

都市防災研究論文集

Annual Journal of Urban Disaster Reduction Research

第4卷

2017年11月



大阪市立大学都市防災教育研究センター

Osaka City University
Center of Education and Research for Disaster Management

大地震時を想定した大阪市からの 一斉徒步帰宅シミュレーション

川岸 裕¹⁾・瀧澤 重志²⁾

1) 大阪市立大学大学院 工学研究科 e-mail: m17td008@jr.osaka-cu.ac.jp

2) 大阪市立大学大学院 工学研究科 e-mail: takizawa@arch.eng.osaka-cu.ac.jp

南海トラフに起因する大地震が発生した場合、大阪湾沿岸地域では津波の浸水が予想されており、大阪市は通常の帰宅困難者問題に加えて、帰宅・避難するための猶予時間が限られるリスクを抱えている。この問題に対する基礎的知見を得るために、本研究では大阪市全域を対象として、大規模な徒步帰宅行動モデルを開発して歩行者シミュレーションを実施し、特に淀川の橋の通行止めの有無による、帰宅時間や混雑状況の比較を行う。

Keywords: 帰宅困難者、徒步帰宅、南海トラフ、大阪市、1次元歩行者モデル

1. 研究背景と目的

大地震の際には都市部では大量の帰宅困難者が発生し、大きな混乱を招く。帰宅困難者が一斉に帰宅すると、車だけでなく歩行者レベルの移動でも、平常時は考えられない大混雑が発生しうることを、廣井らは東京を対象とした大規模なシミュレーションを実施して明らかにした¹⁾。一方、南海トラフに起因する大地震が発生した場合、大阪湾の沿岸地域では、図1のような津波の浸水域が予想されている。地震発生後、津波は約1時間50分程度で淀川まで到達し、大阪市の中心部である梅田地区も浸水することが予想されている。したがって、大阪市は通常の帰宅困難者問題に加え、帰宅・避難するための猶予時間が限られるという深刻なリスクを抱えている。大阪市は帰宅困難者対策を策定・公開²⁾しており、発災時にいる施設に留まることを基本的な帰宅困難者対策としている。一方、本対策は、津波の浸水からの逃げ遅れのリスクとのリンクが不十分であり、実行性や予想浸水域にいる人々への対応までは十分に考慮されているとはいひ難い。

この問題に対する基礎的知見を得るために、本研究では大阪市全域を対象として、大規模な徒步帰宅行動モデルを開発して歩行者シミュレーションを実施し、特に、津波の遡上が懸念される淀川の橋の通行止めの有無による混雑状況に着目した分析を行う。

2. 帰宅行動シミュレーションモデルの作成

本研究では、都市における滞在者の多い平日の昼間に地震が発生し、一部の帰宅困難者が徒步で一斉に帰宅するというシナリオで大規模な帰宅行動シミュレーションを実施する。シミュレーションモデルは、滞在者の分布の推定、滞在場所からの帰宅距離に応じた帰宅意思決定、そして、帰宅者の徒步帰宅の様子を再現した歩行者シミュレーションで構成される。以下に順

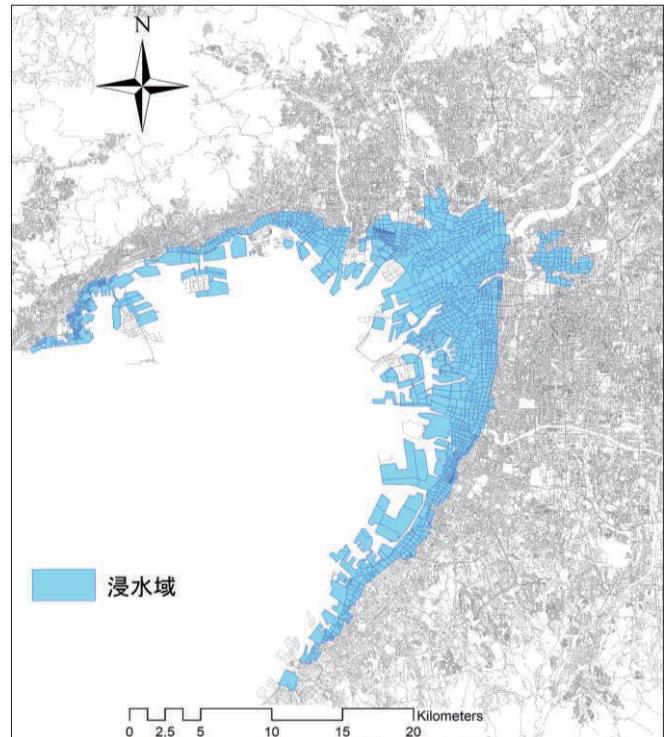


図1 南海トラフに起因する津波による浸水が予想される小地域（大阪府³⁾と兵庫県⁴⁾による浸水予想図を基に作成）

にそれについて説明する。

2.1 大阪市内滞在者の分布

シミュレーションを実施する前準備として、市内滞在者の昼間の空間分布を推定する必要がある。そのためにモバイル空間統計⁵⁾（2015年4月平日14時台）を用いて、図2のように大阪市内の平日14時台の滞在者を推定した。モバイル空間統計は、15歳から79歳までが推定対象であることと、移動中か施設に滞在中かを区別しない点に注意する。この時間帯の滞在者数は約270万人である。このデータは4次メッシュレベル

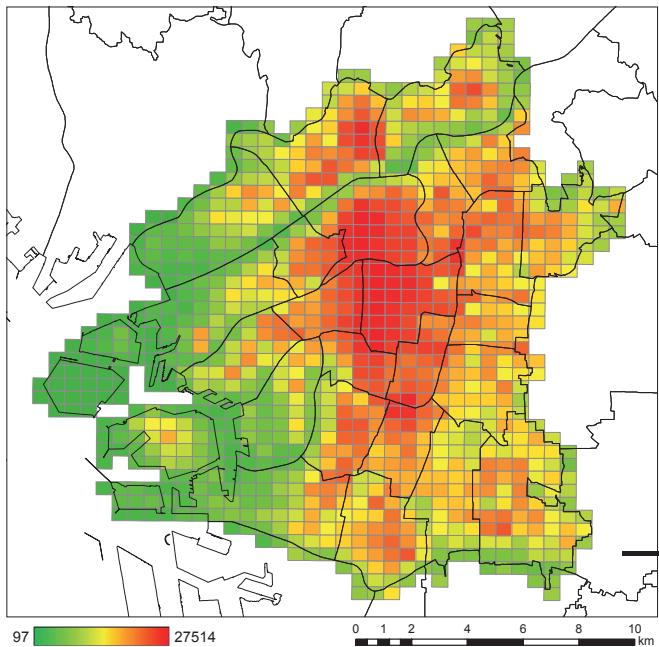


図2 大阪市内の平日14時における滞在者の分布

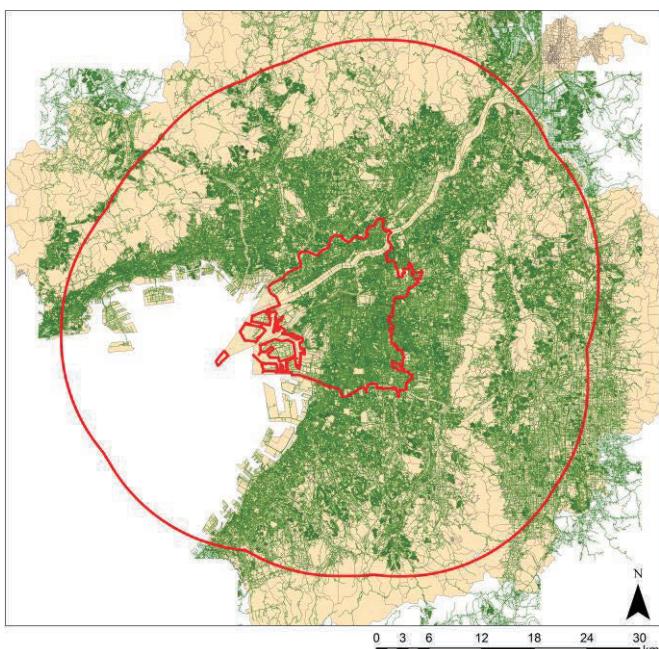


図3 対象とする道路ネットワークと大字ポリゴン（赤線は大阪市境界とその周囲20kmバッファ）

表1 大阪市内の平日14時における滞在者の居住地別人口
(大阪府とその近隣府県のみ)

大阪府	京都府	奈良県	兵庫県	計
2,579,052	54,815	81,646	241,138	2,956,651

での人口集計量であり、メッシュごとに都道府県レベルから大字レベルまで3段階の居住地別人口が存在する。しかし、スケールが詳細になるほど秘匿化処理で欠損データが増えるため、本研究では欠損した市区町村レベルの居住地人口を府レベルの人口に合わせて、

混合整数計画法⁶⁾を用いて推定した。その結果、表1に示すような近隣県の居住地別人口となった。この表から、大阪府以外では、兵庫県からの来訪者が多いことがわかる。これらの居住地別の人口から自宅外出者として、市区町村レベルで人口を抽出した。抽出した結果、滞在者の人口は2,696,546人となった。

2.2 帰宅経路の作成

次に、滞在者一人ごとに、滞在するメッシュと居住地の字ポリゴン内に含まれる道路ノードをランダムに1ペア選択し、OD(起終点)データを作成する。道路ネットワークのデータには、拡張版全国デジタル道路地図データベース2015年版⁷⁾を用いた。今回は、大阪市とその20kmバッファの範囲内の高速道路を除く全道路を計算対象とした。これは、815,739本のエッジと621,670点のノードで構成される、大規模な道路ネットワークである(図3)。そして、各滞在者に関して帰宅経路を最短経路とみなしてダイクストラ法で求め、帰宅経路と距離を求める。なお、本研究では、全ての橋が通行可能なものとみなして最短経路を計算している。

E を市内滞在者の集合とし、滞在者 $e \in E$ のODの最短経路の距離を $d_e(\text{km})$ とする。次に、中央防災会議の帰宅困難者数推定の考え方⁸⁾をもとに、式(1)で滞在者が外出先から自宅に帰宅する確率 P_e を求める。

$$P_e = \begin{cases} 1, & \text{if } d_e < 10\text{km}, \\ (20 - d_e)/10, & \text{if } 10 \leq d_e < 20\text{km}, \\ 0, & \text{if } d_e \geq 20\text{km}. \end{cases} \quad (1)$$

ただし、本研究では津波の浸水を考慮し、D(終点すなわち自宅近辺のノード)が浸水範囲内にある滞在者に関しては、帰宅距離にかかわらず、帰宅を断念するものとした。そして、区間が0から1の一様分布乱数を用いて、各滞在者について式(1)に基づいて帰宅するかどうかを計算したところ、2,696,546人の滞在者のうち、近距離徒歩帰宅者が1,210,004人、遠距離徒歩帰宅者が239,500人、近/遠距離徒歩帰宅者を合わせた帰宅者が1,449,504人であると推定された。また、各ノードに対して、それらをODとする帰宅者がどの程度存在するのかを図4,5に示す。図4をみると、500人以上の帰宅者が始点としているノードが大阪市の中心部に集中している傾向にあり、図5より、それが市外に向けて分散していることがわかる。これらのことから、多くの帰宅者が大阪市の中心部から周辺地域及び郊外に向けて帰宅していくことがわかる。大阪市のノードを終点とする帰宅者が比較的多いことから、徒歩一斉帰宅をすると大阪市の道路において混雑が発生しやすいと考えられる。

2.3 歩行者シミュレーションモデル

前節までに求めた約145万人の帰宅者一人一人に対して、歩行者シミュレーションを実施する。本研究で

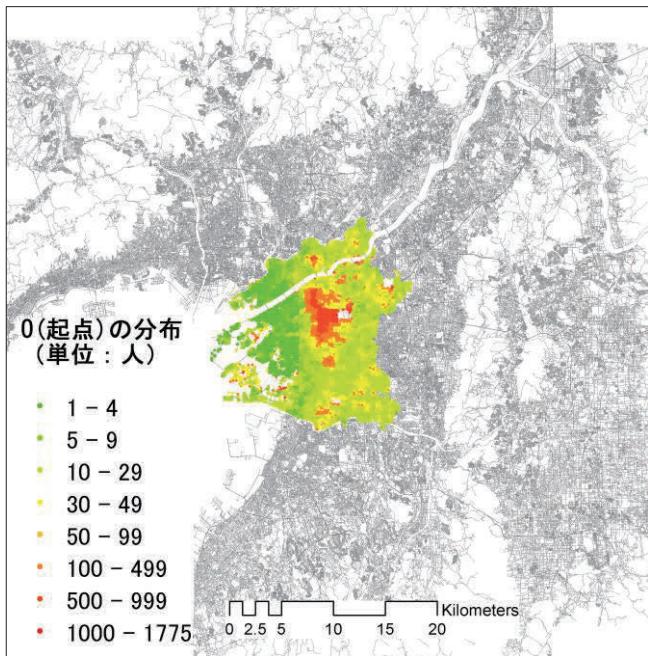


図4 起点0 (origin) の分布

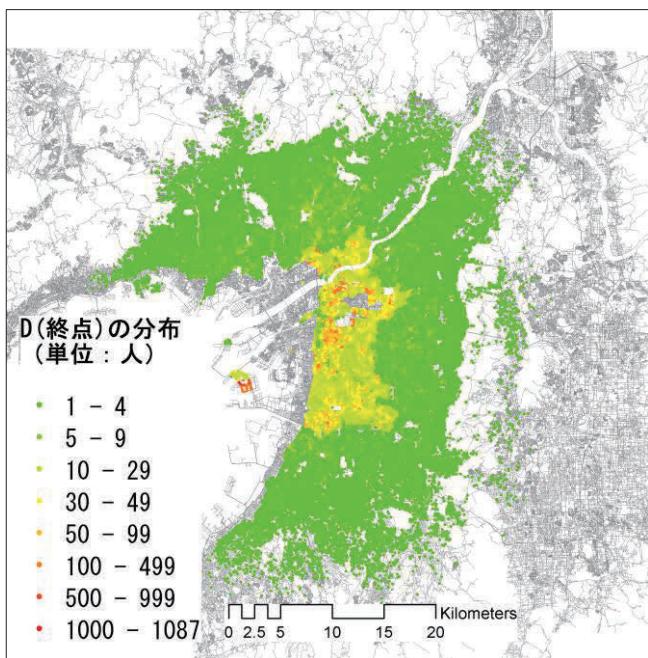


図5 終点D (destination) の分布

は、Social Force Model⁹⁾に基づきながら、空間を一次元で表現して計算効率を高めた1次元歩行者モデル¹⁰⁾を実装して用いる。Social Force Modelとは、歩行者同士の影響によって歩行者が受けける仮想的な力により、歩行速度を算出するモデルである。通常のSocial Force Modelでは、2次元のユークリッド平面上で、周囲の人や障害物により、次の進むべき方向と速度を決定するが、計算量が大きく大規模な空間での適用が難しいため、それを単純化してネットワーク空間で適用できるようにしたのが、1次元歩行者モデルである。

一次元歩行者モデルの速度式は式(2)で表される¹⁰⁾。

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t + \Delta t) &= \dot{x}_i(t) \\ &+ \left\{ a_1(v_o - \dot{x}_i(t)) \right. \\ &\quad \left. - a_2 \exp\left(\frac{r - \Delta x}{a_3}\right) \right\} \Delta t \end{aligned} \quad (2)$$

上式において、 t は時刻(s)、 $\dot{x}_i(t)$ は t における各レーン上の先頭から i 番目の歩行者の歩行速度(m/s)、 Δx は直前の歩行者との距離(m)、 Δt はシミュレーションステップ(s)である。 $x_i(t)$ は、歩行者 i が存在するレーン上の時刻 t における始点ノードからの距離、 r は歩行者半径(m)、 v_o は自由歩行速度(m/s)、 a_1, a_2, a_3 は歩行実験等の結果からキャリブレーションすることで求められるパラメータである。この式から時刻 $t + \Delta t$ における速度を求めて、位置を更新する。

更に、現実では起こりえないような極度の混雑を避けるために、中央防災会議における帰宅行動シミュレーション⁸⁾を参考にして、歩行者密度が6.0人/m²以上となるレーンには、それ以上歩行者が進入できないものとする。

このモデルでは人々が歩行の際に形成する列をレーンで表現するが、レーン幅を歩行者の幅とすると、レーンを形成できる数（以下、レーン数と呼ぶ。）はエッジの歩道幅によって決まる。本研究では、道路上は自動車で混雑し、歩行者は歩道やそれに準ずるだけの通路幅内を移動すると仮定し、各エッジ内の歩道とみなせる幅からレーン数を決定する。なお、本研究では道路の両端に歩道が双方向に存在すると仮定している。実際の歩道幅を用いるのが再現性の観点で最も望ましいが、対象とする大規模な道路ネットワークの歩道幅の詳細な情報を得ることは難しい。そこで、前述した大阪市内のGISの道路データのエッジを、道路種別毎に数十本ランダムサンプリングし、抽出された道路の歩道幅をGoogle Mapsの距離計測ツールを用いて計測した。そしてそれらの平均値を道路種別ごとの歩道幅とした。最終的に、1レーン当たりの幅を約75cmと仮定して、表2に示すようにレーン数を算出した。

表2 道路種別ごとの歩道幅とレーン数

道路の種類	歩道幅(m)	レーン数
一般国道	4.5	6
一般都道府県道等	4.8	6
主要地方道（指定市道）	6.4	8
主要地方道（都道府県道）	3.5	4
指定市の一般市道	5.1	6
その他の道路	1.5	2

3. 徒歩帰宅シミュレーション

提案したモデルを用いて、大阪市からの帰宅行動シミュレーションを実施する。本章では、まずシミュレ

ーションを実施するにあたっての条件設定を説明し、次に結果を示す。

3.1 条件設定

歩行者シミュレーションは $\Delta t = 1\text{s}$ として計算する。式(2)のパラメータの値は、既往研究¹⁰⁾と同じ $v_0 = 1.023\text{m/s}$, $r = 0.522\text{m}$, $a_1 = 0.962$, $a_2 = 0.869$, $a_3 = 0.214$ としている。この自由歩行速度は、文献¹¹⁾で仮定されている自由歩行速度 0.74m/s よりも速いが、1次元歩行者モデルは、自由歩行速度も含めて複数のパラメータをもっており、自由歩行速度を変えると、他のパラメータのキャリブレーションが必要になるため、今回はオリジナルの自由歩行速度を仮定している。

シミュレーションは、浸水範囲内の淀川に架かる5本の橋梁が地震に起因する破損や津波によって通行止めになることを想定するかどうかと、1次元歩行者モデルにより混雑現象を再現するか、再現なしの場合は、単に最短経路を混雑現象なしに自由歩行速度で定速で歩行するかという二つの条件を与え、それらの組合せとして、表3に示した四つのケースについて実施する。なお、橋梁の通行止めはシミュレーションの期間中、継続するものとする。

表3 シミュレーションのケース

ケース	淀川に架かる橋梁の通行止めの有無	混雑現象の有無
ケース 1a	無	無
ケース 1b	無	有
ケース 2a	有	無
ケース 2b	有	有

3.2 結果

以上のケースについて、シミュレーションを行い、混雑の発生する時間帯、継続時間、混雑の大きさなどを以下にまとめる。

3.2.1 平均帰宅距離の比較

橋梁の通行止めの影響を確認するために、帰宅者の平均帰宅距離を可視化する。図6、図7に、それぞれのケースにおいて、終点ノードから見た帰宅者の平均帰宅距離の分布を示す。ケース1a, 1bの分布を見ると、当然ではあるが、中心部から郊外に離れるほど帰宅距離が大きくなっていることがわかる。次に、ケース2a, 2bの分布を見ると、ケース1a, 1bと大きく異なる点がある。それは、兵庫県の芦屋市と西宮市付近のノードに、帰宅距離が20km以上となるノードが発生していることである。これは、淀川より南の地域を出発し、それらを通過して帰宅する帰宅者の経路が浸水域に含まれる橋梁の通行止めによって変化し、帰宅距離が増加したことが原因である。なお本研究では前述したように、帰宅意思決定時の最短経路の計算では、全ての橋梁が通行可能と仮定しているため、20km以上歩行する

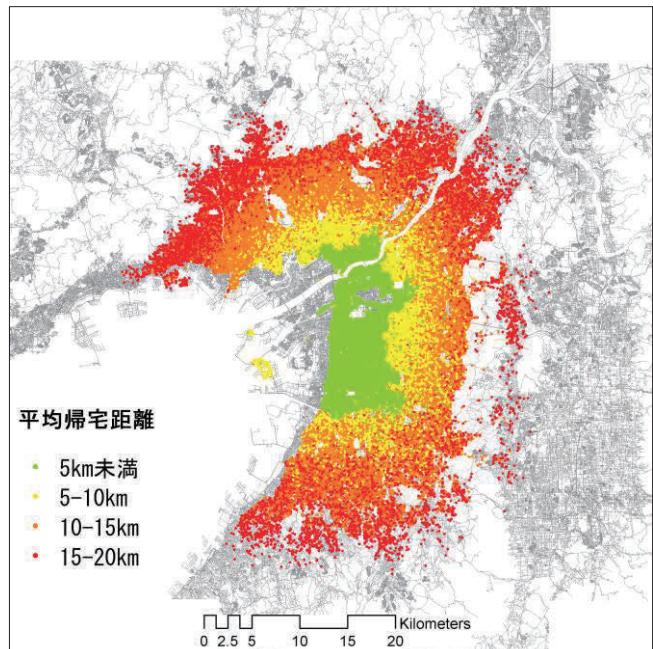


図6 平均帰宅距離（ケース1a, 1b）

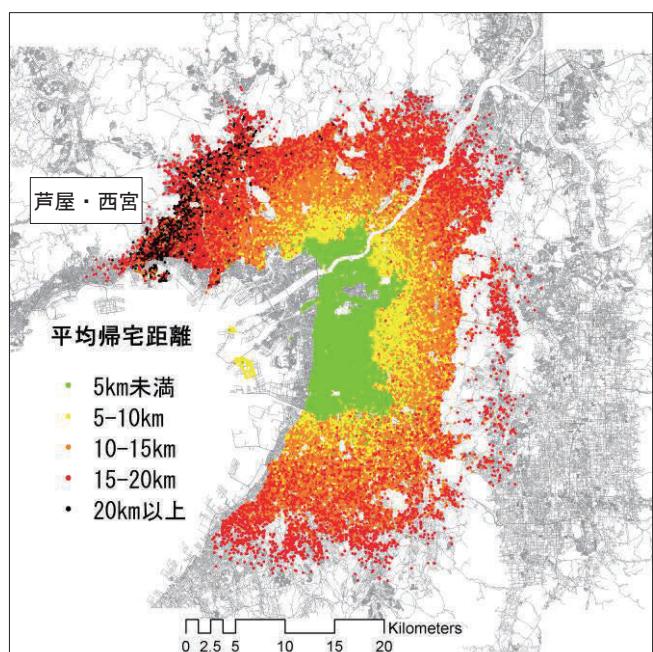


図7 平均帰宅距離（ケース2a, 2b）

帰宅者が出てくる場合がある。

3.2.2 平均帰宅完了時間の比較

帰宅者が徒步一斉帰宅の混雑の影響を受けることによって帰宅完了時間がどのように変化するのかを検討するために、帰宅者が常に自由歩行速度で帰宅経路を歩行して帰宅した場合と、1次元歩行者モデルによる渋滞を考慮した場合の、終点ノード側の平均帰宅完了時間の分布を、図8～図11に示す。

渋滞を考慮しないケース1a, 2aでは大阪市から郊外に行くにしたがって、帰宅完了時間が単調に増加する傾向にある。図6、図7に示した平均帰宅距離と同様の分

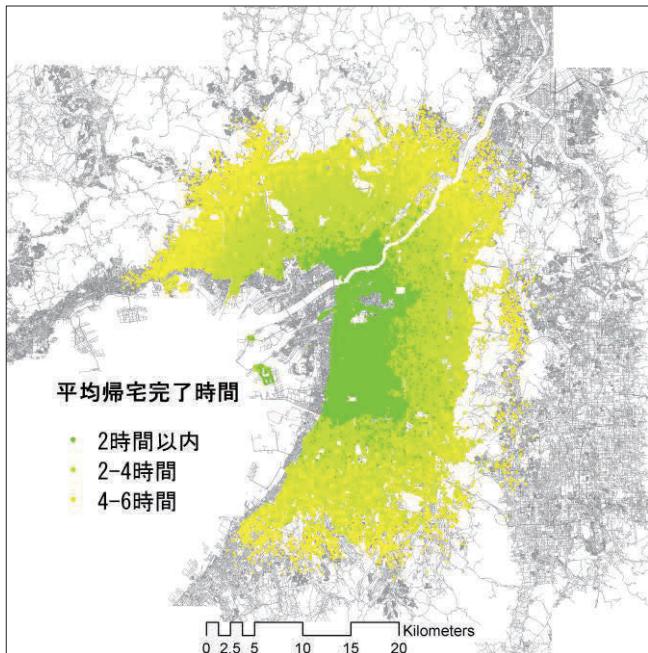


図8 平均帰宅完了時間（ケース 1a）

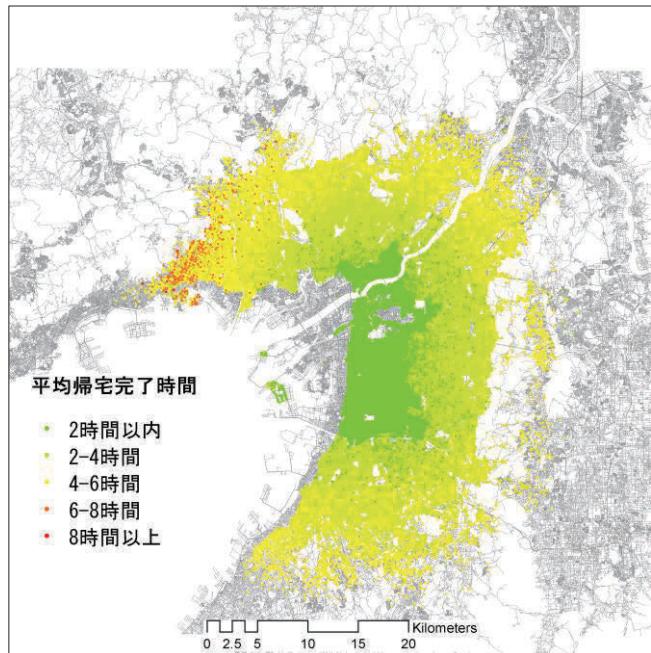


図10 平均帰宅完了時間（ケース 2a）

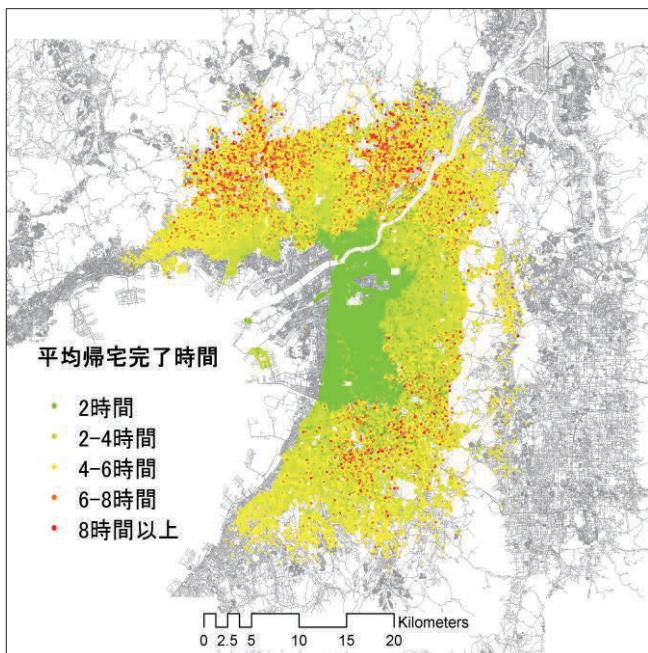


図9 平均帰宅完了時間（ケース 1b）

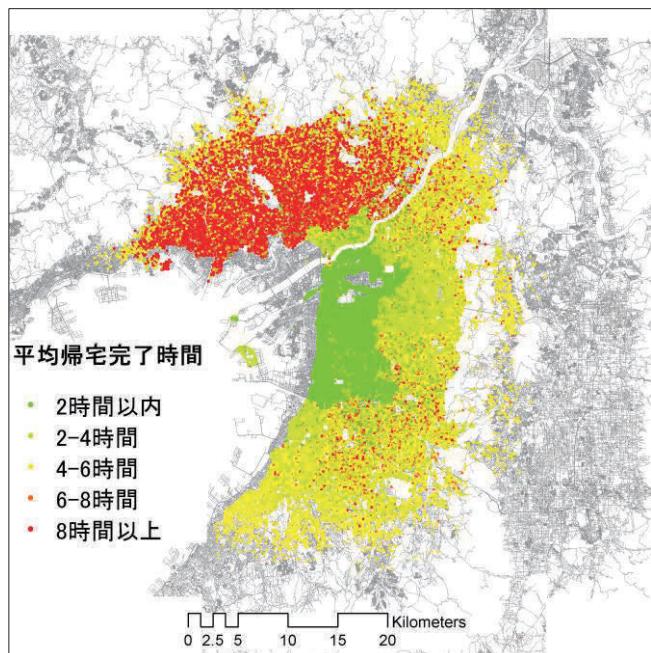


図11 平均帰宅完了時間（ケース 2b）

布になっていることから、混雑がなければ帰宅距離に応じて帰宅完了時間が増加することがわかる。次に、混雑を考慮したケース 1b, 2b での分布を見ると、大阪市内に帰宅する帰宅者の分布に大きな変化は見られないが、郊外において 6~8 時間及び 8 時間以上のノードが増加するなど、混雑の影響が大きく出ていることがわかる。特に、ケース 2b に関しては淀川以北の地域に帰宅する帰宅者の混雑の影響が大きくなっている。

3.2.3 混雑継続時間の比較

各道路上で混雑がどの程度生じうるのかを知ることは、2次災害の危険性や帰宅者の帰宅完了時間への影響を把握するために必要である。そこで、本節では、津波の浸水が懸念される中津近辺の淀川にかかる橋梁に着目し、混雑が継続する時間を把握する。本研究の混雑の定義は、各エッジにおいて、大部分の歩行者が自由歩行速度で歩行することが困難となるといわれている 0.7 人/m²以上の歩行者密度¹²⁾に達することを定め、それが継続する時間を可視化することで混雑継続時間



図12 橋梁付近における混雑継続時間（ケース1b）

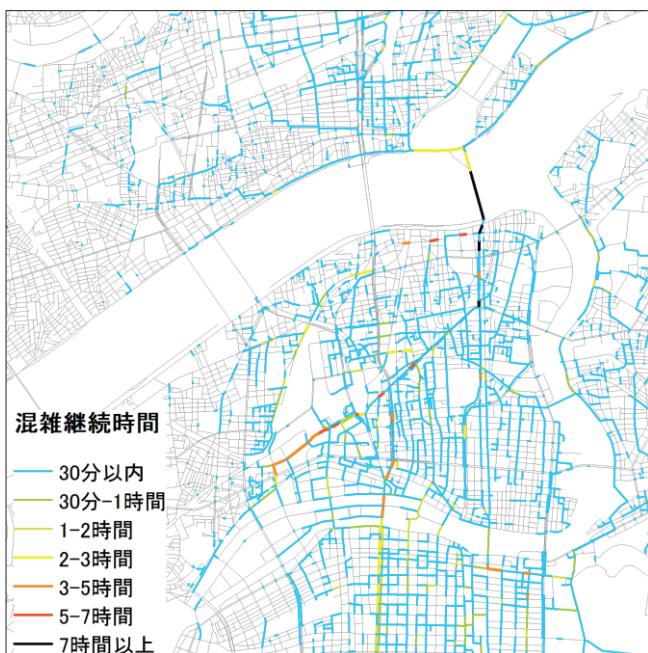


図13 橋梁付近における混雑継続時間（ケース2b）

を把握する。

図12、図13に、ケース1b、2bにおける該当地域の混雑継続時間を示す。両ケースともに、橋梁を除くエッジのほとんどは、30分～1時間以内に混雑が解消されている。一方、ケース1aにおいては十三大橋、新淀川大橋、長柄橋で3～7時間にわたる長時間の混雑が続いていることがわかる。津波は地震発生から約1時間50分程度でこの地域に到来すると予想されており、これらの橋梁や周辺の道路上で、帰宅者が混雑で身動きが取れないまま津波に巻き込まれるという最悪の事態も

想定される。

ケース1b、2bのいずれのケースでも、橋梁を通過することが、帰宅のボトルネックとなっているのは明らかである。特に、ケース2bでは、通行可能な橋梁を長柄橋と想定したため、歩行者が集中し、7時間以上にわたって混雑が生じ続けることが示されている。

以上の一斉徒步帰宅シミュレーションの結果より、淀川にかかる橋梁周辺で発生しうる大規模な混雑により、津波からの逃げ遅れや、北摂、京都、兵庫方面への帰宅者の帰宅時間に大きな影響を与える問題の存在を定量的に推定することができた。

4.まとめ

本研究では、大規模な帰宅行動シミュレーションを構築し、大阪市でこれまで行われてこなかった、大地震時における帰宅者の帰宅行動に関する基礎的知見の把握を行った。その結果、淀川にかかる橋梁付近で大きな混雑が発生し、淀川以北の帰宅者の帰宅完了時間に大きな影響を与えることがわかった。このような混雑を発生させずに、帰宅者を安全かつ迅速に帰宅させる方法としては、現在大阪市が想定しているような、実行性が疑わしい帰宅者を一律にその場に待機させる方策ではなく、特に淀川を渡って帰宅する必要がある滞在者をすぐには帰宅させずに、勤務先や近辺の避難所に避難させることを検討するなどが必要だと考えられる。今回行ったシミュレーションとその可視化結果は、そのような方策を促すためのリスク喚起の目的で用いることができよう。

一方、本研究には課題も残っている。例えば、都市内滞留者については、移動者と施設等の区別がついていない点、自宅にいるのか自宅外にいるのかの区別がついていない点、人口配分を建物の用途や分布を考慮せず一様ランダムに行っている点が挙げられる。帰宅行動モデルについては、滞在する建物によってネットワーク上の避難開始時間が異なることが自然であるのに対して、それを考慮していない点、実状よりやや速い速度を仮定している点、最短経路を帰宅経路としており、混雑回避行動を考慮していない点、避難のための歩行を考慮していない点などである。今後はこれらの課題を克服し、より現実的なシミュレーションモデルに発展させ、実行性のある帰宅・避難行動計画の策定のツールとして精度を高めることが目標である。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究(A), JST CREST (JPMJCR1402), CERD 特別推進研究の援助を受けています。道路データは東大CSISの共同研究制度で利用しています。

参考文献

- 廣井悠, 大森高樹, 新海仁:大都市避難シミュレーション

- ンの構築と混雑危険度の提案, 日本地震工学会論文集, 16(5), pp.5_111-5_126, 2016.
- 2) 大阪市: 大規模災害時における帰宅困難者対策, <http://www.city.osaka.lg.jp/kikikanrishitsu/page/0000073235.html>, 2016.10.28 (2017.8.8 確認)
 - 3) 大阪府: 大阪府津波浸水想定の設定について, <http://www.pref.osaka.lg.jp/kikikanri/tsunamishinsuisoutei/>, 2013.8.30 (2017.8.8 確認)
 - 4) 兵庫県: CG ハザードマップ, 南海トラフ巨大地震津波浸水想定図, <http://www.hazardmap.pref.hyogo.jp/>, (2017.8.8 確認)
 - 5) NTT ドコモ: モバイル空間統計に関する情報, https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/disclosure/mobile_spatial_statistics/ (2017.9.17 確認)
 - 6) G. L. Nemhauser and L. A. Wolsey: Integer and combinatorial optimization, Wiley, 1988.
 - 7) 住友電工システムソリューション株式会社: 拡張版全国デジタル道路地図データベース,
 - 8) http://www.seiss.co.jp/ms/gis/map_db.html#ex_map_db(2017.9.17 確認),
 - 9) 中央防災会議: 首都直下地震避難対策等専門調査会報告書, <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutohinan/>, 2008.10.27 (2017.8.8 確認)
 - 10) D. Helbing and P. Molnár: Social force model for pedestrian dynamics, *Phys Rev E Stat Phys Plasmas Fluids Relat Interdiscip Topics*, 51(5), pp.4282-4286, May 1995.
 - 11) 副田俊介ほか: 一次元歩行者モデルを用いた高速避難シミュレータの開発, 情報処理学会, pp.1-6, 2010.
 - 12) 中央防災会議: 南海トラフの巨大地震 建物被害・人的被害の被害想定項目及び手法の概要, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg, 2012.8.29 (2017.8.8 確認)
 - 12) J. J. Fruin 著, 長嶋正充訳: 歩行者の空間-理論とデザイン, 鹿島出版会, 1974.