

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

STUDY ON OPTIMIZATION OF EVACUATION AND WALKING HOME FOR OSAKA CITY ON TSUNAMI DISASTER DUE TO THE NANKAI TROUGH GREAT EARTHQUAKE

環境図形科学研究室 川岸 裕

Spatial & Graphic Science Lab. Yutaka KAWAGISHI

大地震が発生すると、都市部では大量の帰宅困難者による混雑が生じる。本研究では、南海トラフが発生した場合の帰宅困難者問題に関する知見を得るため、避難・帰宅経路の最適化を行い、避難・帰宅シミュレーションを実施した。結果として、大阪市の中心部で極度の歩行者による混雑が発生したことや、長柄橋や一部の道路で長期の混雑が発生していることなどを把握でき、一斉に徒歩で帰宅させることの危険性などを把握することができた。

When a major earthquake occurs, crowding is caused by a large number of difficulty to return home in urban areas. In this study, we optimized evacuation / returning home route and got evacuation / homecoming simulation in order to obtain knowledge on the problem of the difficulty of returning home when Nankai Trough occurred. As a result, you can grasp the congestion caused by extreme pedestrians in the center of Osaka city, that long-term congestion has occurred on long road bridges and some roads, and let them go home all at once I was able to grasp the dangers and other things.

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在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乱を招く。大阪市内では、滞留者は災害発生後すぐに帰宅を開始せず、事業所等にとどまるような対策を公表している [1]。しかしながら、大阪市内では津波を伴うような地震が発生した場合、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。このようなリスクを考慮した対策を立てる上では、浸水範囲内の帰宅断念者に対する避難計画を策定することや、大地震時の帰宅困難者問題に関する知見を明らかにする必要がある。

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 [2]。筆者らも、大阪市内における大地震時の帰宅困難者を含めた滞留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た想定の下、帰宅困難者を含む市内の滞留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 [3]。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。この研究や廣井らの研究では、帰宅断念者の避難行動を考慮していない点や、滞留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過度に集中することが課題として残っていた。

以上の背景から本研究では、このような大規模災害時の徒歩移動が、できるだけスムーズに行えるような移動経路を把握することを目的として、理論的な避難完了時刻の下限値の移動経路を求めることができる最速避難計画問題の枠組みを用いて、避難と帰宅経路の最適化問題を定式化する。次に、大阪市全域を対象とした大規模な道路ネットワーク上でこの問題を解くために、簡略化した道路ネットワーク上で最適化を行った上で、得られた移動経路を簡略化前の元のネットワークに展開する方法を提案する。そして、この避難行動と経路の最適化を考慮した大規模徒歩帰宅シミュレーションを実施し、避難・帰宅行動の両方を考慮した帰宅困難者問題に関する知見を得ることを目的とする。

2. 最速避難計画問題

最速避難計画問題とは、できるだけ短時間で避難者を安全な場所に逃がす避難経路を求める問題である。

この問題で使用するモデルが動的ネットワークである。これは人や物の流れを、動きを考慮してネットワーク上でモデル化したものである。以降において、最速避難計画問題について順を追って説明する。

2.1 動的ネットワーク

いま、動的ネットワーク $N = (D, c, \tau, b, S^+, S^-)$ が与えられているとする。ここで 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の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。頂点 x から出ていく辺集合、頂点 x に入る辺集合を、それぞれ $\delta_D^+(x), \delta_D^-(x)$ と定義し、さらに、正のサプライ（避難者）が存在する頂点集合、負のサプライ（シンクの収容人数）が存在する集合を、それぞれ $S^+, S^- \in V$ と定義する。図1に動的ネットワークの例を示す。

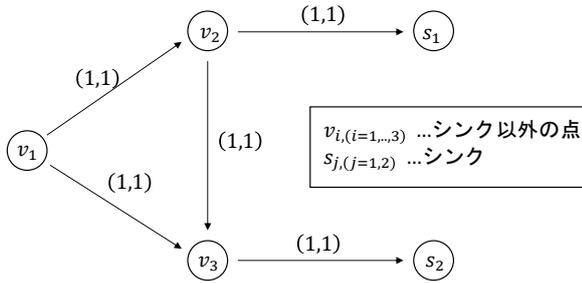


図1 動的ネットワークの例

2.2 最速避難計画問題

最速避難計画問題（最速フロー問題）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フローを見つける方法である。具体的には、以下に示す制約(1)~(3)を満たす実行可能な動的フロー $f: A \times \mathbb{Z}_+ \rightarrow \mathbb{R}_+$ が存在し、それらのフローの中で、避難完了時刻を最小にするフローを見つける問題として定義される。ここで、 $\mathbb{Z}_+, \mathbb{R}_+$ はそれぞれ非負整数、非負実数の集合、 Θ は制限時間、 $b(x)$ は頂点 x のサプライである。制約条件(1)は各辺に同時に入ることのできる人数は辺容量を超えないという制約で、制約条件(2)は各頂点に関して流出するフローの量は流入するフローの量以下になるという制約、制約条件(3)は全てのサプライがシンクに流れるという制約である。これらの制約を全て満たすフローを実行可能なフローという。

$$f(a, \theta) \leq c(a) \quad \forall a \in A, \quad \forall \theta \in \mathbb{Z}_+ \quad (1)$$

$$\sum_{a \in \delta_D^+(x)} \sum_{\theta=0}^{\Theta} f(a, \theta) \leq \sum_{a \in \delta_D^-(x)} \sum_{\theta=0}^{\Theta - \tau(a)} f(a, \theta) + b(x) \quad \forall x \in V, \quad \forall \theta \in \mathbb{Z}_+ \quad (2)$$

$$\sum_{s \in S^-} \sum_{a \in \delta_D^-(s)} \sum_{\theta=0}^{\Theta - \tau(a)} f(a, \theta) = \sum_{x \in V} b(x) \quad \forall \theta \in \mathbb{Z}_+ \quad (3)$$

2.3 時間拡大ネットワーク

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 [3]。時間拡大ネットワークとは、図2に示すように、時間制限 Θ を有する動的ネットワーク N を静的ネットワークに変換したものであり、 $N(\Theta)$ と定義される。 $N(\Theta)$ の頂点集合は $\{x(\theta) : x \in V, \theta \in \{0, \dots, \Theta\}\}$ で定義され、元のネットワークの頂点 $x \in V$ に各時刻 $\theta \in \{0, \dots, \Theta\}$ に対応する頂点 $x(\theta)$ を追加している。時間拡大ネットワークには2種類の辺が存在する。一つは、各辺 $a = (x, y) \in A$ と各 $\theta \in \{0, \dots, \Theta - 1\}$ に対して容量 $c(a)$ の辺 $a(\theta) = (x(\theta), y(\theta + \tau(a)))$ が追加されており、これは、元のネットワーク上の頂点間を移動する時に使用される辺である。二つ目は、各頂点 $x \in V$ と各 $\theta \in \{0, \dots, \Theta - 1\}$ に対して容量無限大の辺 $(x(\theta), x(\theta + 1))$ からなる辺の集合で、滞留辺と呼ばれるものである。各頂点 $x \in V$ に対して、 $x(0)$ 上のサプライは $x(b)$ と定義され、 $\theta \in \{1, \dots, \Theta\}$ に対する $x(\theta)$ のサプライは 0 となる。 $\{s(\theta) : s \in S^-, \theta \in \{0, \dots, \Theta\}\}$ で定義されるのはシンク集合である。

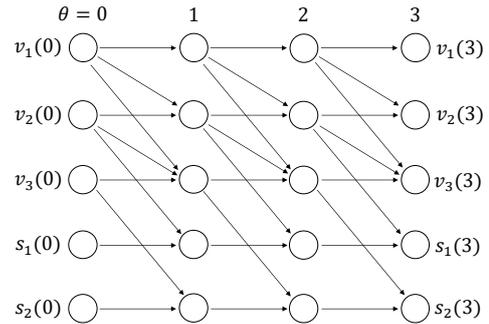


図2 図1に対応した時間拡大ネットワーク

2.4 普遍的最速流

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パスになっているが、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フローを普遍的最速流と呼び、次式を満たす動的フローとして定義される。

$$\sum_{s \in S} \sum_{a \in \delta_D^+(s)} \sum_{\theta=0}^{\Theta-\tau(a)} f^*(a, \theta) \geq \sum_{s \in S} \sum_{a \in \delta_D^+(s)} \sum_{\theta=0}^{\Theta-\tau(a)} f(a, \theta) \quad (4)$$

$$\forall \theta \in \{1, 2, \dots, \Theta^*\} \text{かつ} f \in F$$

普遍的な最速流は辞書式最大流問題を解くことによって求まる [4]. 辞書式最大流とは、シンクの順序つき集合を $T = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ とし、 $T' \subset T$ に入る最大流の値を $M(T')$ と表したとき、 $M(T(i)) = \{x_1, x_2, \dots, x_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, k$) となるフローのことをいう. 辞書式最大流を求めるためには、時間拡大ネットワークを図3のように拡張する必要がある. 各時刻 $\theta = \{0, \dots, \Theta\}$ にスーパーシンク $s^*(\theta)$ を加え、各シンク $s \in S^-$ に対して定義された点 $s(\theta)$ 、 $s^*(\theta)$ を結ぶ枝を加える. さらに、スーパーソース v^* を定義し、各ソース $v \in S^+$ に対して定義した、点 $v(0)$ 、 v^* を結ぶ容量 $b(v)$ の枝 ($v^*, v(0)$) を加える.

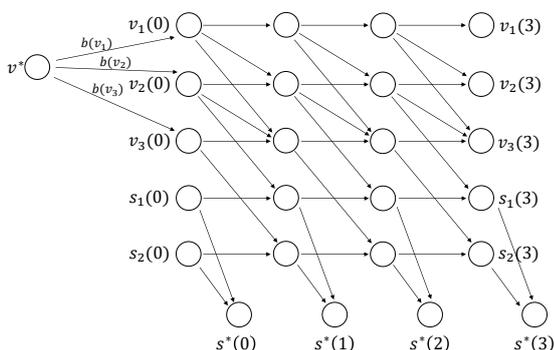


図3 拡張した時間拡大ネットワーク

辞書式最大流は時刻0の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手順によって求まる. 残余ネットワークとは、あとどれだけフローを流せるかを表したネットワークのことである.

3. 提案手法

本研究では、大規模なネットワークで普遍的な最速流を計算するために道路ネットワークを小地域単位に簡略化し、計算後に得られた経路を簡略化前の道路ネットワークに展開することで、徒歩帰宅シミュレーションに適用する方法を提案する.

3.1 ネットワークの簡略化

本研究では、ArcGIS を用いてこの空間の簡略化を行った. まず、対象地の各小地域ポリゴンに重心点を設け、それを新たな頂点とした. 次に、境界線が隣接する小地域毎に、それらの重心点を端点とするエッジを作成した. 簡略化のイメージを図4に示す.

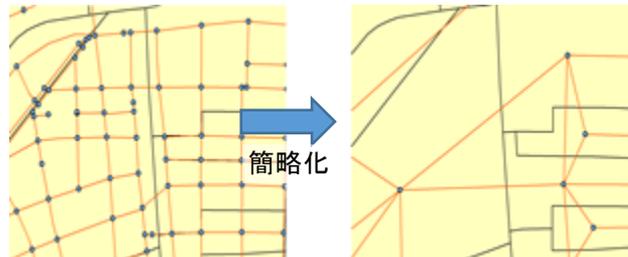


図4 簡略化のイメージ

3.2 徒歩帰宅シミュレーションへの適用

実際の道路ネットワークに対応したシミュレーション結果を得るためには、最適化を行った滞在者の経路を実際の道路ネットワーク上に展開する必要がある. 本研究では、経路が最適化された各滞り者に対して、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展開を実施した. 道路ネットワークのグラフを $G = (V, E)$ と表現する. V は頂点の集合、 E は辺の集合である. まず、各エージェント p に、経路探索に利用できる頂点の集合 V_p を定義する. 次に、経路に含まれる各々の小地域に関して、それらの小地域に含まれる頂点を全て V_p に加える. そして、各々の $v \in V_p$ 同士を連結する辺の集合 E_p とし、 V_p と E_p が構成されるグラフを $G^* = (V_p, E_p)$ と定義する. 本研究では、 $G^* = (V_p, E_p)$ 上で最短経路を探索する手法を用いた. $G^*(V_p, E_p)$ が始点 s から終点 g ま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、最適化された経路は反映されず、 $G = (V, E)$ 上で単純な最短経路を選択することになる. 図5は経路展開のイメージである.

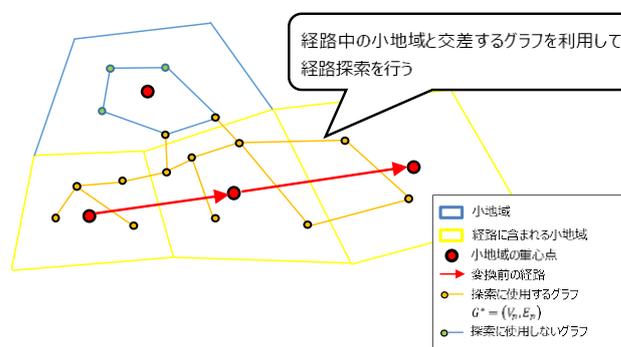


図5 経路展開のイメージ

4. 経路の最適化の準備

以上のような手法で普遍的な最速流を計算し、避難・帰宅経路の最適化を行った.

4.1 入力データ等

計算の対象となるネットワークは、大阪市とその周囲 20km バッファ内に含まれる高速道路を除く道路を、

計算対象のネットワークの基盤とした。頂点数 621,670、辺数 815,729 の大規模なネットワークとなるため、一般的な計算機環境で効率的に計算できるよう、小地域を 1 つの頂点の単位とし簡略化した。図 6 は簡略化したネットワークである。簡略化したネットワークのサイズは、36,160 本のエッジと 15,853 点のノードで構成され、エッジとノードの数はそれぞれ従来のネットワークの約 4.4%、2.6%にまで簡略化することができた。

浸水範囲を示すデータは大阪府と兵庫県が公表している南海トラフ巨大地震による津波の予想浸水範囲 [5] [6]をもとに作成した。市内の滞留者の空間分布は既往研究 [1]に従い、平日の 14 時台のものとした。

4.2 サプライとシンクの設定

最速避難計画問題を解くためには、サプライとシンクの設定が必要となる。また、本研究では避難者、帰宅者それぞれについて普遍的な最速流を計算するため、推定結果から滞留者の分類も行う必要がある。分類方法には、内閣府による帰宅困難者数推定における考え方 [7]を使用した。

この考え方では、滞留者が帰宅するかどうかを滞留場所から帰宅場所までの距離に基づいて決定する。帰宅距離が 10km 以内の人々は全員が帰宅可能であり、10km~20km の人々は距離が 1km 増加するごとに帰宅可能率が 10%逡減、20km 以上の人々は距離にかかわらず帰宅を断念する。本研究では津波の浸水を考慮しているため、帰宅場所が津波の予想浸水範囲内にある場合は帰宅を断念するという条件を追加した。分類結果を図 7 に示す。

本研究では分類結果からさらに、最速避難計画問題の対象とすることができる滞留者を分類した。本研究では、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）」として分類し最適化の対象とした。

次に経路の最適化の対象としたのは、淀川の橋梁を通過する帰宅者である。これらの人々は帰宅の際に必ずいずれかの橋梁を通過する。したがって、橋梁の出入り口をシンクとして設定することで、時間内にいずれかのシンクに最速で到達するような経路の最適化を行うことが可能となる。本研究では、そのような橋梁を通過する帰宅者を「橋梁通過者」として分類し、最適化の対象者とした。橋梁を通過しない帰宅者に関しては、最短経路を仮定した。

避難者の最速流計算の際のシンクは、浸水範囲外の頂点（シンク容量は無限大）および津波避難ビルに対応する頂点を設定した（容量は収容人数）。津波避難ビルは平成 27 年度における大阪市の指定のものを使用した。浸水範囲と津波避難ビルの分布を記載したものを図 8 に示す。

橋梁通過者の計算に際しては図 9 に示す橋梁の出入り口にあたる 4 か所の頂点をシンクに設定した。

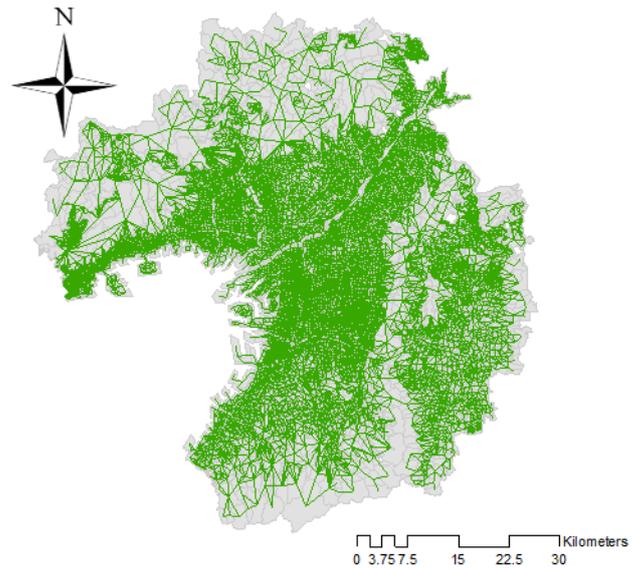


図 6 最適化計算に使用する簡略化したネットワーク

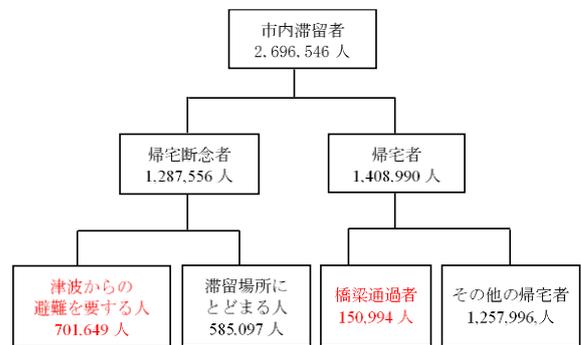


図 7 滞留者の分類：赤字が経路最適化の対象

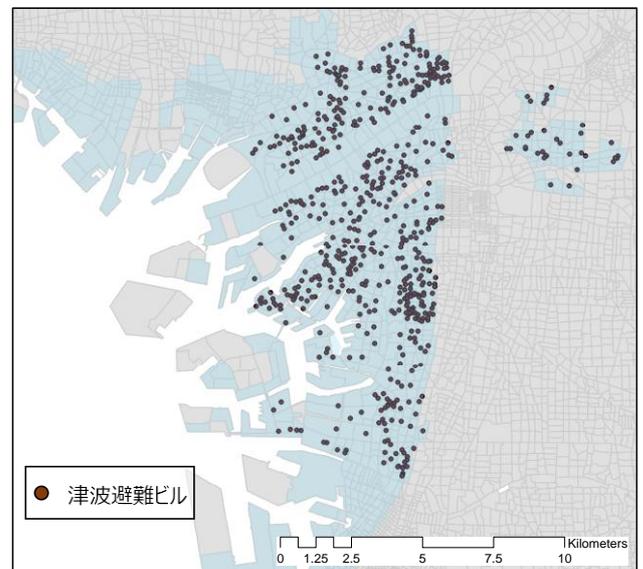


図 8 浸水範囲と津波避難ビルの分布

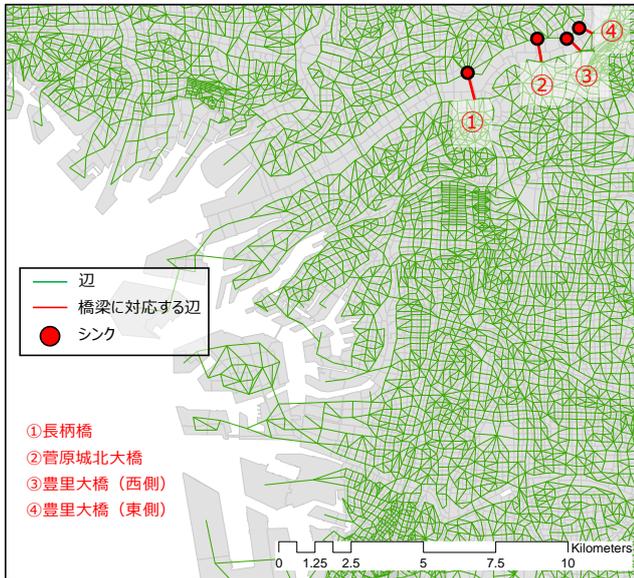


図9 橋梁通過者の最速流計算で設定したシンク

5. 経路の最適化

以上の入力データを準備して、経路の最適化を実施した。経路最適化の対象となる避難者・橋梁通過者の普遍的な最速流の計算ケースについて説明する。

まず、避難者に関して、津波避難ビルを利用せず、浸水範囲外の地域へ逃げるように設定して計算し、浸水までに間に合わない地域の避難者を津波避難ビルへ逃げるように再設定し、避難者の最速流計算を行った。その後、避難者の最速流計算を行った後の残余ネットワーク上で橋梁通過者に対して普遍的な最速流の計算を実施した。このようにすることで、避難者による滞留の影響を考慮した上で橋梁通過者に対して最速流計算が可能となる。

6. 最適化の検証

本研究では、最適化された経路が最短経路と比較して避難者および橋梁通過者の目的地への到達時間の短縮に寄与しているのかを目的地の平均到達完了時間を比較することで検証した。

具体的には、シミュレーションケースとして、避難者のみを歩行させたケース、橋梁通過者のみを歩行させたケースを設定し、それぞれ最適化された経路と最短経路の2パターンで歩行させ、到達完了時間を比較することで、最適化の効果を検証した。

表1、表2にそれぞれ避難者、橋梁通過者の平均避難完了時間の経路ごとの比較をそれぞれ示す。避難者に関しては、差が4分で最適化によって大きな差は出なかったが、切迫した状況からの避難を考慮すると少しでも全体の避難が短縮されることは重要であると考えられる。一方で、橋梁通過者は約3時間20分短縮され、最適化の効果は大きかったと考える。

表1 避難者の平均避難完了時間

経路の種類	平均避難完了時間
最適化した経路	4,666[s] (約1時間18分)
最短経路	4,897[s] (約1時間22分)

表2 橋梁通過者の平均到達完了時間

経路の種類	平均到達完了時間
最適化した経路	19,910[s] (約5時間32分)
最短経路	31,910[s] (約8時間52分)

7. 徒歩帰宅シミュレーション

以上のように経路の最適化を行い、避難行動と経路の最適化を考慮した徒歩帰宅シミュレーションを表3に示す内容で実施した。

表3 シミュレーションの概要

シナリオ	平日14時台に南海トラフ巨大地震が発生し、その時の大阪市内の滞留者が徒歩で一斉に避難・帰宅を開始。
対象者	市内滞留者のうち、津波からの避難を要する帰宅断念者(避難者)(701,649人)、帰宅意思決定モデルにより帰宅を決定した帰宅者(1,408,990人)。合計2,110,639人。
対象道路	大阪市とその周囲20kmバッファに含まれる高速道路を除く道路ネットワーク。
避難・帰宅経路	避難者及び淀川の橋梁を通過する帰宅者(橋梁通過者)は普遍的な最速流に基づく経路。その他の帰宅者は普遍的な最速流の計算対象から除外しているため最短経路を仮定。
経路の条件設定	津波の浸水を想定し、河口から5本の橋梁(伝法大橋、淀川大橋、十三大橋、十三バイパス、新淀川大橋)を通行不可能に設定。
シミュレーションモデル	一次元歩行者モデルを使用。

シミュレーションでは、ボトルネックになる場所を把握することで、帰宅支援のタイミングや適切な箇所等帰宅困難者対策の基礎資料として利用できる。本研究では、道路上での混雑状況を把握し、その内容を評価した。混雑を表す指標として歩行者密度(人/m²)を使用し、歩行路サービス水準[9]より、大部分が自由歩行速度で歩行することが困難となる密度0.7(人/m²)以上で混雑が発生していると定義した。

図10は徒歩避難・帰宅中に発生した最大の歩行者密度を可視化したものである。市内全域で混雑箇所が散見されるほか、密度4(人/m²)以上の大きな混雑が生じている道路が市内中心部に分布していることが分かる。

図11は0.7(人/m²)以上の混雑が発生し、それが継続する時間を可視化したものである。主な特徴として

1 時間以上の混雑が生じる道路が大阪市内の広範囲で散見されることが分かる。長期にわたる混雑に関しては、橋梁付近や南海難波駅付近～天王寺駅付近においても 6 時間以上の長期混雑が発生している道路が伸びていることが分かる。このような大きな混雑や長期混雑が生じると、多くの人々が火災などの二次災害などに巻き込まれてしまうほか、救急車両等の通行障害となる恐れがある。また、橋梁部に関しては、菅原城北大橋や豊里大橋では長期にわたる混雑は発生しなかったものの、長柄橋では 6 時間以上にわたる混雑が生じている。これらのことから、経路の最適化を行っても、一部の橋梁で混雑が避けられないことを確認した。

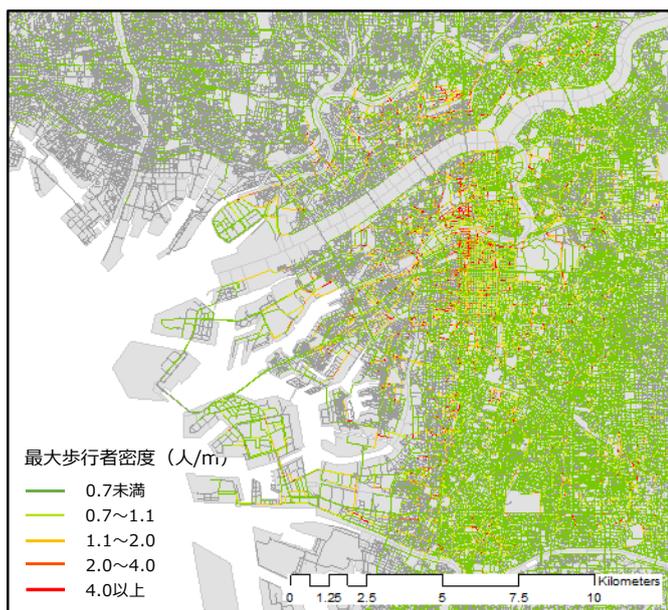


図 10 最大の混雑が発生する道路

8. おわりに

本研究では、ネットワークの簡略化を行うことで大規模なネットワークでの普遍的な最速流の計算を可能にし、得られた経路を元のネットワークに展開する方法を提案した。そして、最適化された経路と最短経路で目的地への到達完了時間を比較することで、検証を行った。結果として、経路の最適化を行った方が全体の到達時間が短縮されることを確認した。そして、最後に避難行動と経路の最適化を考慮したシミュレーションを実施し、大阪市中心部で大きな混雑が集中していることや、経路の最適化を行っても一部の橋梁上で長期混雑が発生するなど、帰宅困難者問題に関する知見を得た。

本研究では、橋梁を通過しない帰宅者に関しては経路の最適化を行っていない。今後の課題として、これらの帰宅者に対しても最速流計算による最適化が可能となるようなアルゴリズムの提案などが課題として挙げられる。

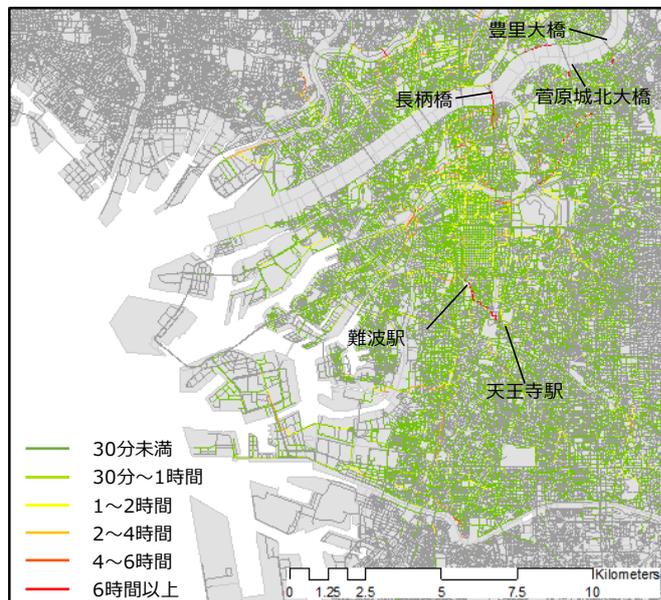


図 11 混雑継続時間

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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, 第 16 巻, 第 5 号, pp. 5_111-5_126, 2016.
- [3] Fulkerson, L. R. Ford Jr. and D. R. : Flows in Networks, Princeton University Press, Princeton, NJ, USA, 1962.
- [4] 小林和博, 成澤龍人, 安井雄一郎, 藤澤克樹: 辞書式最速流による避難計画作成モデルの実験的解析, 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, 第 59 巻, pp. 86-105, 2016.
- [5] 大阪府: 津波浸水想定図, http://www.pref.osaka.lg.jp/kikikanri/keikaku_higaisoutei/tunami_soutei.html. (2018.9.20 確認).
- [6] 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/hazmapap/top/select.asp?dtp=9#>. (2018.9.20 確認).
- [7] 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. (2017.4.10 確認).
- [8] 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, 第 2010 巻, 5 号, pp. 1-6, 2010.
- [9] J Fruin, John: 歩行者の空間一理論とデザイン, 鹿島出版会, 1976, p. 206.