

# 南海トラフ巨大地震時の大阪市の津波浸水想定域からの

## 二次避難開始時刻の最適化

### Optimization of the Start Time of Secondary Evacuation from the Assumed Tsunami Flooding Area of Osaka City in the Case of the Nankai Trough Mega Earthquake

○田中 陽子\*<sup>1</sup>, 瀧澤 重志\*<sup>2</sup>

Yoko TANAKA \*<sup>1</sup> and Atsushi TAKIZAWA \*<sup>2</sup>

\*1 大阪公立大学大学院生活科学研究科 博士前期課程

Graduate Student, Graduate School of Human Life and Ecology, Osaka Metropolitan University

\*2 大阪公立大学大学院生活科学研究科 教授 博士(工)

Professor, Graduate School of Human Life and Ecology, Osaka Metropolitan University, Ph.D.

キーワード：南海トラフ巨大地震；津波；避難計画；数理計画；スケジューリング問題

Keywords: Nankai trough mega earthquake; tsunami; evacuation planning; mathematical programming; scheduling problem.

#### 1. はじめに

我が国において南海トラフ巨大地震は今後起こるとされる災害の中でも特に重要視されている地震であり、内閣府によって様々な南海トラフ地震対策が打ち出され、合わせて防災対応の検討も進められた。この地震対策では被害想定についても実施されており、被害に津波の襲来が含まれるが、大阪市では西部にある湾岸地域において高い浸水が想定<sup>2)</sup>されていること等(図1)、大阪市においても災害時の津波被害は非常に深刻な問題である。

瀧澤は当時の大阪市立大学と大阪市の共同プロジェクトの一環で、大阪市による二次避難計画の条件下で南海トラフ巨大地震時の二次避難計画の研究<sup>3)</sup>を進めてきた。二次避難計画とは長期的な避難先を必要とする住民が、災害時の緊急避難先である一次避難所から長期避難が可能な二次避難所へ避難する計画のことを指す。本計画では大阪市西部に位置する8区から約30万人の二次避難者が発生

すると想定されている。この研究では大規模な確率シミュレーションや数理計画問題を実装し、各避難所の避難者数や避難者がどの二次避難所へ避難するかの割当てが行われた。この割当てを受け、大阪市の津波浸水WGは多数の図上訓練を実施した。図上訓練とはブロック等で避難列を再現し、地図上に描かれた直径250m程度の六角格子で区切られた平面上で、二次避難場所までの徒歩での所要時間を概算する訓練である。図上訓練ではしばし避難者のグループの衝突が発生し、想定した避難完了時間から遅延する問題が見られ、試行錯誤でスムーズな流れを見つけ出していた。しかし、大阪市全体で図上訓練を実施するのは規模や各区の事情から困難なこと、人力による手間や時間がかかること、交差点の処理が複雑であること等の理由で、様々な条件の比較・検討を十分に行うことは原理的に難しい。

以上より、本研究では二次避難時において大阪市の設定で行われた図上訓練の条件に近い避難シミュレーションをコンピュータ上で実装するとともに、避難グループの二次避難開始時刻の最適化を行うことで、二次避難計画で避難者同士が干渉しないスムーズな移動行動を示し、避難完了時間の短縮を図る避難計画の支援手法を提案する。

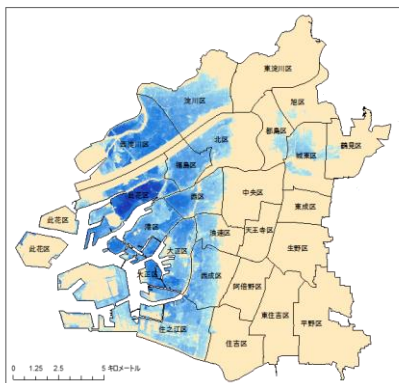


図1 南海トラフ巨大地震時の大阪市浸水エリア



図2 図上訓練の様子

## 2. 既往研究

大規模な避難行動のコンピュータ上のシミュレーションの研究として、例えば廣井ら<sup>4)</sup>は大都市を対象とした帰宅行動シミュレーションの構築を行い、一斉帰宅による中心部と周縁部の混雑発生、大災害時の一斉帰宅において就業者の一斉帰宅抑制効果を明らかにした。また川岸ら<sup>5)</sup>は大地震時における大阪市内の帰宅困難者の大規模な歩行者シミュレーションモデルの開発と分析を行い、淀川にかかる橋梁付近で大きな混雑が発生、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を明らかにした。さらに Takizawa ら<sup>6)</sup>は南海トラフ巨大地震発生時において、大阪市からの津波に対する一時避難と帰宅困難者の徒歩帰宅の同時最適化を動的ネットワークを用いて行い、混雑緩和に対する示唆を得た。

## 3. 研究方法

次の手順で研究を進める。なお 3.2 で図上訓練の設定に準拠した避難シミュレーションを行うが、3.3 の最適化では、大まかなところは図上訓練の設定に従いつつ、出発時刻や避難グループの単位などは、本研究独自に設定する。

### 3.1 避難経路のネットワークデータ化

大阪市西部 8 区（淀川区、西淀川区、福島区、此花区、西区、港区、大正区、西成区）内で設定される一次避難所から、自区域外に設定される二次避難所までの避難経路 155 本の詳細な経路を各自治体から集め、ArcGIS を用いてデータ化した（図 3）。避難経路は、避難に十分な道路幅であること、避難者が歩行可能であることなどを考慮して設定されている。

### 3.2 避難シミュレーションモデルの改良と実施

既往研究<sup>5)</sup>で用いた一人一人の移動行動をモデル化した避難シミュレーションモデルをベースに、それを図上訓

練の設定に近づけるよう修正した。例えば、発災を X 月 1 日とし、2 日目から避難開始で、各日で避難者を避難経路に乗せて二次避難先へ送り出すようにした。避難者は一次避難所ごといくつかの避難グループに分けられており、各避難グループで設定された避難日時を迎えれば、そのグループに割り当てられた避難者が連続的に避難を開始する。すなわちレーン数 2 の範囲で、連続的に避難者をレーンに送り出す設定とした。

加えて、シミュレーションモデルの改良を行った。本避難シミュレーションモデルは交差点等の結節点を模したノードと、それらを結ぶエッジ上にある複数本の歩行用のレーンから構成される一次元歩行者シミュレーションモデル<sup>7)</sup>だが（図 4）、既往研究<sup>5)</sup>ではノード上での歩行者数を制限せず、歩行者が何人でもノードに進入可能な仕様だったため、避難者が干渉した場合、混雑が発生せずすり抜けるという問題があった。そこで本研究では、ノードに進入する歩行者数をレーン同様 2 人までに制限し、交差点での混雑現象を再現できるようにした。

モデルを Visual Studio 2019 の C++言語を用いて実装し、シミュレーションを行った。結果として、日別の総避難時間が平均 15 時間 56 分程度となった（表 1）。特に 4 日目の総避難時間は 20 時間 41 分と長く、仮に朝 5 時に避難を開始したとしても日をまたぐ結果となった。ここで、本シミュレーションによって得られた避難者の平均避難時間を、各経路の経路長を歩行速度で除した値である「理論値」で除して得られた「遅延率」を算出し、避難経路の干渉でどの程度避難時間の遅延が生じたか確認を行った。1.0 を上回る経路は渋滞していることを意味するが、1.10 を上回る経路は合計で 90 本あり、遅延率が高い経路ほど他経路の避難者との干渉で、移動に支障が生じている可能性がある。



図 3 大阪市西部 8 区の避難経路

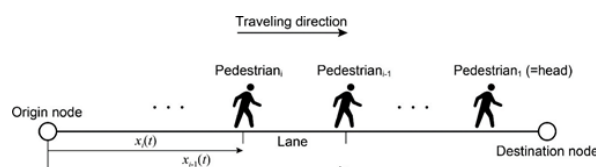


図 4 一次元歩行者シミュレーションモデルのイメージ

表 1 日別の避難時間と遅延率の集計

避難日	避難時間 (時間:分:秒)	1.10 以上の遅延率 (本数/総本数)	最大遅延率
2	13:25:09	1/20	1.12
3	16:06:45	34/63	2.16
4	20:41:51	33/62	2.10
5	17:46:42	8/23	1.70
6	15:22:11	11/23	1.75
7	12:14:59	3/8	1.42
計		90/155	

これが原因で避難グループ同士の避難経路の干渉・交差による混雑が発生し(図5)、避難完了時間に影響が出たと考えられたので、避難グループが干渉しない避難開始時刻の最適化モデルの分析を行った。

### 3.3 避難開始時刻の最適化モデルの開発と実施

3.2を踏まえ、各避難グループの移動がスムーズかつ早く完了するように、各避難グループの避難開始時刻の最適化を数理計画問題として定式化・実装する。数理計画問題とは、社会における課題を数理モデルに置き換え、最適解もしくはそれに近い解を導く方法である。本研究の数理計画問題はスケジューリング問題に属するが、この問題は一部の変数が整数で定義される混合整数計画法で定式化できる。本研究ではそれを数理計画ソルバーの Gurobi Optimizer 9.5.0 の Python API を用いて実装した。

式(1)~式(8)に、二次避難開始時刻を最適化する数理計画問題を記す。変数は表2に示している。本研究では避難開始日の0時0分を基準として、そこから秒単位で各日を通して一回の最適化で、全避難グループの避難開始時刻を同時に最適化している。ただし避難グループの人数は、図上訓練の設定に依らず、こちら独自の設定としている。

$$\text{Minimize} \quad \sum_{g \in G} tz_g \quad (1)$$

$$\text{Subject to} \quad ts_g = tz_g \times \text{TIMESTEP} \quad (\forall g \in G) \quad (2)$$

$$ti_{g,v} = ts_g + \frac{l_{p(g),v}}{\text{SPEED}} \quad (\forall g \in G, v \in U_{p(g)}) \quad (3)$$

$$to_{g,v} = ti_{g,v} + \frac{\left(\frac{|g|}{\text{COL}} - 1\right) \times \text{INTERVAL}}{\text{SPEED}} \quad (\forall g \in G, v \in U_{p(g)}) \quad (4)$$

$$ts_g \geq to_{g-1,vs_{p(g)}} + \text{MERGIN} \quad (\forall g \in G) \quad (5)$$

$$ti_{f[0],f[2]} \geq to_{f[1],f[2]} + \text{MERGIN} \cup to_{f[1],f[2]} + \text{MERGIN} \leq ti_{f[1],f[2]} \quad (\forall f \in FO) \quad (6)$$

$$ti_{f[0],f[2]} \geq to_{f[1],f[2]} + \text{MERGIN} \cup to_{f[0],f[3]} + \text{MERGIN} \leq ti_{f[1],f[3]} \quad (\forall f \in FR) \quad (7)$$

$$\left( LS_{p(g),d_0} \leq ts_g \cap to_{g,ve_{p(g)}} \leq LE_{p(g),d_0} \right) \cup \left( LS_{p(g),d_1} \leq ts_g \cap to_{g,ve_{p(g)}} \leq LE_{p(g),d_1} \right) \cup \dots \quad (\forall g \in G, d_0, d_1, \dots \in \text{DAY}_{p(g)}) \quad (8)$$

式(1)は目的関数で、各避難グループの出発時刻の合計の最小化を目的としている。式(2)以降は制約条件である。式(2)は秒単位からきりの良い避難開始時刻とする制約、式(3)(4)は必要なノードにおける各グループの進入・通過時間の計算、式(5)は避難経路が同じ避難グループが存在する場合に出発時間をずらす制約、式(6)(7)は干渉(順行・交差)・(逆行)のノードの通過時間の制約、式(8)は各グループが何れかの日の指定時間内で避難する制約である。

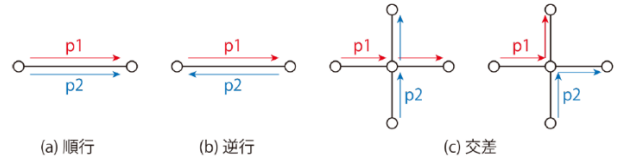


図5 経路 p1,p2 の干渉状態

表5 変数の定義

$P$ : 避難経路の集合
$G$ : 避難グループ(同じ避難経路を通るいくつかに分割された避難者のグループ)の集合
$G_p \subset G$ : 避難経路 $p \in P$ の避難グループの集合
$p(g)$ : 避難グループ $g \in G$ の避難経路を返す関数
$g-1 \in G_p$ : $p \in P$ に避難グループが2つ以上ある場合、 $g \in G_p$ よりも直前で早く出発する避難グループ
$V$ : 道路ネットワークのノードの集合
$V_p \subset V$ : 避難経路 $p \in P$ が通過するノードの集合
$FO$ : 干渉(順行・交差)クラスターの避難経路ペア $p, q \in P$ と開始(交差)ノード $v \in V$ からなるタプル集合 $(p, q, v)$ .
$FR$ : 干渉(逆行)クラスターの避難経路ペア $p, q \in P$ と、 $p$ から見た開始・終了ノード $v, w \in V$ からなるタプル集合 $(p, q, v, w)$ .
$U \subset V$ : 道路ネットワークのノードの集合のうち、最適化計算に必要な、始点、終点、干渉ノードの集合。
$U_p \subset U$ : 避難経路 $p \in P$ における $U$ .
$ g $ : 避難グループ $g \in G$ の避難者数
$l_{p,v}$ : 避難経路 $p \in P$ の始点からノード $v \in V$ までの距離
$tz_g \in \{0, 1, 2, \dots\}$ : 避難グループ $g \in G$ の出発時刻(非負の整数)
$ts_g$ : 避難グループ $g \in G$ の出発時刻(実時間、浮動小数点)
$ti_{g,v}$ : 避難グループ $g \in G$ がノード $v \in V$ に到達する時刻
$to_{g,v}$ : 避難グループ $g \in G$ がノード $v \in V$ を通過しきる時刻
$vs_p \in V$ : 避難経路 $p \in P$ の始点ノード
$ve_p \in V$ : 避難経路 $p \in P$ の終点ノード
$\text{TIMESTEP}$ : 出発時間のきりのよい間隔(10分間隔)
$\text{MERGIN}$ : 余裕時間(5分間隔)
$\text{SPEED}$ : 歩行速度(m/s)(時速1.5km/1.025)
$\text{INTERVAL}$ : 歩行者の間隔(2m)
$\text{COL}$ : 歩行者の列数
$\text{DAY}_p = \{\dots, 1, 2, \dots\}$ : 避難経路 $p \in P$ が避難可能な日
$LS_{p,d}$ : 避難経路 $p \in P$ の $\text{DAY}_p$ における出発時刻の下限(0日の0:00からの累積)
$LE_{p,d}$ : 避難経路 $p \in P$ の $\text{DAY}_p$ における到着時刻の上限(0日の0:00からの累積)

## 4. 最適化

最適化の前提として、出発時刻を5分間隔で行う、各出発区の一次避難所の浸水状況の変化(図6)を考慮し避難グループの避難開始日時を設定する、避難グループの構成人数を1000人、1500人、2000人に設定する、各日の避難

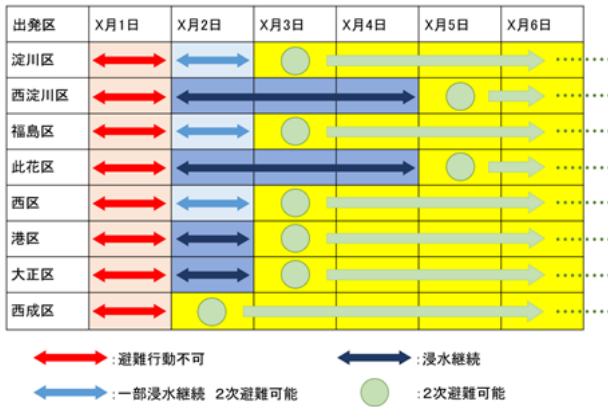


図6 各出発区の浸水状況の変化

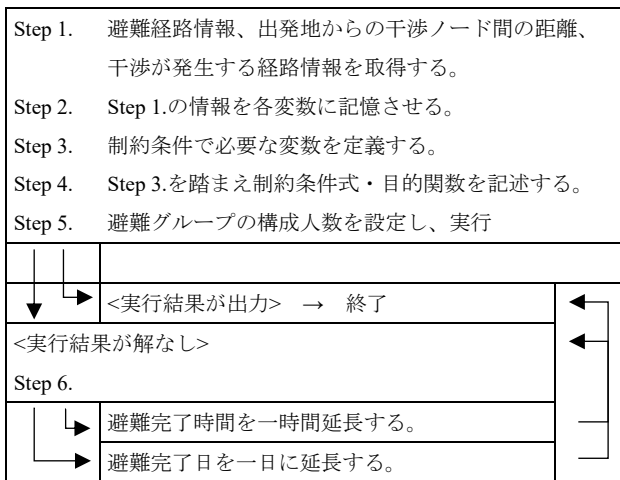


図7 最適化のフロー

表3 2000人グループの避難時間:7日終了、6~21時

日	グループ数	総避難完了時刻	総避難時間
2	25	16:46:56	10:46:56
3	94	20:54:36	14:54:36
4	28	20:59:52	14:59:52
5	57	20:59:34	14:59:34
6	15	20:41:41	14:41:41
7	6	20:54:21	14:54:21
225			

表4 1000人グループの避難時間:8日終了、6~20時

日	グループ数	総避難完了時刻	総避難時間
2	37	17:30:56	11:30:56
3	127	19:55:39	13:55:39
4	49	19:48:32	13:48:32
5	81	19:55:04	13:55:04
6	46	19:55:41	13:55:41
7	19	19:58:00	13:58:00
8	9	18:17:15	12:17:15
368			

時間の終了時間を制限することとした。最適化で実行可能解が得られるかどうかは上記設定に依存するので、図7に示すフローによって最適化を行った。

例として避難グループの人数を2000人、1000人として最適化を行い、その出発時刻に基づいて避難シミュレーションを行った結果を表3,4に示す。7日目で避難完了すること、今回は少数のグループでまとまった避難行動がしやすいことから2000人グループの結果を採用した。この結果と図上訓練設定でのシミュレーション結果を比較すると、図上訓練設定では7日目の避難完了ではあるが総避難時間の長期化が目立った。本研究では同じ7日目の避難完了で指定の避難時間に収めるように設定を行い、6時~21時にグループの干渉が発生しない避難行動が可能となった。

### 5. まとめ

大阪市において南海トラフ巨大地震の津波被害で発生しうる二次避難者を、避難者同士が干渉せず避難先までスムーズに徒歩移動できる避難計画のために、図上訓練を模した避難シミュレーションモデルを開発するとともに、避難グループ単位での避難開始時刻の最適化問題を定式化した。そしてケーススタディを行い、設定された条件を満足する二次避難計画を策定できることを確認した。

### 謝辞

本研究は、大阪市湾岸5区事務局、大阪市危機管理室、大阪市立大学地域連携センター、大阪市立大学CERDと連携して行われました。また科研費基盤研究(B)(19H04068)の補助を受けています。

### [参考文献]

- 1) 内閣府政府統括官(防災担当), “南海トラフ巨大地震の被害想定について(建物被害・人的被害)”, [https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku\\_wg/pdf/1\\_sanko2.pdf](https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/pdf/1_sanko2.pdf), R1-6月, (参照日:2022-09-21)
- 2) 大阪市, 大阪市域津波浸水想定, <https://www.city.osaka.lg.jp/kikikanrishitsu/cmsfiles/contents/000/0231/231112/03besshi2.pdf>, (参照日 2022-09-21)
- 3) 瀧澤重志、南海トラフ巨大地震で被災が予想される大阪市内の住民の2次避難所への割り当て、令和3年度日本建築学会近畿支部研究発表会、2021
- 4) 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),5\_111-5\_126,2016
- 5) 川岸裕、瀧澤重志、大地震時を想定した大阪市内からの一斉徒歩帰宅シミュレーション、都市防災研究論文集,004,7-13,2020
- 6) A.Takizawa and Y.Kawagishi, Optimization of Evacuation and Walking-Home Routes from Osaka City After a Nankai Megathrust Earthquake Using Road Network Big Data, Sublinear Computation Paradigm pp 369-389, 2021
- 7) 山下倫央ほか、一次元歩行モデルを用いた高速避難シミュレータの開発とその応用、情報処理学会論文誌 53(7)、1732-1744、2012