

大阪市を対象とした南海トラフに起因する津波からの避難と 徒歩帰宅の経路最適化に関する研究

Optimizing Evacuation and Return Routes on Tsunami Disaster Caused by Nankai Trough in Osaka City

○瀧澤 重志^{*1}, 川岸 裕^{*2}
Atsushi Takizawa^{*1} and Yutaka Kawagishi^{*2}

*1 大阪市立大学大学院生活科学研究科 教授 博士(工学)
Professor, Graduate School of Human Life Science, Osaka City University, Ph.D.
*2 大阪市立大学大学院工学研究科 前期博士課程 (研究当時) 修士(工学)
Graduate Student, Graduate School of Engineering, Osaka City University, M.E.

キーワード：大阪市；南海トラフ；津波；帰宅困難者；最速避難計画；情報粗視化

Keywords: Osaka City; Nankai Trough; tsunami; stranded person; quickest evacuation planning; coarse information.

1. はじめに

大地震が発生すると、都市部では大量の帰宅困難者が発生する。帰宅困難者を含めた滞り者が徒歩で一斉に帰宅を開始すると道路では通常では生じ得ない混雑が発生し大混雑を招く。2011年3月11日に発生した東日本大震災により、東京都心部などで、大量の帰宅困難者が発生し、道路が帰宅する歩行者であふれた。また、2018年6月18日に発生した大阪北部地震では、梅田から淀川をわかって帰宅する帰宅者により、新淀川大橋とその周辺が大きく混雑した。多くの自治体は前述した2011年の東日本大震災での教訓から、その後ほどなくして帰宅困難者対策を策定した。大阪市でも帰宅困難者対策が策定されていたが、2018年の大阪北部地震では、前述したように帰宅者が淀川の橋梁周辺で混雑する事態となった。さらに大阪市は、南海トラフに起因する大地震が発生した場合、津波が都心部にも襲来することが予想されている。そのため、帰宅困難者対策と併せて、津波からの逃げ遅れなどの浸水リスクを考慮する必要があるが、現行の対策はそのようなリスクを考慮しているとは言い難い。

廣井らは、東京駅から40km圏内を対象に大地震時の徒歩一斉帰宅のシミュレーションを実施し、大地震時の帰宅困難者問題に関する知見を得た¹⁾。筆者らも、大地震時の帰宅困難者を含めた滞り者の徒歩一斉帰宅に関する知見を得ることを目的として、平日の14時台に南海トラフ地震が発生し、帰宅困難者を含む大阪市内の滞り者が徒歩で一斉に帰宅する様子をシミュレーションした²⁾。その結果、大阪市内を出発し淀川に架かる橋を通過する人々による長時間にわたる混雑が発生し、帰宅の主なボトルネックになっていることから、橋梁あるいはその付近での滞留による津波からの逃げ遅れなどの危険性があることなどを確

認した。これらの研究では、帰宅断念者の避難行動を考慮していない点や、滞り者が最短経路で帰宅することを仮定していたため、特定の道路に歩行者が集中する傾向がみられた。

本研究では、既報と同様に南海トラフに起因する大地震により発生する津波に対して、大阪市を対象とした避難計画のための技術開発を行う。具体的には、大阪市全域の大規模な道路ネットワークに対して、移動経路の決定にネットワークフローモデルの一種である最速流³⁾を使用可能なように、元の道路ネットワークを縮小し、避難・帰宅経路の移動時間の最適化を行い、そこから元のネットワークに経路を復元する方法を開発する。さらに、得られた経路上で大規模な歩行シミュレーションを実施し、最速流の効果を確認する。

2. 問題設定

本研究で扱う問題は、平日の14時頃に南海トラフに起因する大地震に伴う津波が発生した場合に、大阪市内滞り者が津波を避けて徒歩で緊急避難を行うとともに、帰宅困難者となるもののうち徒歩帰宅が可能なものが、大阪市内外に帰宅する状況を設定する。そしてその避難・帰宅にかかる時間をできるだけ最小化するような経路を最適化して求める。特に徒歩帰宅者の経路最適化については、既報で問題となった淀川に架かる橋梁利用者の経路を最適化することを目的とする。以下、これら徒歩避難者と徒歩帰宅者を区別しない場合には単に「移動者」と呼ぶ。

3. 提案手法とデータの緒言

本研究で提案する手法の枠組みを図1に示す。

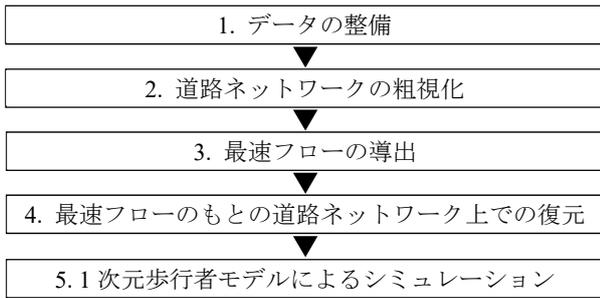


図1 研究のフロー

3.1 データの整備

この処理は既報²⁾に習うが、橋梁を通過する避難者や津波避難者を区別して扱う点で既報と異なっている。主に使用したデータは、国勢調査の小地域統計（平成27年）、全国デジタル道路地図データベース、南海トラフの津波浸水データ（大阪府、兵庫県）、モバイル空間統計（大阪市内の2015年の平日14時代）、津波避難ビル（大阪市、平成27年）である。対象とする範囲を図2に示す。徒歩帰宅者の空間範囲として、大阪市から20km以内の周辺部分をバッファで囲んでいる。バッファ内のもとの道路ネットワークは、ノード数が621,670点、エッジ数が815,729本の大規模なネットワークである。

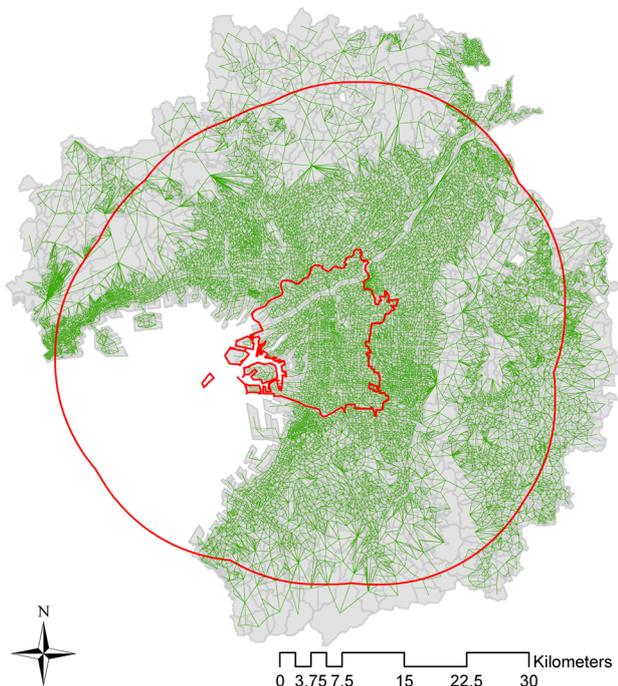


図2 大阪市とその周囲20kmの範囲（赤色）。道路ネットワーク（緑色）は3.2の粗視化後のもの

次に、モバイル空間統計を用いて、当該時間の大阪市内での滞在者を500mメッシュ毎に推計するとともに、同データからメッシュ内の一人一人の滞在者の自宅住所を大字レベルで推定する。そして、滞在場所と自宅住所のポリゴ

ンそれぞれに含まれる道路ネットワークの道路ノードを、ランダムにひとつずつ選択し、その間を最短経路で結ぶ。その距離から、中央防災会議の帰宅困難者数の推定方法を用いて、徒歩帰宅者帰宅者の数を確率的に求めた。帰宅者のうち、既報²⁾で問題となった淀川の橋梁を通過するものとそうでないものを分けて、徒歩帰宅者を集計した。さらに帰宅断念者のうち、浸水範囲内に滞留する人々を津波からの避難を要する人（避難者）として分類した。また、市内に滞在している場所が非浸水地域で、かつ住所ノードが津波の予想浸水範囲内の滞留者は、滞留場所にとどまる人に区分した。

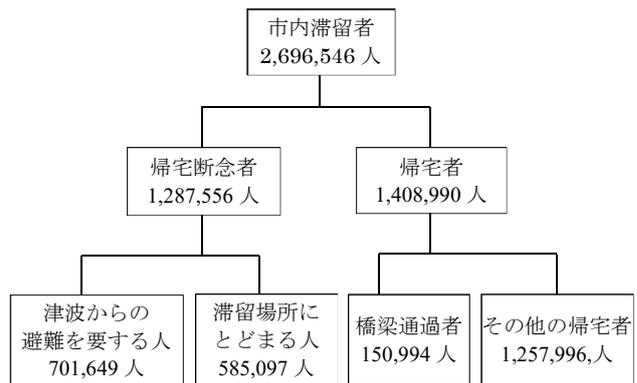


図3 帰宅困難者の内訳

3.3の最速流の計算を行うには、移動者の初期位置であるサプライと、目標点・避難場所であるシンクをノードに設定する必要がある。サプライはモバイル空間統計のそれぞれのメッシュの滞留者数を、当該メッシュ内のノードに建物ボリュームを考慮してランダムに割り付けた。シンクのうち避難者のシンクは、大阪市の津波避難ビルとして公開されている容量を設定するか、浸水範囲の境界部分にある外部の頂点を容量無限大として設定した。橋梁通過者のシンクは、図7に示す4つの橋梁の北側部分の頂点に設定した。また、大阪湾河口から数えて5本の淀川に架かる橋梁（伝法大橋、淀川大橋、十三大橋、十三バイパス、新淀川大橋）は、津波により通行不可能に設定した。

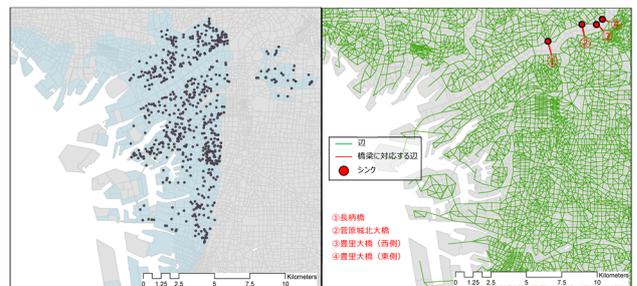


図4 浸水範囲と津波避難ビルの分布 図5 橋梁通過者のシンク

3.2 道路ネットワークの粗視化

3.3 で避難経路の避難完了時間の最小化最適化を行う。最速流問題を解くために一般に用いられる Preflow Push-Relabel アルゴリズム⁴⁾では、大よそネットワークの規模の3乗の時間計算量がかかり、この操作を避難完了までの時刻分だけ行う必要がある。この時、時間方向にネットワークをコピーする時間拡大ネットワークを利用するため、規模の大きなネットワークでは膨大なメモリを必要とする。したがって、ネットワークの規模が大きくなると、実用的な時間やメモリで求解できなくなる。本研究で扱う道路ネットワークは、前述したようにノード数が80万点を超える大規模なものであり、そのままでは最速フロー問題を解くことができない。そのため、図6に示すように、対象地域内で辺が隣接する小地域ポリゴンの重心点を直線のエッジで結んで粗視化した道路ネットワークを作成する。この時、エッジの長さは結んだ直線の長さ、エッジの容量(幅)は当該小地域を跨ぐ元の道路の幅の和とする。粗視化した道路ネットワークの規模は、エッジ数が36,160本、ノード数が15,853点と、元の道路ネットワークと比べて4%程度の規模に単純化されている。

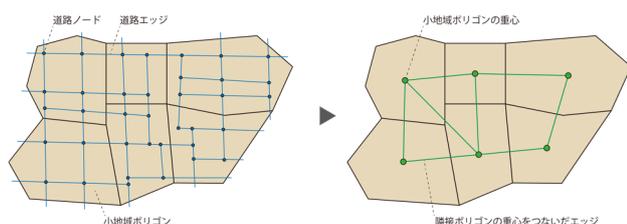


図6 道路ネットワークの粗視化

3.3 最速避難計画問題

一般的にネットワークフローモデルでは動的ネットワーク $N = (D, c, \tau, b, S^+, S^-)$ が与えられている。 D は頂点集合 V と辺集合 A からなるグラフである。各辺 $a \in A$ には、容量 $c(a)$ と整数の移動時間 $\tau(a)$ が与えられている。容量は単位時間に辺に入ることでできる資源量の上限を表す。移動時間 $\tau(a)$ は辺 a を通過するのに要する時間を表す。正のサプライ(避難者)が存在する頂点集合、負のサプライが存在する集合を、それぞれ $S^+, S^- \in V$ と定義する。

最速避難計画問題とは、全てのサプライが、 S^- のいずれかのシンクに到達する時刻を最小にする最速流を見つける問題である。最速避難計画問題を解く方法の一つとして、Ford and Fulkerson による時間拡大ネットワークを使用する方法がある⁵⁾。時間拡大ネットワークとは、時間制限を有する動的ネットワークを静的ネットワークに変換したものである。最速避難計画問題で求められる解は、確かに与えられた条件下で避難完了時間を最小化するフローになっているが、こうした解は一般に複数存在する。現実的な避難計画を考えた場合、避難完了時間までの任意の時

間で、できるだけ多くの避難者が避難完了していることが望ましい。このような性質を満たす最速流を普遍的な最速流⁶⁾と呼び、本研究ではこれを最適な避難経路とする。これを求めるには、時刻0の時間拡大ネットワークで最大流を求め、残余ネットワークを更新しながら時間拡大ネットワークを逐次拡大して解を求める。

3.4 最速流の元の道路ネットワークへの復元

本問題で求めた最速流は、3.3により道路ネットワークを小地域単位に簡略化して求められる。しかし実際の計画に資するためには、最適化を行った経路を実際の道路ネットワークに変換する必要がある。本研究では、各移動者に対して、事前に設定されたODのノードを含む小地域で粗視化された経路に含まれる小地域と交差する道路ネットワークの辺集合から、最短経路を求める方法で経路の変換を行う(図7)。しかし始点から終点までが抽出された小地域内で連結していない場合は、最短経路が求まらない。そのような場合は、小地域通常 shortest 経路を選択する。

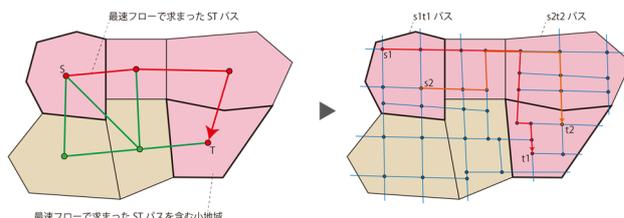


図7 得られたフローから元の道路ネットワークへのフローの復元

3.5 マルチエージェント・シミュレーション

フローモデルで求めた避難完了時間は、歩行行動をかなり単純化して求められているので、その経路を実際に通った場合の避難完了時間の精度が保証されない。そこで既報と同様に、ネットワーク空間上で動作する高速な1次元歩行者モデル⁷⁾を用いて、最適化で得られたパスに沿って歩行シミュレーションを行う。また、比較のため、最短経路でもシミュレーションを行う。

4. 計算機実験

以下の設定で計算機実験を行う

4.1 条件設定

最速流計算は、①避難者の津波避難ビル/浸水域外への避難の最速流計算を行った上で、その残余ネットワーク上で②淀川を渡る徒歩帰宅者については、最速流計算で経路を求め、橋梁を通過しない帰宅者に関しては、最短経路で経路を求めるという2段階の最適化を行った。また①においては、①A 津波避難ビルあるいは浸水範囲外の地域へ逃げる場合と、①B 徒歩で間に合う場合は津波避難ビルを利用せず、浸水範囲外の地域へ逃げる場合の2ケースを設定した。ソフトウェアの実装には Visual C++ 2015 と Leda6.4、

を利用した。使用した計算機の環境は以下の通り。
OS=Windows10 64bit, CPU=Core i7-6700k, Memory=32GB。
最速避難計画の時間ステップは 10 秒とした。

4.2 計算時間

表 1 に最適化に要した計算時間を示す。1 日以上かかってはいるが、最適化が可能であることが示されている。

表 1 最適化に要した時間

対象	計算時間
避難者	29 時間 50 分
橋梁通過者	44 時間 46 分

4.3 粗視化したネットワークの妥当性

表 2 に 3.3 による元の道路ネットワークに復元する前後の平均経路長を示す。100-200m 程度の軽微な差が生じている。表 4 にネットワークの復元後に最短路ではなく最速流による経路を選択した移動者を示す。橋梁通過者はやや選択率が低下するが、それでも半数以上が最速流の経路を使っている。

表 2 元の道路ネットワークに復元する前後の平均経路長

対象	復元前	復元後
避難者	1,798m	2,013m
橋梁通過者	7,712m	7,593m

表 3 道路ネットワーク復元後の最速流の経路の選択者数

対象	人数	選択者数	選択率
避難者	701,649	587,565	84%
橋梁通過者	150,994	97,372	64%

4.4 シミュレーションによる避難時間の比較

最後に、最適化した経路と比較のために最短路による 1 次元歩行者シミュレーションを実施して、避難完了時間の比較を行った。図 8, 9 にそれぞれの経路による避難完了者数の時間推移の比較を示す。避難者に関しては、差が 4 分と小さかったが、橋梁通過者の場合は約 3 時間 20 分短縮された。

5. おわりに

本研究では、南海トラフに起因する大地震により発生する津波に対して、大阪市全域の大規模な道路ネットワークに対して、移動経路の決定に最速流を使用可能なように、元の道路ネットワークを縮小し、避難・帰宅経路の移動時間の最適化を行い、そこから元のネットワークに経路を復元する方法を開発した。その結果、実際に最適化を行うことができ、特に淀川の橋梁を渡る徒歩帰宅者の移動時間が、最適化により大幅に減少することが分かった。

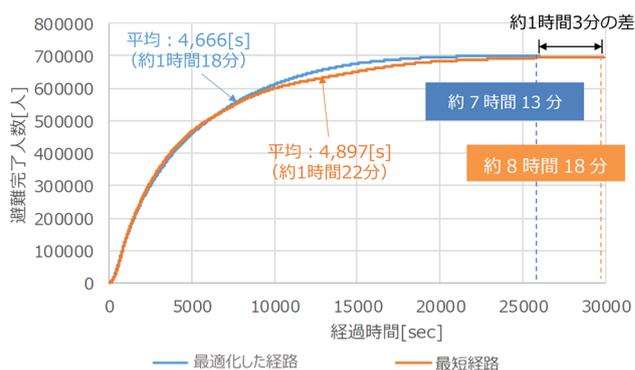


図 8 避難完了者数の時間推移の比較：避難者

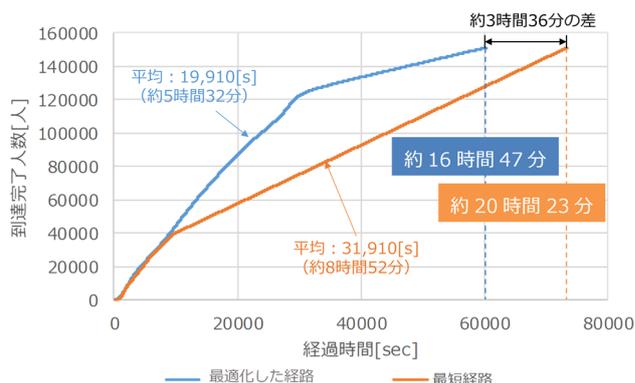


図 9 避難完了者数の時間推移の比較：橋梁通過者

[謝辞]

本研究は JST CREST (JPMJCR1402), 科研費基盤研究(A) (16H01707), (B) (19H04068), の補助を受けています。また道路データは、東大 CSIS の共同研究制度 (863) で利用しています。

[参考文献]

- 1) 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, 16(5), pp.5_111-5_126, 2016.
- 2) 川岸裕, 瀧澤重志, 大地震時を想定した大阪市からの一斉徒歩帰宅シミュレーション, 大阪市立大学都市防災研究プロジェクト 都市防災研究論文集都市防災研究論文集, 第 4 巻, pp.7-13, 2017.
- 3) 加藤直樹, 瀧澤重志, 最速避難計画のモデリングと解法 (特集 ネットワークとモデリング), オペレーションズ・リサーチ, 60(8), pp.437-442, 2015.8.
- 4) A.V. Goldberg and R.E. Tarjan, A new approach to the maximum-flow problem, Journal of the Association for Computing Machinery, 35-4, pp.921-940, 1988.
- 5) L.R. Ford and D.R. Fulkerson, Constructing maximal dynamic flows from static flows, Operations Research Letters, 6, pp.419-433, 1958.
- 6) E. Minieka: Maximal lexicographic and dynamic network flows, Operations Research, 21, pp.517-527, 1973.
- 7) 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, 情報処理学会研究報告, 2010(5), pp.1-6, 2010.