なるが、帰宅困難者対策としては就業者の一斉帰宅抑制の優先順位がきわめて高いものと判断できる。

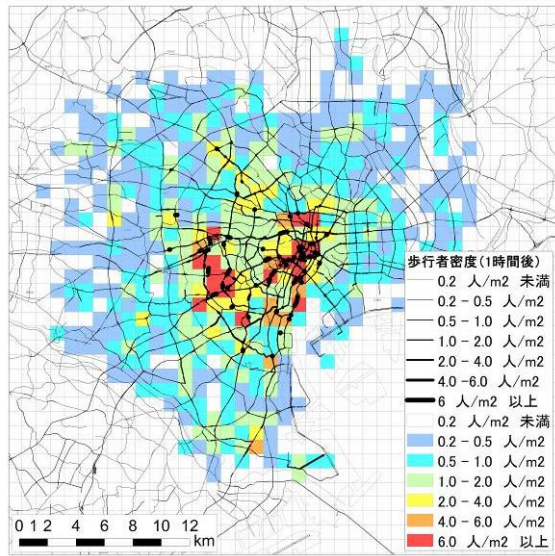


図10 ケース(2)における
徒歩帰宅者の歩行者密度(発災1時間後)

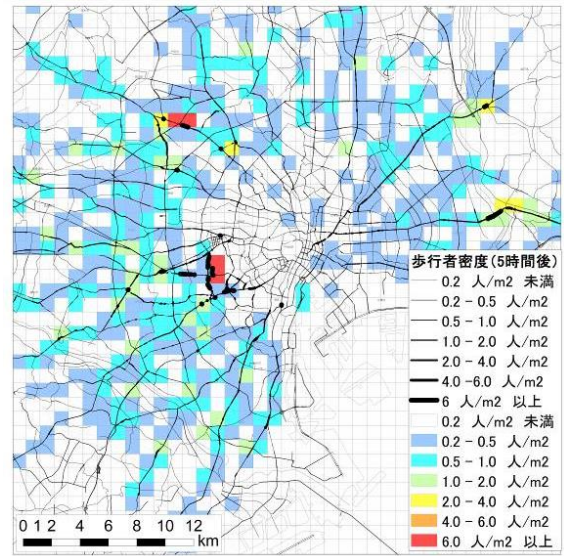


図11 ケース(2)における
徒歩帰宅者の歩行者密度(発災5時間後)

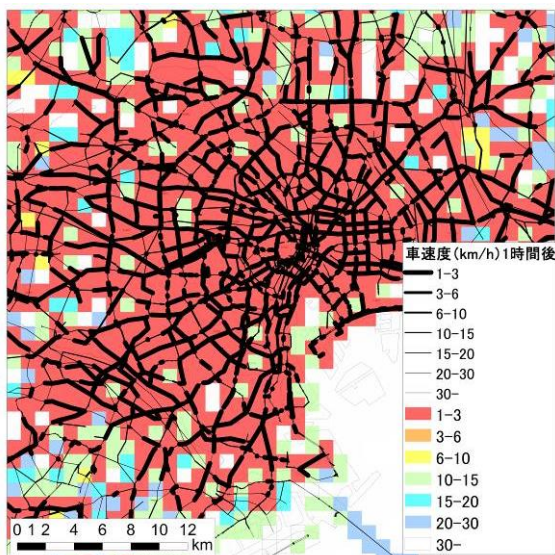


図12 ケース(2)における
車の平均移動速度(発災1時間後)

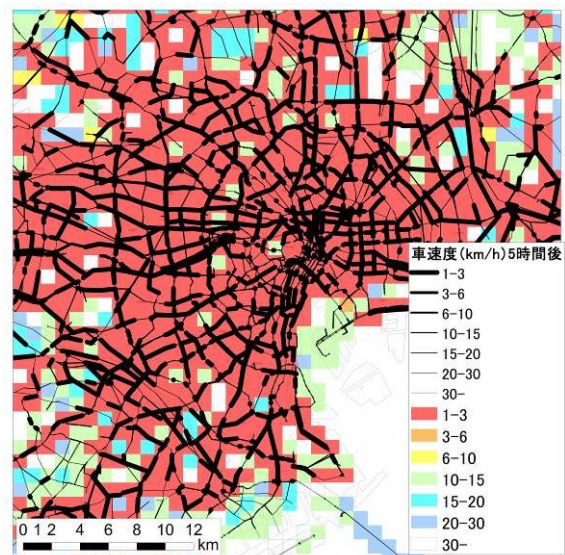


図13 ケース(2)における
車の平均移動速度(発災5時間後)

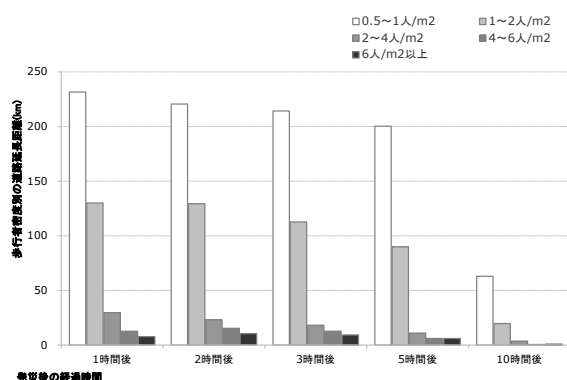
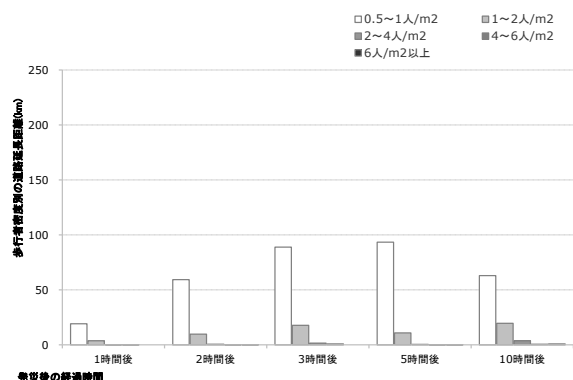


図 14 歩行者密度別の道路延長距離（ケース(1)） 図 15 歩行者密度別の道路延長距離（ケース(2)）

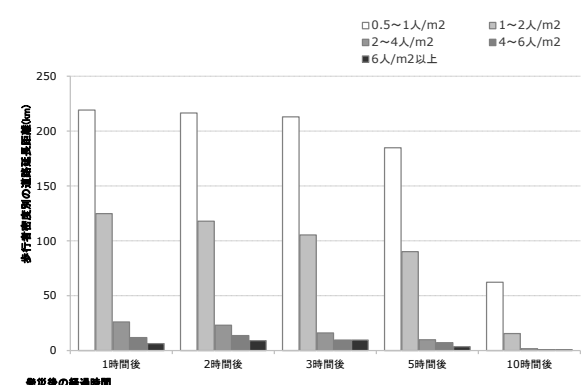
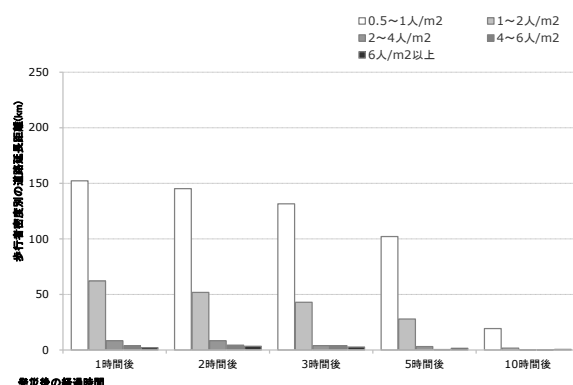


図 16 歩行者密度別の道路延長距離（ケース(3)） 図 17 歩行者密度別の道路延長距離（ケース(4)）

一方で、図 18～図 22 が自動車の平均移動速度をケースごとに示したものである（上り、下りを別個に計算して合計）。歩行者密度と同様に、大規模な災害のもとで一斉帰宅を許してしまった場合は、東日本大震災を超える車道の交通渋滞が発生する。とはいえ、その平均移動速度はおおむね 3km/h 未満と 10km/h 以上に 2 極化する傾向にあり、また東日本大震災時と同じく一度交通渋滞が発生するとその状況は長時間に及ぶ。例えばケース(1)に比べケース(2)では、平均移動速度が 3km/h 未満の大渋滞が発生する箇所が発災 1 時間後に道路延長距離で約 2.6 倍に至るが、発災 10 時間後までの平均を計算するとその道路延長距離は約 1.2 倍となる。つまり徒歩帰宅者の一斉帰宅は、時間経過後の車道の交通渋滞よりもむしろ、直後の交通渋滞に強い影響を及ぼし、特に初期段階の消火や救急の阻害要因となりうる事が判明した。一方で、ケース(2)からケース(4)を見る限り、就業者の徒歩帰宅抑制や私用外出者の徒歩帰宅抑制は、それぞれ半分が滞留に成功したとしても車道の交通渋滞を減らす効果はほぼないことがわかる（ただし、自動車の帰宅抑制はないものとしているほか、徒歩帰宅者の存在が自動車交通に与える影響が(1)、(2)式で示されるように移動速度の低減のみとしたうえでの計算結果であることに注意されたい）。帰宅困難者対策の主な目的は、1. 過密空間における歩行者・滞留者の人的被害軽減、及び 2. 深刻な交通渋滞による消防・救急など様々な災害対応の遅延解消であることは先述の通りであるが、各都市で現在精力的に行われている対策は、おおむね一斉徒歩帰宅の抑制や一時滞在施設の確保に偏っており（ただし東京都の帰宅困難者対策条例では帰宅手段にかかわらず、大規模地震直後における都民の一斉帰宅を禁じている）、車道における交通渋滞の解消はその多くを警察による交通規制に頼らざるを得ず、場合によっては後者の目的を達成できないことになる。それゆえ今後は、自動車による帰宅の抑制や自動車の滞留場所などの確保についても、さらなる対策の進捗を期待したい。ここでケース(2)とケース(5)を比較すると、全体の 3.3%ともいふべき自動車による迎え交通需要のみを抑制するだけで、平均移動速度の延長距離を東日本大震災当日以下に減らせることが明らかになった（ケース(5)における平均移動速度 3km/h 未満の道路延長は、発災 1 時間後こそケース(1)の 1.4 倍であるものの、発災後 10 時間の平均をとると

0.4 倍と半減する)。自動車による迎え交通需要の抑制はいまのところ、帰宅困難者対策として検討している例がほとんどないが、災害直後の活動障害を減じる意味でも、効果の高い施策であると考えられる。

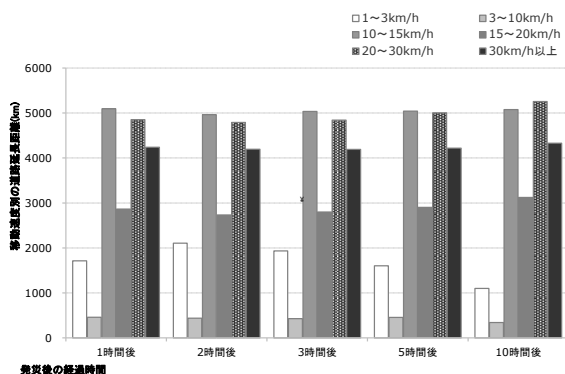
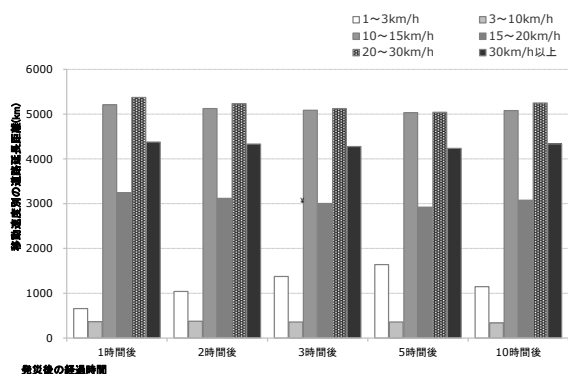


図 18 車の平均移動速度の延長距離（ケース(1)） 図 19 車の平均移動速度の延長距離（ケース(2)）

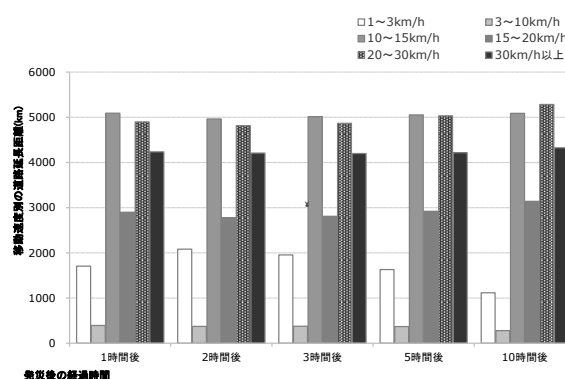
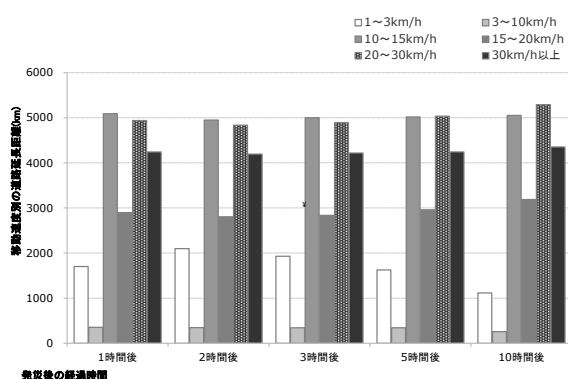


図 20 車の平均移動速度の延長距離（ケース(3)） 図 21 車の平均移動速度の延長距離（ケース(4)）

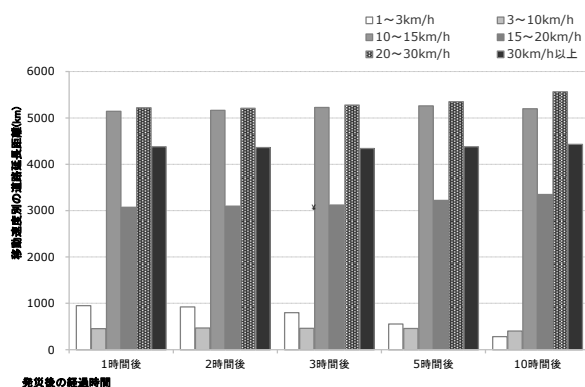


図 22 車の平均移動速度の延長距離（ケース(5)）

4. 混雑危険度の提案

本稿では最後に、上記の大都市避難シミュレーションを用いて混雑危険度の提案を行う。ここでは混雑危険度を「任意の地域で道路ネットワークの混雑が発生する程度」と定義する。道路ネットワークの混雑は様々な災害対応に影響を与えると同時に、歩道では群集なだれなどの原因ともなり、帰宅困難者対策の政策評価や避難危険度、災害対応のルート選択や交通規制のオペレーションなどの参考になるものと考えられる。ここでは、歩道・車道それぞれ4種類の混雑危険度を提案し、道路の破断がないが帰

宅困難者が一斉帰宅をしてしまうと仮定したケース（上記シミュレーションケース(2)）の具体例を示す。

混雑危険度を示す指標として、はじめに上記と同じく歩道は群集の密度、車道は旅行速度を用いる⁽³⁾。図 23 は 100m メッシュ内の歩道における群集密度の最大値を示したものであり、図 24 は同じく 100m メッシュ内の車道における平均移動速度の最小値を示したものである。この図によるとやはり中心部は群集密度が極めて高く、また広幅員道路の結節点においても同様の傾向が認められる。他方で車道については、歩道と比べてより広域に平均移動速度 3km 未満となる大規模な渋滞が発生し、災害対応が大幅に遅延する可能性が示唆される。また、これらを絶対評価ではなく相対評価として 5 段階（自然分類）で示したものが図 25 図 26 となる。

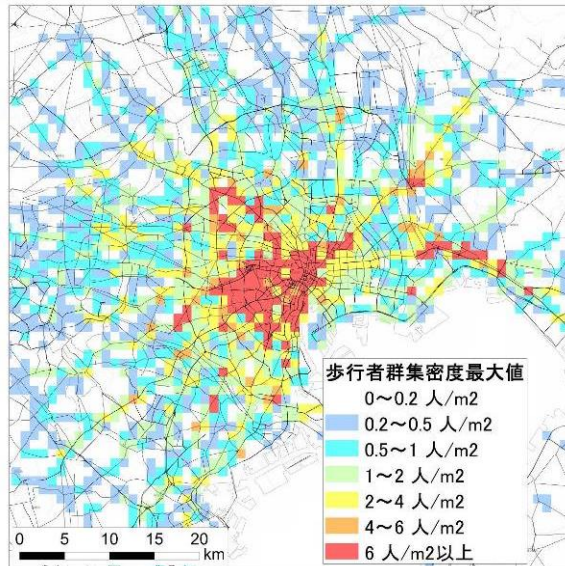


図 23 歩道の群集密度の最大値（絶対評価）

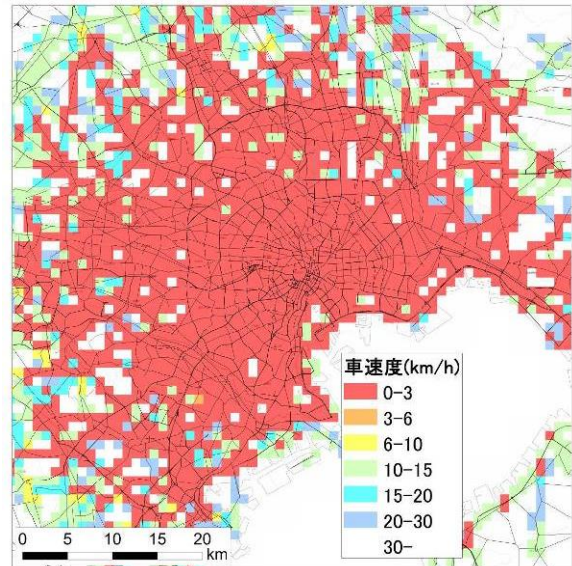


図 24 車道の平均移動速度の最小値（絶対評価）

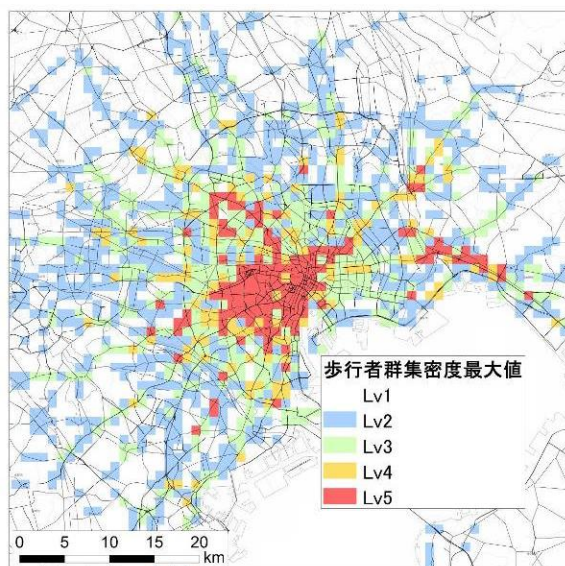


図 25 歩道の群集密度の最大値（相対評価）

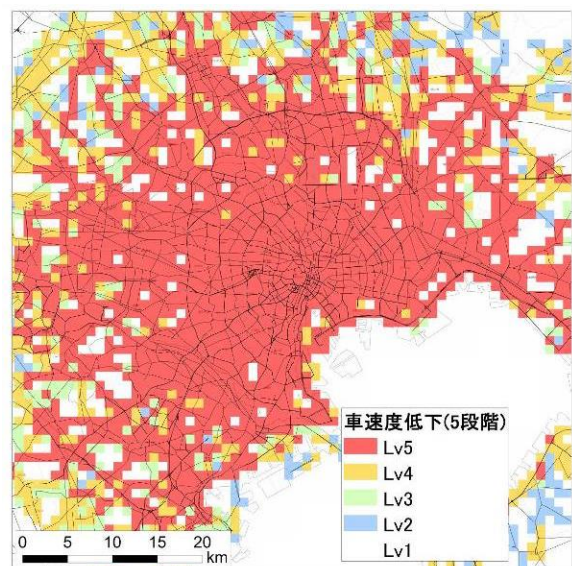


図 26 車道の平均移動速度の最小値（相対評価）

他方で混雑の影響をより詳しく知りたい場合、その混雑量のみならず、上記に示す最大の混雑が発生する時間帯も有益な情報になると考えられる。これは帰宅支援（直後に帰宅支援をする場合）のタイミングやその時間帯、一時滞在施設の分布や交通規制を行う際の参考になるであろう。これらを示したものが図 27 および図 28 である。図 27 は図 23 に示す最大の混雑が発生する時間（メッシュの色）と 1.5 人/m²以上の混雑密度となる総時間（ネットワークの太さ）を示しており、図 28 は図 24 に示す最小の平

均移動速度となる時間（メッシュの色）と平均移動速度が 5km/h 未満となる総時間（ネットワークの太さ）を示している。いずれもネットワークが太いほど混雑時間が長く、メッシュの色が白に近づくほど発災直後に混雑ははじまる。これより、歩道は混雑の継続時間が比較的短く、かつその分布は中心部に偏る。他方で、外周部は幹線道路沿いに発災 3～5 時間後以降に混雑のピークを迎える。これに比べ車道は混雑が広域的に分布し、最大混雑時間に到達するまで比較的短く、その継続時間も長い傾向にある。

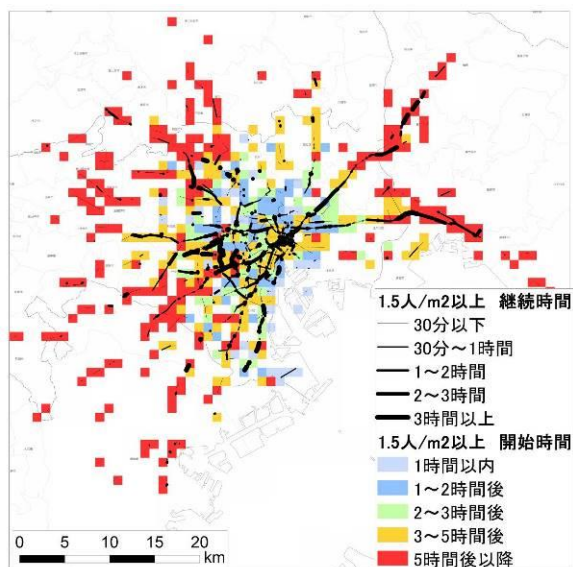


図 27 最大群集密度になる時間と総混雑時間

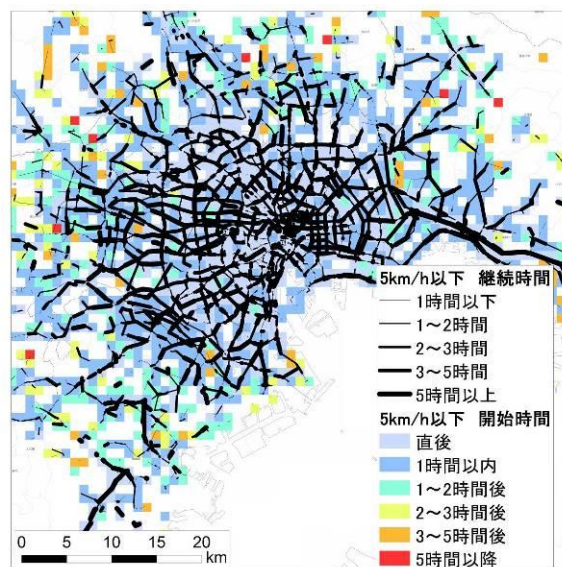


図 28 最小平均移動速度になる時間と総混雑時間

最後に、東日本大震災時と比べてどの程度の混雑が発生するかをマップ上で示したものが下図である。図 29 はケース(1)とケース(2)について、メッシュ内における歩道の群集密度の平均を比較することで、ケース(2)で仮に設定した条件の下で東日本大震災の何倍の混雑が発生するか示したものである。図 30 は同じくケース(1)とケース(2)について、メッシュ内における車道の移動速度の平均を比較することで東日本大震災よりどの程度遅い移動速度になるかを示したものである。ここでは、歩道で東日本大震災時の 3～5 倍以上となる高い群集密度が各所で発生していることが示された。他方で車道は、大都市中心部は東日本大震災と同様の混雑となるが、外周部で東日本大震災以上の低速となる地区も散見される。

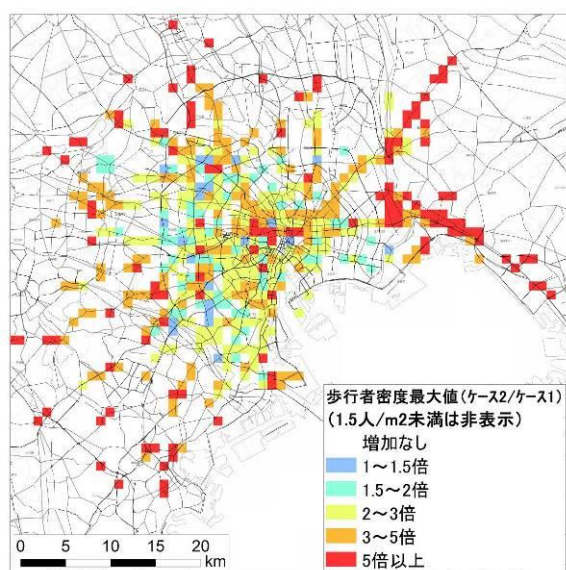


図 29 歩道の群集密度の比較

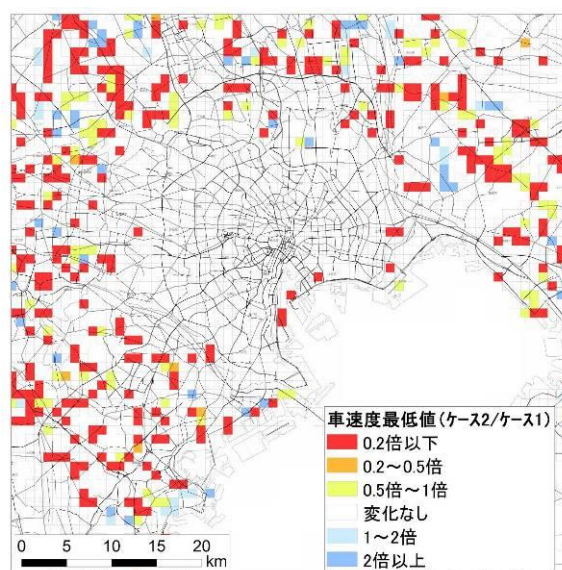


図 30 車道の平均移動速度の比較

5. おわりに

本研究は1都3県を対象とした大都市避難シミュレーションを構築し、帰宅困難者対策の政策評価を行うとともに、大都市における混雑の程度を示す混雑危険度の指標を提案した。この成果を用いることで、これまで量的な検証がなされてこなかったため達成目標も明確でなかった帰宅困難者対策が、はじめていくつかの計算条件の下で定量的に評価されるとともに、災害対応や群集なだれの危険性を広域レベルで容易に把握することが可能となった。さらには、このシミュレーションで得られた徒歩および車両の交通量をもとにすることで、これまでは局所的な範囲のみを対象として行っていた火災や津波からの避難シミュレーションをより実態に即したものとすることが可能となる。この点は、東京、名古屋、大阪など大都市における避難対策を評価するためには必須の作業といえよう。後者の検討については紙幅の都合上、本稿では割愛する。

注 釈

- (1) ただし本稿では、紙幅の関係から複合災害からの避難行動の記述は別文献に譲ることとする。このため、本稿で記述している限りにおいては帰宅行動のみであるものの、研究全体の枠組みを考慮して「大都市避難シミュレーション」と呼称している。
- (2) 小ゾーンでの昼間人口の割り当てをしていることにより、起点と終点の小ゾーンのペアが同一の場合に同一の経路が選択されることになり、起終点付近を代表として特定の道路が混雑する可能性が考えられる。しかしながら本シミュレーションは広域の帰宅関連行動を対象を絞っているため原則としてセンサス対象道路のみによる道路網を帰宅経路としており、この道路間隔は小ゾーン中心点の配置間隔と同程度であり大きなスケールの相違はない。また各エージェントも混雑時に迂回経路を再探索しルート変更することとしているため、他に空いている道路網があるにもかかわらず不自然に滞留することはないと考える。ただしこれを火災・津波からの避難行動など、細街路も対象とした地域内の移動も取り扱うよう複合災害避難シミュレーションに拡張する場合は、建物単位などより細かい避難者の初期配置や目的地の設定が求められると考える。
- (3) 混雑危険度を用いる指標は他にも様々なものが考えられるが、本研究では緊急車両の遅延等を想定しているため、ここでは仮に旅行速度を車道の混雑危険度として定義した。

謝 辞

本研究で用いた調査データは筆者と東京大学関谷直也特任准教授、株式会社サーベイリサーチセンターとの共同作業による社会調査の成果である。車道データの検証については、株式会社ナビタイムジャパンより提供いただいた東日本大震災時の区間別速度データを利用している。また本研究は科学研究費補助金若手研究(A)：複合災害を考慮した大都市における避難行動の再現とその計画・支援に関する研究（研究代表者：廣井悠）の助成を受けた。関係各位に深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 中央防災会議：首都直下地震避難対策等専門調査会報告、2008年。
- 2) 大佛俊泰、守澤貴幸：都市内滞留者・移動者の多様な状態と属性を考慮した大地震時における広域避難行動シミュレーションモデル、日本建築学会計画系論文集、76(660)、389-396、2011年。
- 3) 廣井悠、関谷直也、中島良太、藁谷俊太郎、花原英徳：東日本大震災における首都圏の帰宅困難者に関する社会調査、地域安全学会論文集、No.15、2011年、pp.343-353。
- 4) 東京都：「東京都等の帰宅困難者対策」、2011年、
http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/taisaku_syuto/kitaku/1/6.pdf (参照 2015-04-30)。
- 5) 廣井悠：帰宅困難者問題にみる大都市の課題、都市問題、東京市政調査会、No.103、2012年、pp.81-91。
- 6) 廣井悠、中野明安：これだけはやっておきたい帰宅困難者対策 Q&A、清文社、2013年。
- 7) 中林一樹：地震災害に起因する帰宅困難者の想定手法の検討、総合都市研究、47号、1992年、pp.35-75。

(受理：2015年 4月 30日)

(掲載決定：2016年 3月 20日)

Evacuation Simulation in Metropolitan Area and Risk Maps of Heavy Traffic and Crowd in Catastrophic Disaster

HIROI U ¹⁾, OOMORI Takaki ²⁾ and SHINKAI Hitoshi ³⁾

1) Member, Associate Professor, Nagoya University, Dr. Eng.

2) Professional Engineer, Nikken Sekkei Cilil Engineering LTD, Mr. Eng.

3) Engineer, Applied Technology Co., LTD, Mr. Eng.

ABSTRACT

In this paper, we built "Evacuation Simulation in Metropolitan Area" for the Tokyo Metropolitan Area. The simulation can evaluate policies for stranded commuters and provide several risk maps of heavy traffic in catastrophic disaster, using decision making model and movement data in the Tokyo Metropolitan Area on the Great East-Japan Earthquake. As a result, if catastrophic disaster occurs and everyone goes home all together in metropolitan area, we calculated that heavy traffic will overload the trunk lines for many hours in wide area and huge people(for example, six people in a square meter) along some sidewalks.

Keywords: Disaster in Metropolitan Area, Evacuation, Simulation, Stranded Commuters