



帰宅困難者の広域的移動が 避難行動に与える影響の定量的把握

—首都圏における大都市避難シミュレーションを用いた検討—

廣井 悠*

Quantitative Research of the Impact of Wide-area Movement of Stranded Commuters on Evacuation for Post-earthquake Fire

—A Case Study of Simulation of Evacuation Behavior
in Tokyo Metropolitan Area—

U HIROI*

Abstract— In this study, I combined a wide-area movement simulation after a great earthquake and a narrow-area simulation of urban fire evacuation behavior in the northern part of Sumida-ku, Tokyo. This method made it possible to quantify the impact of the wide-area movement of stranded commuters on their evacuation behavior from urban fires at post-earthquake.

Keywords— Stranded Commuters, Urban Fires, Simulation of Evacuation Behavior, Disasters in Megacities

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、わが国の三陸沿岸に甚大な津波被害をもたらしたが、首都圏では515万人とも言われる多数の帰宅困難者が発生し、駅や道路が混雑するなど大混乱を呈した。これほど大量の帰宅困難者が発生した事例は世界初であったことから、わが国の大都市ではこれ以降、東京や大阪をはじめとして精力的な帰宅困難者対策が進められることとなり、例えば東京都では2013年4月に帰宅困難者対策条例が施行

されるに至っている [1].

そもそも、帰宅困難者が発生する原因は単純明快である。一般に大都市においては、周辺のベッドタウンなどから鉄道を用いて日中に大量の人口が集中することが知られている。例えば第10回大都市交通センサス(2007) [2]によると、首都圏における1日の鉄道利用者数は約4,000万人とみられており、近畿圏の約1,300万人、中京圏の約300万人と比べてもその量は圧倒的に多く、日常的な鉄道利用者の通勤・通学における平均所要時間は約68分を数えるなど長距離移動となっている。つまり通勤・通学を主とする大都市圏の移動は鉄道に依存しており、また朝夕に集中しており、どのような理由であれ日中にひとたび鉄道が停止すれば大量の帰宅

*東京大学 東京都文京区本郷 7-3-1

*The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

Received: 25 July 2023.

困難者が発生することは避けられない。このように、帰宅困難者の発生原因は、ひとえに大規模交通システムに支えられた大都市の職住分布そのものにあるといっても過言ではなく、大都市に特有の課題であることは言うまでもない。以上より大都市であること、何らかの原因で長時間交通システムが途絶することの2点が帰宅困難者の発生条件となり、その蓋然性はそれなりに高いと考えられる。

それでは、この問題にわれわれはどのように対応すればよいのであろうか。このためには、帰宅困難者対策の意義を改めて確認する必要がある。結論から言えば、帰宅困難者対策そもそもの目的は、大都市・大震災・大混雑問題を解決しようとする点にある。東日本大震災における東京の最大震度は5強であったため、帰宅困難者問題を「帰るのが大変だった問題」と認識した人も多かった。しかしながら、東京や大阪などの大都市中心部において、より大きい震度7や震度6強などの揺れをもたらす地震が平日の昼間に発生すると、家族を心配してあるいは勤めている事業所が被災して物理的にとどまることができず、多くの滞留者がすぐに帰宅行動をとる可能性がある。また東日本大震災でもみられたように、大都市中心部で孤立している家族を車で迎えに行こうとすることも考えられる。このように大都市内の大部分の通勤者が一斉に帰宅したり、送迎目的の自動車交通需要が急激に増加することで、歩道や車道でこれまでにない過密空間や交通渋滞が生まれ、避難行動を阻害したり、群集事故が起きたり¹、車道の渋滞が救急活動や消防活動を阻害する²可能性も否定できない。つまり、揺れの強い条件下での帰宅困難問題は場合によっては「命に関わる問題」になる可能性があり、これらのリスクを減じようとするのが帰宅困難者対策の一義的な目標となる。

1. 実際、東京市人口がわずかに220万人であった1923年の関東大震災ですら、「橋の上に衝突して押潰され踏み倒され、橋より落ちて大河に沈むもあり、欄干に押し付けられて絶息するあり（東京市、相生橋）」、「橋上で避難を急ぐ人の流れの中、子供やお年寄りが圧死する悲劇もあった（横浜市、吉田橋）」と形容される群集事故の発生が記録されており、現代都市においてこのような被害が発生する可能性も否定できない。

2. また、同じく関東大震災時にわが国の東京市や横浜市で甚大な被害を記録した都市の地震火災リスクは、現代市街地においてもいまだ高いものと考えられる。これについては廣井(2023)[7]で詳しく述べているが、もし帰宅困難現象が深刻な交通渋滞をもたらす、これが消防車の活動を大きく阻害するとしたら、火災被害はより甚大なものになると考えられる。

このなかでも本研究は特に、帰宅困難者による広域的な移動が、市街地火災からの避難行動にどのような影響を与えるかについて、大都市における避難行動を評価する目的で作成された大都市混雑シミュレーションを用い、墨田区を対象としたケーススタディを行うことでその影響を定量的に把握することを目的とする。

2. 大都市避難シミュレーションの概要

上記のようにここでは、帰宅困難者の広域的な移動が市街地火災からの避難行動に与える影響を定量的に把握する。このため、広域的な帰宅困難現象と市街地火災からの地区単位の避難行動を扱うべく、首都圏スケールの広域シミュレーションと地域単位の狭域シミュレーションを別個に構築し、両者を入れ子構造的に関連付けることでマルチハザードからの避難行動の評価を可能とした。

詳細は廣井ら(2016)[3]に詳しいが、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。なかでも前者の広域シミュレーションは、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ものである[4]。ここで用いた道路は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³であり、歩道幅はセンサスの歩道幅データを使用している。そして、道路交通センサス対象外の歩道幅については片側1m×両側としている。

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た。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

3. 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。

の横断やは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(2008)[5]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性を参考に、車両密度を ρ_{car} (台/km)、移動速度を V (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。

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

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。

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

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。

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(2011)[6]が2011年3月下旬に行った首都圏の帰宅困難者に対する大規模社会調査のデータをもとに帰宅行動をモ

デル化している。詳細は、こちらも廣井ら(2016)[3]に詳しく示しているが、ここで得られた約2000人のトリップデータを用いて帰宅意思モデルを作成し、東日本大震災時の帰宅状況を再現しようとしている。また、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⁴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)としている。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。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ている。つまり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、上述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、その後行われた内閣府・東京都による調査で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。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)。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ていないが、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。

4. PT調査は、都市における人の移動を調べるもので、「どのような人が、どのような目的で、どこからどこへ、どのような時間帯に、どのような交通手段で」移動するのかを把握することができる。

Table 1: Characteristics and Results of Simulation Cases⁵.

	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
1m ² 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

3. 広域シミュレーションを用いた帰宅困難者対策の政策評価

上記のように構築された広域シミュレーションを用いることで、帰宅困難者対策の政策評価が可能となる。その結果を Table 1 に示した。ケース (1) は東日本大震災を再現した結果である。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が、ここでは帰宅開始時間分布を東日本大震災時と同様とし、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シミュレーションを行っている。この結果を見ると、東日本大震災当日は車道の平均移動速度はやや深刻なもの、負傷者の数が少なかったこともあり、歩道・車道ともに人的被害に繋がりをうる過密空間及び交通渋滞とはなっていない。

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）。このように、滞留者がより家族を心配し、また物理的に滞留できる空間がないなどで仮に一斉帰宅を許してしまった場合には、6人/m²以上の過密空間および時速 3km 未満の渋滞区間が

随所で発生する。この数値を単純比較するだけでも、東日本大震災時と一斉帰宅がなされるような大都市大震災時は、全く異なる状況であることがお分かりいただけるであろう。

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。またケース (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。つまり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みてよい。結果として、例えばケース (3) の計算例からは、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、6人/m²以上となる過密空間はケース (2) の 1/4 程度に減じることがわかった。帰宅困難者対策として就業者の一斉帰宅抑制は過密空間の発生を抑制する効果的な手段であることが量的にも検証されたことになる。他方でケース (4) の結果からは、少なくとも歩道における過密空間の発生抑制という点においては、私用外出者の帰宅抑制効果はそこまで効果的ではないという評価ができる⁶。

5. ここでは結果として、歩道における過密空間の平均道路延長（発災 1 時間後の数値を計上）と、車道における渋滞が発生する道路延長（1～10 時間後の平均値）を示している。ただし道路の破断や交通規制は考慮しないなどの強い仮定をおいた計算例であることに注意されたい。

6. ここではこのような結果となったが、一時滞在施設を確保して買い物客などの帰宅抑制を推奨することで、行き場のない帰宅困難者が

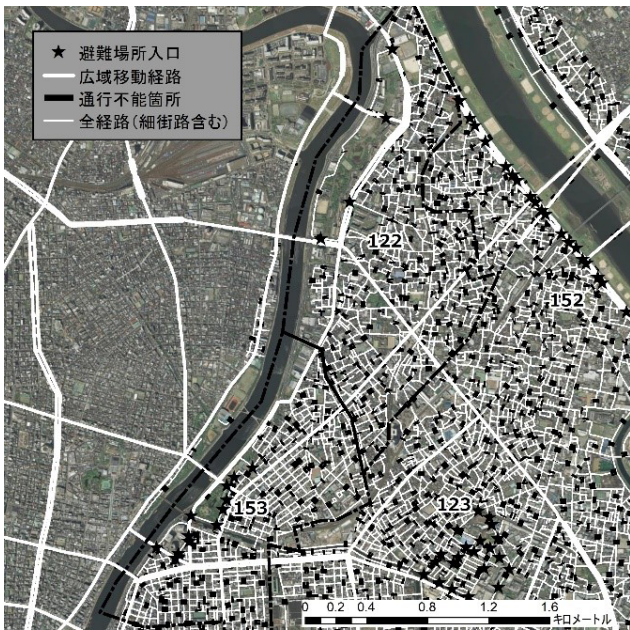


Fig. 1: Targeted areas and impassable points (northern part of Sumida-ku, Tokyo).

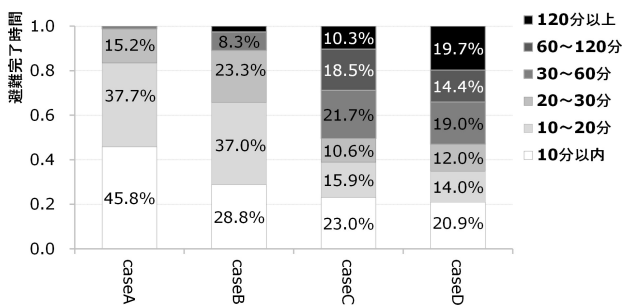


Fig. 2: Clearance time for evacuation in each case.

さて、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ものとした。この結果からは、東日本大震災時に全体の3.3%であった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3km/h未達の道路延長距離を、ケース(2)の1/3程度に減ら

安心してその場にとどまることが可能となり、またその状況を家族で共有することで自動車の迎え需要を減らし、車道における交通渋滞を抑制させることができる可能性もある。ただ、本研究で構築したシミュレーションでは、そのような効果を量的に把握することはできず、これは今後の研究課題となる。

せることも明らかになった。自動車による迎え交通需要の抑制は今のところ、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、災害直後における救急・消防活動の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。

これらの計算結果が示すように、通勤者自身あるいは事業所が「帰らない」「迎えに行かない」という対策を講じることで、帰宅困難者の一斉帰宅抑制や自動車による移動需要の抑制が実現し、このような間接被害の拡大を防ぐことができる。東日本大震災をきっかけとして世の中に広まった帰宅困難者という言葉や概念であるが、東日本大震災当時のイメージに引きずられてしまいすぎると、その本質を見誤る危険性がある。

4. 市街地火災避難との重ね合わせ

続いて、上記のように狭域シミュレーションと呼んだ、市街地火災からの避難シミュレーションを構築する。ここでは延焼危険性の高い墨田区北部を対象に、対象地域内の平日昼間での滞在者(PT調査により算出し、総計4.5万人)が各建物から指定広域避難場所へ移動するようシミュレーションを設定し、広域シミュレーションで対象とした幹線道路のみならず、細街路(歩行者通行幅は4mとし、車は通行しないものとする)も避難行動に用いることとした(Fig. 1)。このもとで、上記ケース(2)に従って帰宅困難者が一斉帰宅するものとし、道路閉塞する場合は閉塞確率を細街路に限り1リンクあたり5%と設定し、様々なケースの下で避難完了時間分布を計算した結果がFig. 2である。Case Aは混雑の影響がなく、かつ道路が閉塞しない場合である。このケースは平常時に避難場所へ任意の住民が建物から移動することを想定したもので、この状況下では99%以上が30分以内に避難を完了することができる。Case Bは混雑を考慮しないが道路閉塞があるパターンを示したものである。ここでは、Case Aと比べてやや避難完了時間が遅くなるが、それでも97%以上が一時間以内での避難が可能となる。Case Cは、道路閉塞したうえで、震災直後に地域住民全員が避難を開始するケースである。この状況下では、30分以内に避

難を完了できる人が49.5%であり、1時間以内は71.2%、2時間以内でも89.7%しか避難場所に到達できない。Case Dは、道路閉塞したうえで、震災から2時間後に地域住民全員が避難を開始するケースである。ここでは震災直後に帰宅困難者が一斉帰宅するものとしているため、帰宅困難者の移動と市街地火災からの避難者が錯綜して大混雑を起こすケースを検証するもので、30分以内に避難を完了できる人は46.9%、1時間以内は65.9%、2時間以内でも80.3%しか避難場所に到達できない。すなわち細街路の閉塞はもちろん、帰宅困難者の一斉帰宅が地域の避難行動を阻害することがシミュレーション上でも再現されたことになる。本研究は市街地火災からの避難を念頭に置いたが、津波避難においてもこの傾向は同様であると考えられ、大都市内で迅速な避難を実現するためには、帰宅困難者による混雑発生も踏まえた避難開始時間の設定や、避難計画からみた一斉帰宅抑制の効果検証など、大都市特有の避難計画の策定技術が必要と考えられる。

5. まとめ

本研究では1都3県を対象とした広域的な移動シミュレーションと墨田区北部を対象とした狭域の市街地火災避難シミュレーションを組み合わせ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、帰宅困難者の広域的移動が避難行動に与える影響を定量的に把握した。この成果を用いることで、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り、また災害時における移動に関する計画や方針を適切に評価すること

が可能となる。ただし、本研究で構築したシミュレーションは強い仮定を置いて計算したもので課題も多いため、今後の改善が必須と考えられる。

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。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] 東京都:帰宅困難者対策条例, 東京都公報, pp. 22-24, 2012.03.
- [2] 国土交通省:大都市交通センサス首都圏報告書, 2007.
- [3] 廣井 悠, 大森高樹, 新海 仁: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, 日本地震工学会論文集, Vol. 16, No. 5, pp. 111-126, 2016.04.
- [4] 大佛俊泰:大地震時における都市内滞留者の帰宅意思と帰宅行動, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 73, No. 634, pp. 2679-2687, 2008.
- [5] 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.
- [6] 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, pp. 343-353, 2011.
- [7] 廣井 悠:関東地震の火災被害に関する教訓とそれから100年後の現代都市に与える示唆, 地震予知総合研究振興会, 地震ジャーナル, Vol. 75, pp. 43-52, 2023.

廣井 悠



東京大学・教授。1978年10月東京都文京区生まれ。東京大学大学院工学系研究科・特任助教、名古屋大学減災連携研究センター・准教授等を経て2021年8月より現職。博士(工学)、専門は都市防災、都市計画。平成28年度東京大学卓越研究員、JST さきがけ研究員(兼任)。主な受賞に、令和5年度文部科学大臣表彰・科学技術賞、平成24年度文部科学大臣表彰・若手科学者賞、都市住宅学会・学会賞など。