

大阪市における南海トラフ大地震に起因する津波からの最速避難計画手法

○川岸 裕*¹ 瀧澤 重志*²

キーワード：南海トラフ 津波 大阪市 最速避難計画 ネットワークフローモデル

1. 研究背景と目的

大地震が発生し、自動車や鉄道などの交通機関が停止すると、都市部において大量の帰宅困難者が発生しうる。大阪市では他の自治体と同様に、滞在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⁾。一方、南海トラフ巨大地震のような津波を伴う大地震の場合、大阪市でも津波の浸水リスクを考慮しなければならないが、現行の帰宅困難者対策がそれを考慮しているとは言い難い。

筆者らは既往研究²⁾で、帰宅者の徒歩帰宅の様子を歩行者シミュレーションで再現し、徒歩で一斉に帰宅を開始する条件で、淀川に架かる橋梁に帰宅者が集中し、長時間の混雑が発生する危険性があることを指摘した。この研究では浸水域への帰宅はしないものとして扱ったものの、浸水域からの避難行動は考慮していなかった。現在大阪市では予想浸水域内に多数の津波避難ビルが指定されており、津波発生時にはそこに逃げるような避難計画が策定されている。しかし、津波によって浸水した地域は、比較的長期間湛水が続くとする予想もあり、多数の津波避難ビルが浸水によって孤立してしまうことが懸念される。大都市で津波災害が起こった場合、多数の避難者が津波避難ビルに取り残される一方、そこからの救助のリソースは限られているので、津波避難ビルを利用する避難者の数は、可能であれば少ないほうがよいと考えることには合理性がある。そのためには、どの地域の避難者が本当に津波避難ビルに逃げなければならないかを明らかにする必要がある。

移動を伴う避難計画のための数理的手法には様々なものがあるが、代表的なものとして、マルチエージェントを用いたシミュレーションモデルと、ネットワークフローモデルを用いた最速避難計画手法が挙げられる。津波を伴う地震のような緊急時の避難を要する状況では、避難者が全体として最も効率よく避難する計画を立てることが重要となる。ネットワークフローモデルを使用することで、最も効率的に避難した場合の避難完了時間や各時刻の避難完了人数、時間内に逃げ切れない地域等を把握することができ、避難者全体が効率よく避難するための目安を定量的に得ることができる。

そこで本研究では、ネットワークフローモデルを用いて、大阪市内の津波の浸水範囲内に滞在する居住者や勤務者が、浸水域外や津波避難ビルへ最速で避難するためのルートを求め、大地震時に効率よく行動するための避難計画と

避難が時間的に厳しい地域を把握することを目的とする。

2. 最速避難計画

2.1 動的ネットワーク

一般的にネットワークフローモデルでは、図1に示すような動的ネットワーク $N = (D, c, \tau, b, S^+, S^-)$ が与えられている。 D は頂点集合 V と辺集合 A からなるグラフで定義される。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。避難計画問題の場合は、資源量は避難者人数を差し、辺容量は単位時間あたりに辺 a に出ることのできる人数の上限を差し、頂点 x から出ていく辺集合と 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、負のサプライが存在する集合を、それぞれ S^+ , $S^- \in V$ と定義する。ここで注意したいのは、動的ネットワークグラフは辺が方向を持った有向グラフでなければならないということである。

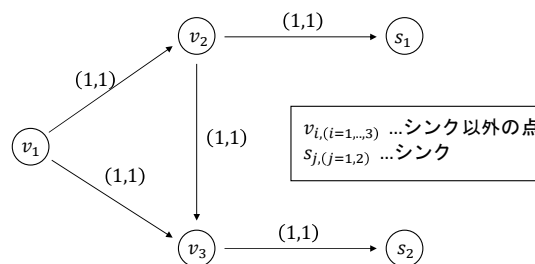


図1 動的ネットワークの例

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。

式(1)は容量制約、式(2)はフロー保存則を示す式、式(3)は要求制約と呼ばれる。なお、実行可能とは、式(3)を満たす最小の時刻（避難完了時刻）を θ^* としたとき、式(1)～(3)をすべて満たす θ^* が存在することを言う。

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

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

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

2.2 時間拡大ネットワーク

最速フロー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。その名の通り、フローが滞留辺で流れている場合は、元のネットワークでは同一頂点上で滞留していることを示す。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。

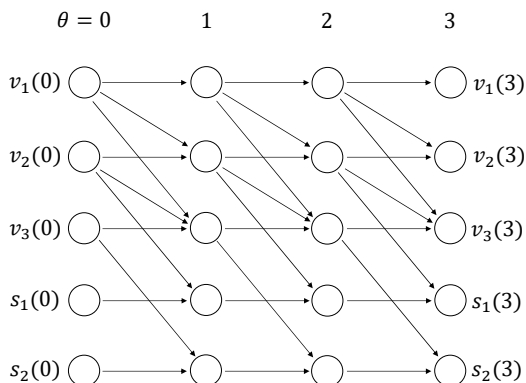


図2 図1に対応した時間拡大ネットワーク

2.3 普遍的な最速流

最速フロー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な最速流⁴⁾と呼び、次式を満たす動的フローとして定義される。

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

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

本研究ではこの普遍的な最速流としての避難経路を求める。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⁵⁾。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 $M(T')$ で表したとき、 $M(T(i)) = \{x_1, x_2, \dots, x_i\} (i = 1, 2, \dots, k)$ 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次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 $s(\theta)$ と $s^*(\theta)$ 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 $v(0)$ と v^* を結ぶ容量 $b(v)$ の枝 $(v^*, v(0))$ を加える。

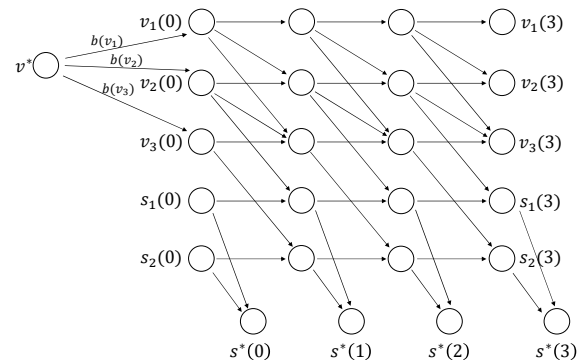


図3 図2を拡張した時間拡大ネットワーク

辞書式最大流を求めるアルゴリズムを以下に示す。このアルゴリズムでは、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。

Algorithm 1: Find lexicographic max flow

For each $\theta = 0, \dots, \theta$ do

v^* から $s^*(\theta)$ までの最大流を求める。

θ までに対応する時間拡大ネットワークを更新する。

End For

3. 計算機実験の設定

以上手法を用いて、次に示す設定で計算機実験を行う。

3.1 入力データ

浸水範囲を示すデータは大阪府⁷⁾と兵庫県⁸⁾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をもとに作成したデータを使用した（図5）。

拡張版全国デジタル道路地図データベースの道路ネットワークのうち、大阪市とその周囲 20km バッファ内に含まれる道路ネットワークに浸水範囲内の津波避難ビルを追加したものを、計算対象のネットワークの基盤とした。その上で、効率的に計算を行うことができるよう、小地域の重心点がネットワークの頂点となるように簡略化したものを用いた（図6）。この場合の避難完了時間の精度が、元のネットワークと比較して妥当な範囲にあることを、既報⁹⁾で確認済みである。また、小地域とそれに含まれる津波避難ビルを表す点は長さ 0 の辺で接続した。

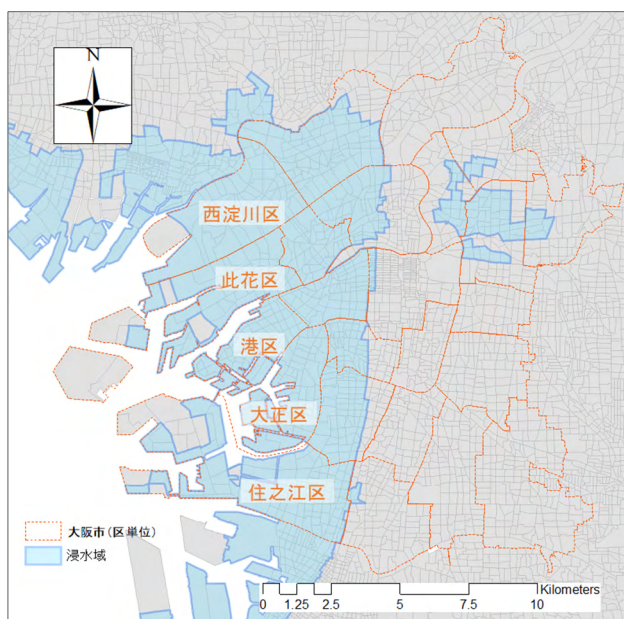


図5 南海トラフ大地震による津波の予想浸水範囲

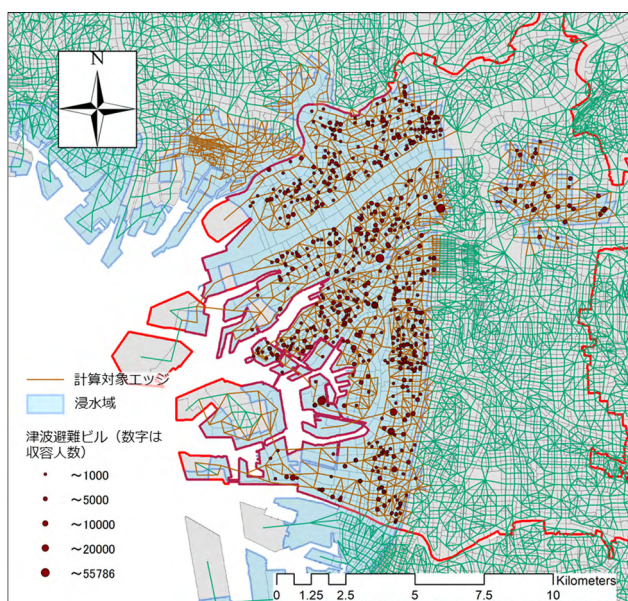


図6 簡略化された道路ネットワーク

サプライに関しては、既報と同様にモバイル空間統計を用いて、市内滞在者の最も多い時間帯である平日 14 時台に大阪市内に滞在し、大地震発生時に帰宅が困難となる人々（帰宅断念者）のうち、津波の予想浸水範囲内に滞在する人々を対象とした。内閣府による帰宅困難者数推定における考え方⁹⁾に基づき、帰宅断念者の数を 701,649 人と推計した。

3.2 実験のケース分け

大地震が発生すると広域にわたって地盤沈下が発生し、それに伴い長期にわたる湛水が発生する恐れがある。たとえば、津波避難ビル等へ避難できたとしても周囲が湛水していた場合、浸水による通行障害や、応援部隊、ライフライン・インフラ等の復旧部隊の駐留場所や資材置き場、がれき仮置き場等のオープンスペースが不足し、救助に遅れが生じたる救助が困難になることなどの事態も考えられる。そのようなケースを考慮し本研究では、実験のケースとして①避難者が津波避難ビルあるいは浸水範囲外の点に避難する場合（津波避難ビルあり）と、②避難者が全員浸水範囲外の点に避難する場合（津波避難ビルなし）の2つのケースを想定し計算を行った。

3.3 計算の設定と環境

時間単位は計算時間やメモリの都合から 10 秒とし、避難者の移動時間は 1m/s とした。最速フローの計算プログラムは Visual C++2015 を用いて実装し、最大流問題を解くために、アルゴリズムパッケージの LEDA6.4 を使用した。

4. 結果

両ケースにおける最速避難計画の結果を以下に示す。

4.1 避難完了人数の推移

図7に両ケースにおける到達完了人数の推移を示す。

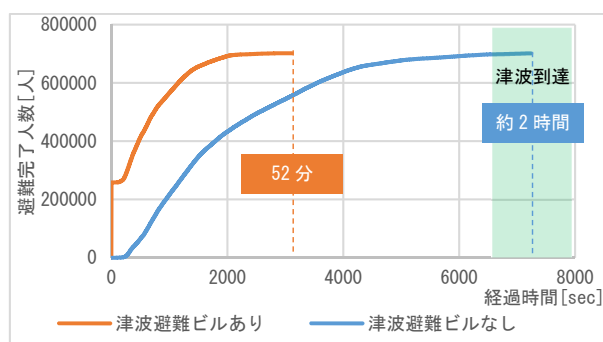


図7 避難完了人数の推移

津波避難ビルありの場合、避難者が全員避難完了する時間（最大避難完了時間）は 52 分となり、地震発生から 1 時間以内に避難が完了していることがわかる。対して、津波避難ビルなしの場合の最大避難完了時間は約 2 時間となった。津波避難ビルを使用するのとしらないのでは、全体の避難時間が 2 倍近く変わることがわかった。

また、地震発生から津波が到達する時間（1 時間 50 分）において、後者のケースにおける避難完了人数は 596,091 人であり、津波の到達までに避難が完了しない人数は 105,558 人と、10 万人弱の避難者が、湾岸に津波が到達するまでに間に合わないことが確認できた。

4.2 ソース毎の避難完了時刻

図 8,9 はそれぞれのケースにおけるソース毎の避難完了時刻の最大値を、小地域別に可視化した地図である。

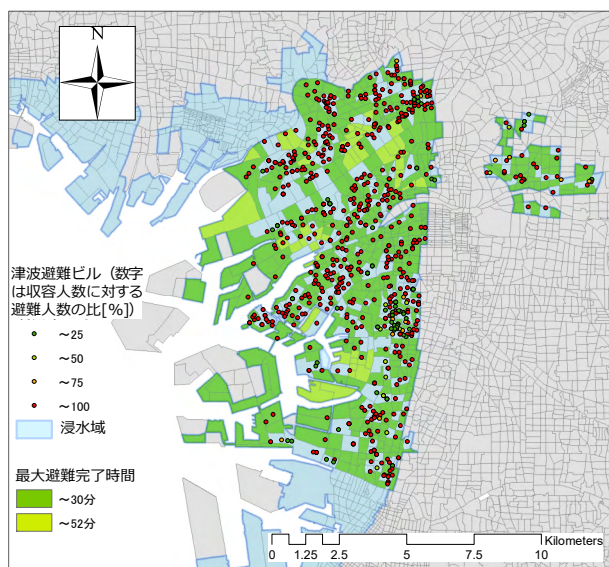


図 8 ソース別最大避難完了時間：津波避難ビルあり

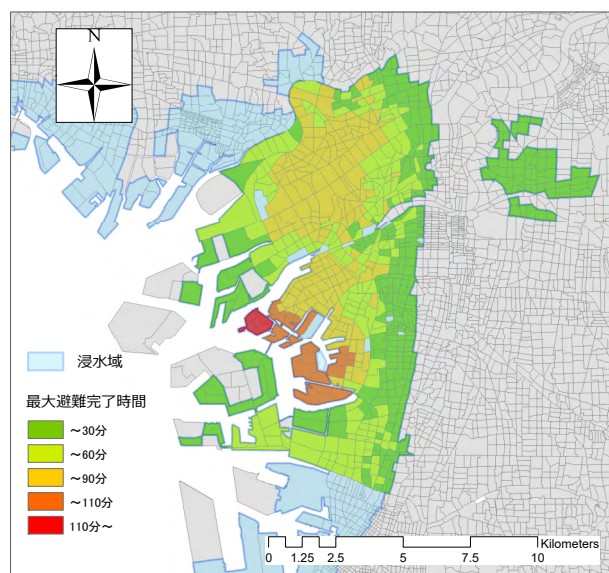


図 9 ソース別最大避難完了時間：津波避難ビルなし

津波避難ビルありの場合では、ほとんどの地域が地震発生から 30 分以内に避難が完了している。また、収容率 75% を上回る津波避難ビルが多く存在し、避難時にほとんどの津波避難ビルが避難場所として機能していることがわかる。これに対して津波避難ビルなしの場合は、30 分以内に

避難完了する地域が著しく減少し、半分以上の地域が避難に 1 時間以上を要していることがわかる。大正区、港区、西淀川区など的大阪湾付近の地域では、浸水域外の点から遠ざかるにつれて避難時間が大きくなる傾向が見られ、津波到達時間に間に合わない地域も存在する。図 8 に示す通り、津波避難ビルを機能させた場合は著しく避難時間が減少していることから、当該地域付近の津波避難ビルは、避難次完了時間の短縮に大きく寄与しているといえる。一方他の地域では、津波避難ビルではなく浸水域外への避難の選択肢もありえる。移動距離が長くなるなど、一概に浸水域外に避難するのが良いとは言えないが、本手法により必要度の高い津波避難ビルがどこかを把握でき、避難計画を策定する上で有益な知見が得られたと言える。

5. まとめ

本研究では、最速フローモデルを使用し、浸水域内の避難者の避難経路の最適化を行った。その結果、都市内滞在者がピークに達する平日の 14 時に地震が発生し、津波避難ビルを使用せず浸水域外へ避難する場合でも、約 85% の帰宅断念者が津波の到達時間内に避難できることなどが確認できた。今後の課題として、今回の最適化の対象に含めなかった帰宅者も対象に加えた、最速フローモデル、シミュレーションモデルを組み合わせた帰宅行動の最適化モデルを実装することなどが挙げられる。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究(A)、JST CREST (JPMJCR1402) 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]

- 1) 大阪市危機管理室、大阪府政策企画部危機管理室：大阪駅周辺における大規模災害時帰宅困難者対策検討会報告書 Ver.2. P4, 2012.
- 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, 4, pp.7-13, 2017.
- 3) L. R. Ford Jr. and D. R. Fulkerson: 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, 59, pp.86-105, 2016.
- 5) A. Takizawa, M. Inoue and N. Katoh: An Emergency Evacuation Planning Model Using the Universally Quickest Flow. The Review of Socionetwork Strategies, 6(1), pp.15-28, 2012.
- 6) 川岸裕、瀧澤重志：道路ネットワークの簡略化による大規模徒歩帰宅シミュレーションの高速化の検討、日本建築学会大会（東北）、2018.
- 7) 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)
- 8) 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)
- 9) 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/kikikanrishi/su/page/0000073235.html> , (2018.9.20 確認)

*1 大阪市立大学工学研究科 前期博士課程

*2 大阪市立大学生活科学研究科 教授、JST CREST, 博士(工)