

自動車利用を考慮した 津波避難計画モデルの構築

中川 貴文¹・中村 俊之²・嶋本 寛³・宇野 伸宏⁴

¹正会員 関西電力株式会社 (〒530-8270 大阪市北区中之島3丁目6番16号)

E-mail:its.nakagawa0612@gmail.com

²正会員 京都大学大学院

E-mail:nakamura@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学大学院

E-mail:shimamoto@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

⁴正会員 京都大学経営管理大学院

E-mail:uno@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

平成23年3月11日に起こった東北地方太平洋沖地震による津波被害を契機として、今まで大規模な津波災害は起こらないと考えられていた大阪湾沿岸部の地域でも津波災害に対する避難手段や避難方法等の検討が必要となった。例えば、津波災害時の避難方法は内閣府中央防災会議によると、「自動車による避難は渋滞や事故の恐れがあり、原則禁止」と提言していたが、東北地方太平洋沖地震後の内閣府の調査の結果、生存者の6割が自動車で避難していたことを受けて、自動車が避難に役立った面も否定できないため、避難方法は「原則徒歩」と改められている。

そういった中で、本研究では津波避難と自動車利用に着目し、大阪湾沿岸部を対象としたときに、避難者が津波襲来までに避難するにあたって、どの程度自動車利用が可能であるのかを考慮した数理計画的アプローチとして、津波避難計画モデルを構築した。また、構築した避難計画モデルを適用し、避難者全体の避難が最小時間となる時間ならびに自動車利用率を算出した。

Key Words : *tsunami, evacuation planning, vehicle use, Osaka bay area*

1. はじめに

平成23年度3月11日に起こった東北地方太平洋沖地震による津波災害を契機として、従来の津波に対する考え方が改められ、今まで大規模な津波災害は起こらないと考えられていた大阪湾沿岸部の地域でも津波災害への対策を講じることが必要になってきた¹⁾。大阪湾沿岸部のような都市規模の大きい地域で、津波災害からの避難を一斉に行うとなると、多くの人々が道路に溢れかえることが懸念される。津波災害時の避難方法は内閣府中央防災会議によると、「自動車による避難は渋滞や事故の恐れがあり、原則禁止」と提言していたが、東北地方太平洋沖地震後の内閣府の調査の結果、生存者の6割が自動車で避難していたことを受けて、自動車が避難に役立った面も否定できないため、避難方法は「原則徒歩」と改められた⁴⁾。これらを踏まえると、津波災害からの避難の際に自動車を利用した避難がどの程度許容されるの

か、あるいは自動車による避難でどのような問題が生じるかを事前に把握しておくことは、行政側が避難計画や防災計画をお策定する上で、極めて重要だと考えられる。また、東北地方太平洋沖地震による災害犠牲者の多くは、高齢者をはじめとする災害時要援護者などで占められており³⁾、これらの人々の避難場所、避難方法等の検討、対策は僅々の課題であると言える。

そこで本研究では、避難手段として自動車利用を考慮し、災害時要援護者（以下、要援護者と記載）に焦点を当てた、避難計画モデルを構築し、適用することで自動車利用がどの程度許容されるのかを把握することを目的とする。また、大阪沿岸部の地域を対象として、新たな避難施策の提案を行い、モデルに適用することで、計算結果の検証を行った。

本研究の成果を考察し、知見を得ることにより、行政などが津波避難に対する避難施策・避難計画を作成する際の一助となることが期待される。

2. 研究対象地域

本研究では、標高データや内閣府の中央防災会議の資料を元に、大阪湾沿岸部の地域の一つである大阪市港区（以下、港区と記載）を対象エリアとして選定した。

(1) 避難人口

地震が発生した場合に、港区のどの場所に避難人口が存在しているか把握するため、本研究では、港区を250mメッシュに区切り、メッシュ単位で避難人口を把握することとした。そのもとに避難人口は以下の式1で算出する。なお、避難の算出には国勢調査データとパーソントリップ（PT）調査データを用いた。特に、国勢調査データによりメッシュ別の居住人口を、PT調査データよりメッシュ別の流出入人口を算出した。

$$\begin{aligned} \text{メッシュ別避難人口} &= \text{メッシュ別居住人口} \\ &- \text{メッシュ別流出口人口} \\ &+ \text{メッシュ別流入人口} \end{aligned} \quad \text{式1}$$

図1に平日12時のメッシュ別避難人口分布を示す。港区内での避難人口はメッシュ別に異なっていることが分かる。港区の総避難人口として、平日12時の段階で90,910人と大規模な人数であり、地震が起こった際、これらの人々が一斉に避難すると大規模な混乱が起こることが想定される。

(2) 避難可能容量

港区において津波災害が起こった際に、避難することが可能な施設がどの程度存在しているのかを把握を行った。施設データとして、大阪市が津波等の発生時に避難施設として設定している施設のうち、公共施設のデータを利用した。これは民間施設の利用時間が限定的であることや、施設容量が公共施設の施設容量と比較して非常に小さいものが多かったためである。図2に港区の津波避難施設の場所、表1に各津波避難施設の避難可能容量の詳細データを示す。

図2より、港区には比較的色々な場所に津波避難施設が点在していることが確認できる。また、津波避難のための公共施設には、合同庁舎、公舎などの施設が含まれるものの、港区の小学校、中学校、高等学校といった学校が大半を占めている。また、公共施設を中心とした港区内の避難可能容量の合計は43,255人分であり、港区の避難人口（およそ9万人）に対して不足しており、港区内に避難場所を限定することで避難施設が足りなくなる可能性も考えられる。

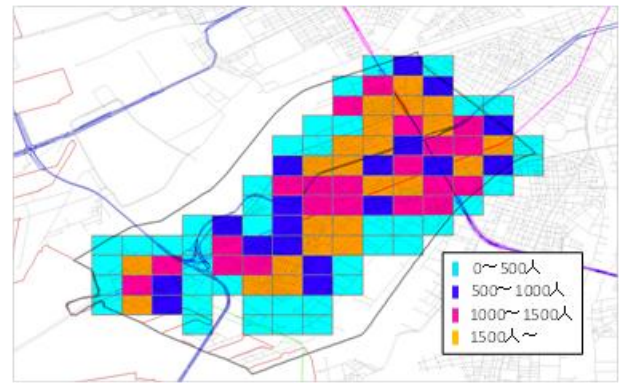


図1 メッシュ別避難人口分布（平日12時）



図2 港区の津波避難施設場所と避難所番号

表1 各津波避難施設の避難可能容量

避難場所番号	避難場所名称	避難可能容量(人)
1	教育センター	750
2	朝潮橋職員公舎	608
3	大阪市中央体育館(屋上緑地部)	3375
4	大阪港湾合同庁舎	750
5	大阪税関監視部庁舎	350
6	池島南	1707
7	八幡屋宝町	494
8	八幡屋宝町第3	701
9	港高等学校	3687
10	市岡高等学校	2129
11	市岡商業高等学校	2392
12	市岡中学校	1627
13	市岡東中学校	1836
14	港中学校	1944
15	港南中学校	2482
16	築港中学校	1793
17	波除小学校	1882
18	弁天小学校	2349
19	磯路小学校	1388
20	南市岡小学校	1211
21	市岡小学校	1729
22	田中小学校	1127
23	三先小学校	1372
24	池島小学校	1894
25	八幡屋小学校	1453
26	港晴小学校	1185
27	築港小学校	1040

(3) 道路ネットワーク

港区の道路ネットワークの特徴を示し、それを踏まえて、避難を行う際にはどのような問題点があるかを示す。本研究で利用する道路ネットワークを図3に示す。

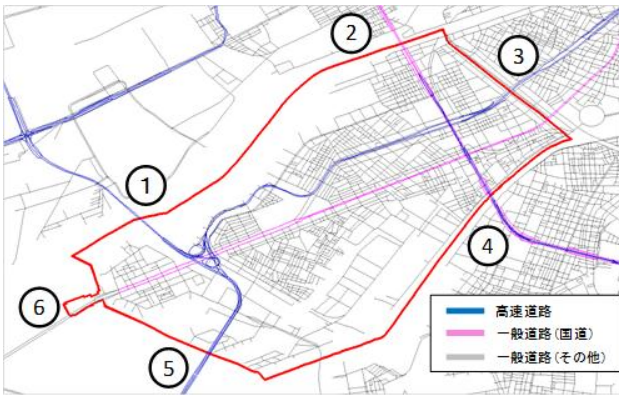


図3 港区の道路ネットワーク

港区には高速道路，一般道路（国道）や一般道路（その他）など，異なる規格の道路が存在している．なお，港区から発生する避難人口に対して，避難率が高い場合には港区内の避難可能容量が足りていないため，津波避難を行う際には，一定数が港区外へ避難することが必要である．港区外へ避難する経路としては，図3に示した①～⑥の各方面が存在するが，震度5以上の地震が起こった場合には，高速道路は点検のためストップし，入路閉鎖すると報告されていることから，①や⑤の高速道路を利用する経路から港区外へは避難することができない．各区の避難容量と想定される避難者数について今後精査する必要があるが，②の方面から此花区の方へ避難する道路や⑥の南港方面へ避難する道路，あるいは④の方面から大正区の方へ避難する道路は，津波災害からの避難と考えると，避難する方向として適切ではないと考えられる．

これらのことを考慮すると，港区外へ避難する人は内陸に向かう③の方面の道路に向かわなければならないと考えられる．③の方向に避難する場合には，国道や主要地方道の比較的規格の大きな道路も存在しており，比較的避難しやすいことも考えられるが，避難者が一斉に避難した場合には，大規模な混雑が起こることも予想される．

3. 津波避難計画モデルの構築

津波避難の際にどの程度の自動車利用が許容され得るのか，また，高齢者などの災害発生時の要援護者は，どの程度自動車に同乗して避難すべきであるのかに焦点を当てた規範的な避難計画モデルを提案する．以下では，避難計画モデルの定式化を行うとともに，その考え方を示し，モデルの枠組みについて説明する．

(1) 津波避難計画モデル構築の前提条件

モデル構築にあたって，以下の前提条件をおく．

- 避難手段は自動車，徒歩の2つの交通モードとする．

- 地震発生の際，建物の崩壊などによる道路の途絶や交通事故は発生していないものとする．
- 自動車の平均乗車人数 λ は一律1.5人/台，最大乗車人数 λ_{max} は一律5.0人/台とする．
- 避難時の徒歩速度は，国土交通省の東日本大震災の避難実態による調査資料⁹⁾を元に，自律避難可能者の避難速度 $v^{ph}=2.38\text{km/h}$ ，要援護者の避難速度 $v^{pd}=1.66\text{km/h}$ と設定する．
- 地震発生後，津波からの避難する人の避難率を0.4と設定している．これは東日本大震災時における避難率を適用したものである．

(2) 避難人口の考え方

上述の徒歩による避難時の速度を考慮しつつ，避難方法として自動車による避難，徒歩による避難を考えると，避難人口は次の3パターンとして設定される．

- ① : 徒歩で避難する自律避難可能者数 x_r^{ph}
- ② : 徒歩で避難する要援護者数 x_r^{pd}
- ③ : 自動車での避難者数（自立避難可能者，災害時要援護者） x_r^c

本研究では，自律避難可能者の定義として「4歳～74歳の港区に存在している人」とし，要援護者の定義として「0～4歳未満，75歳以上の港区に存在している人」とする．以下では，避難人口をこの3パターンに分ける仮定について，詳細に説明する．

【STEP_1】

避難人口発生ノード r において，自律避難可能者 X_r^h と災害時要援護者（以下，要援護者） X_r^d がそれぞれ存在する．

【STEP_2】

まず，自律避難可能者について考える．図4のように，自律避難可能者は ρ' の割合が自動車によって避難し，残りが徒歩で避難すると考えられる．すなわち， ρ' は自律避難可能者のうち，自動車を利用して避難する人の割合を表す政策変数である．

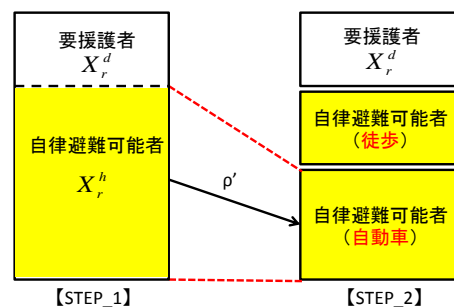


図4 【STEP_1】から【STEP_2】への考え方

【STEP_3】

次に、要援護者について考える。本研究では、要援護者は自らで自動車を運転し、避難することができないものとする。つまり、要援護者が自動車によって避難しようとする場合、自律避難可能者が運転する自動車に同伴することが必要となる。これらを模式的に示したのが、図5である。要援護者は ρ の割合で、自律避難可能者の運転する自動車に同伴し、自動車による避難を行い、残りの要援護者は徒歩による避難を行う。

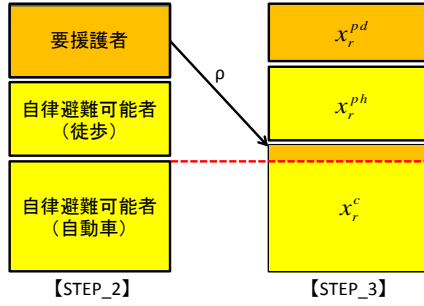


図5 【STEP_2】から【STEP_3】への考え方

以上により、最終的に避難人口発生ノード r から発生する3パターンの避難人口はそれぞれ、以下の式2~式4で計算される。

$$\begin{aligned} \textcircled{1} & : x_r^{ph} = (1 - \rho') \cdot X_r^h && \text{式2} \\ \textcircled{2} & : x_r^{pd} = (1 - \rho) \cdot X_r^d && \text{式3} \\ \textcircled{3} & : x_r^c = \rho' \cdot X_r^h + \rho \cdot X_r^d && \text{式4} \end{aligned}$$

(3) 避難所の考え方

港区内の避難場所については、前章の(2)で示した各避難場所を利用する。ただし、避難容量の問題から、港区内の人が港区外へ避難する必要性が生じることから、港区外にも避難場所を設置した。具体的には、港区外に避難する場合には、避難者の避難方向として、図3③の方面へ避難することを想定し、港区外に出るノードに対して、避難所容量を与えた。具体的には、国道、主要地方道、指定市主要道路から港区外に出ているノードであれば、一律に5,000人の容量、その他道路から港区外に出ているのであれば、一律に1,000人の容量を与えた。

(4) 避難所選択の考え方

本研究では避難者の避難所選択は、「避難所までの距離 l_{rs} 」と「避難所の避難可能容量 y_s 」によって決定するものとして考えており、ある人口発生ノード r からある避難所ノード s を避難所として選択する確率 Q_{rs} は以下の式5ように表現した。

$$Q_{rs} = \frac{\exp(\alpha \cdot l_{rs} + \beta \cdot y_s)}{\sum_{s \in Z} \exp(\alpha \cdot l_{rs} + \beta \cdot y_s)} \quad \text{式5}$$

ここで、 α は最短距離 l_{rs} 、 β は避難所容量 y_s に関するパラメータである。上記で示したように、避難者には3パターン存在するが、徒歩で避難する人であれば、距離の遠い避難所へ避難することは難しい。そこで、徒歩で避難する自律避難可能者の避難所選択確率 Q_{rs}^{ph} には上限4000m、徒歩で避難する要援護者の避難所選択確率 Q_{rs}^{pd} には上限2000m、自動車で避難する人の避難所選択確率 Q_{rs}^c には同一ノードではなく、別ノードへの避難を行うという制約条件を設けた。

(5) 避難所要時間の考え方

徒歩避難者の場合、避難距離 l_{rs} を本研究で設定した自律避難可能者、要援護者それぞれの徒歩速度 v^{ph} 、 v^{pd} で除した値で自律避難可能者、要援護者の避難所要時間 t_{rs}^{ph} 、 t_{rs}^{pd} をそれぞれ算出する。

具体的には、自動車による避難者の場合、利用者均衡配分の考え方を用いて⁹⁾、各リンク所要時間を求め、その後、避難者の通った経路のリンク所要時間の和を取ることで自動車所要時間 t_{rs}^c を算出した。

(6) 制約条件

(a) 自動車の容量制約

要援護者で自動車により避難する人は、自分で自動車を運転することはできず、自律避難可能者の運転する自動車に同伴させてもらうことを前提としている。このため、同伴させてもらう要援護者数は、自動車の最大乗車人数を超えないことを満たしている必要がある。あるノード r から避難する自動車台数 N_r^c は自律避難可能者から自動車で避難する人数を平均乗車人数 λ で除した値で示される(式6)。自動車の最大乗車人数 λ_{max} を用いて、要援護者数が自動車の最大容量を越えないための制約条件が式7で表される。

$$N_r^c = X_r^h \cdot \rho' \cdot \frac{1}{\lambda} \quad \text{式6}$$

$$0 \leq \rho \cdot X_r^d \leq (\lambda_{max} - \lambda) \cdot N_r^c \quad \text{式7}$$

(b) 避難所の容量制約

あるノード r から発生する3パターンの避難人口から避難所ノード s へ避難する人口は、それぞれ以下の式8~式10で示される。

$$\textcircled{1} : x_{rs}^{ph} = (1 - \rho') \cdot X_r^h \cdot Q_{rs}^{ph} \quad \text{式8}$$

$$\textcircled{2} : x_{rs}^{pd} = (1 - \rho) \cdot X_r^d \cdot Q_{rs}^{pd} \quad \text{式9}$$

$$\textcircled{3} : x_{rs}^c = (\rho' \cdot X_r^h + \rho \cdot X_r^d) \cdot Q_{rs}^c \quad \text{式10}$$

避難所ノード s へと避難する人口が避難所ノード s の避難所容量を超えないための制約条件が式11で表される。

$$\sum_{r \in Z} (x_{rs}^c + x_{rs}^{ph} + x_{rs}^{pd}) \leq y_s \quad \text{式11}$$

(7) 目的関数

避難計画モデルの目的関数は、以下の式12とする

$$\min \sum_{r \in Z} \sum_{s \in Z} (x_{rs}^{ph} \cdot t_{rs}^{ph} + x_{rs}^{pd} \cdot t_{rs}^{pd} + x_{rs}^c \cdot t_{rs}^c) \quad \text{式 12}$$

この目的関数の意味合いとしては、「総避難人数・時間」を最小化することである。また、避難計画モデルの決定変数 ρ' と ρ を政策変数として設定した。つまり、本研究で提案した避難計画モデルは、「総避難人数・時間」を最小化を目的として、自律避難可能者の避難時の自動車利用率と要援護者の自動車への同伴率を算出する数理計画モデルである。

4. 避難計画モデルの適用パターンの設定

本研究では、時間区分、避難所選択をキーワードに、避難計画モデルに2つの適用パターンを設定する。

- 時間区分別にモデルを適用
- 避難所選択確率のパラメータを変化させた場合にモデルを適用

以下より、2つの適用パターンについて詳細を述べる。

(1) 時間区分別にモデルを適用

津波からの避難を考えるにあたっては、地震が起こったのが、いつ、何時なのかによっても、その避難状況は異なるものと考えられる。それは、地震が発生したのが、平日の場合や休日の場合、あるいは日中の場合や夜間の場合によって、港区内に存在する避難者数は異なるためである。そこで、避難計画モデルを適用するにあたっては、平日・休日・夜間の3つの時間区分別に政策変数の最適値（以下、最適化変数と呼称）に、差異があるのかを考察する。また、休日・夜間の時間区分における避難人数は、平日の場合と同様の方法で算出を行った。

(2) 避難所選択確率のパラメータを変化させた場合でのモデルの適用

避難計画モデルを計算する上で、避難所選択確率のパラメータ α, β の値は本研究では、既知の値として与えており、このパラメータ α, β を変化させることで、避難者は距離と避難所容量をどの程度考慮して、避難者を選択しているのかが変化する、すなわち、避難者のODが変化する。そこで、パラメータ α, β を変化させた場合に、避難計画モデルの最適化変数や避難時間にどのように影響を与えるのかについて考察する。

5. 避難計画モデルへの適用結果

(1) 時間区分別でのモデルの適用

避難所選択確率のパラメータを $\alpha = -0.0001$ 、 $\beta = 0.0007$ に設定し、モデル適用した結果、時間区分別の最適化変数は以下の表2のようになった。

表2 各時間帯の最適化変数

	平日	休日	夜間
自動車利用率 : ρ'	0.4	0.4	0.4
要援護者同伴率 : ρ	1.0	1.0	1.0

どの時間区分においても、最適化変数は同一値を取っており、自動車利用率が0.4、要援護者同伴率が1.0という結果となっている。つまり、港区から避難を行うことを想定した場合、自動車の利用の許容割合は4割となった。4割を超える人に自動車が利用されると目的関数、すなわち、総避難人数・時間（以下、目的関数と記載）の値が増加。また、要援護者の同伴割合は10割であり、要援護者は徒歩避難ではなく、自律避難可能者の運転する自動車に、すべての要援護者を同伴させることで、目的関数の値は最小となるという知見が得られた。次に、図6に各時間区分別の避難者全体の経過時間別避難率を示す。

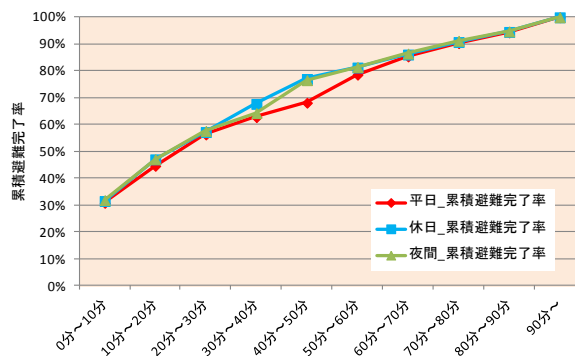


図6 経過時間別累積避難完了率

図6より、平日・休日・夜間の3つの時間区分で同様の傾向が見られ、時間が経過するとともに、避難所への到達割合が高くなることから分かる。どの時間区分においても、避難を完了するまでに90分以上を要する避難者も7%ほど存在していることも見て取れる。なお、内閣府中央防災会議¹⁾では、港区においては、南海トラフに伴う津波到達時間は、120分と公表されている。時間別の避難完了率では、30分~40分、40分~50分に一部差異が見て取れる。これは平日の避難人口が一番多く、より遠くの避難所を選択する人が多いためと考えられる。

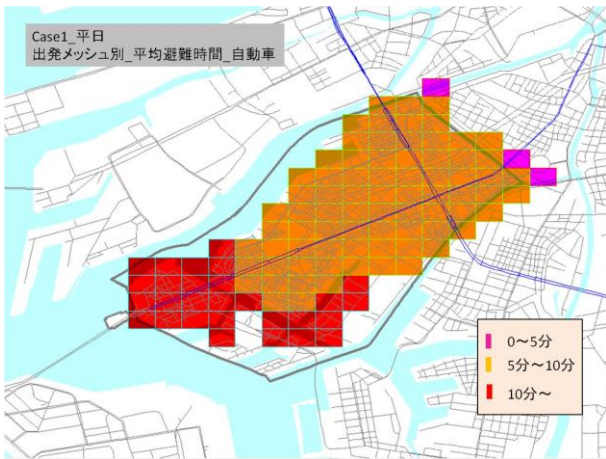


図7 メッシュ別平均避難時間（平日・自動車）

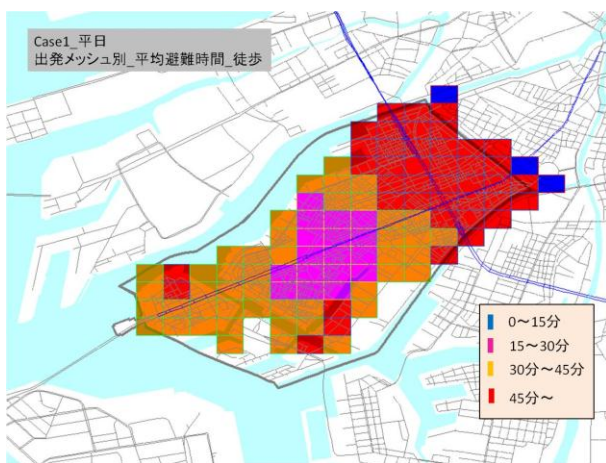


図8 メッシュ別平均避難時間（平日・徒歩）

図7、図8に、メッシュ別平均避難時間を平日自動車、徒歩のみ示す。図7で示されるように、自動車避難者の平均避難時間は大きく3つのエリアに分割されていることが分かる。特に、赤色のエリアでは、他のエリアと比べて自動車の平均避難時間が大きくなっている。これは、赤色のエリアは港区の湾岸エリアであり、港区外の内陸エリアへ避難するには避難距離が長く、それに伴い避難時間を要しており、結果として赤色エリアの平均避難時間が大きくなってしまったと考えられる。

図8より、エリアによって、徒歩避難者の平均避難時間の分布に特徴があることが分かる。特に、港区の中心部付近のエリアでは、平均避難時間が15分～30分と他のエリアと比べて、短いことが分かる。一方で、内陸部の赤色のエリアの平均避難時間は45分以上と他のエリアと比べて大きくなっているが、これは、港区外の避難所へ徒歩での避難者が多く、そのため、避難時間が大きくなってしまったことの影響であると考えられる。

(2) 避難所選択確率のパラメータを変化させるケース
 避難所選択確率のパラメータは以下の表3のように変

化させた場合にモデル適用結果を分析する。具体的には、避難所容量に関するパラメータを固定した上で、避難距離に関するパラメータを変化させていることから、避難距離が避難所選択に与える感度を分析することとなる。

表3 避難所選択確率パラメータの設定

ケース番号	α	β
ケース1	-0.0001	0.0007
ケース2	-0.0002	0.0007
ケース3	-0.0003	0.0007

表4 各ケースの最適な政策変数

ケース番号	自動車利用率	自動車同伴率
ケース1	0.4	1.0
ケース2	0.5	1.0
ケース3	0.6	1.0

表4は、政策変数の自動車利用率と自動車同伴率の値が各ケースで、どのように変化しているのかを示した結果であり、各ケースで、要援護者の自動車同伴率は同じ値1.0となった。これは、全体の目的関数の値を最小とするためには、すべての要援護者を自動車に同伴させることが必要であることを示している。

また、自動車利用率は、各ケースで異なり。避難所選択確率パラメータの避難距離に関する項所選択である α の絶対値が大きくなれば、自動車利用率が増加していく傾向が見られた。

避難人数・時間(分)

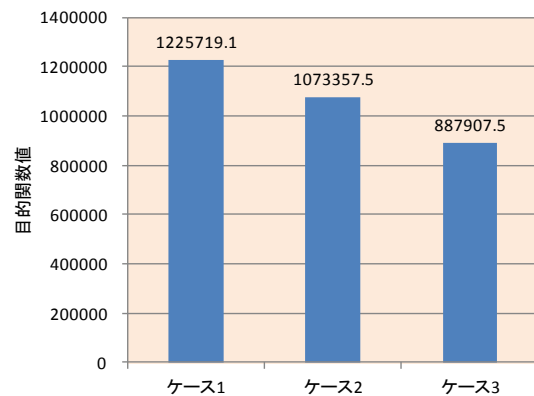


図9 各ケースの目的関数値の変化

図9はケース別の目的関数の最小値を示しており、避難所選択確率のパラメータ α の絶対値が大きくなるに従い、目的関数の最小値は減少傾向を示している。つまり、避難所選択確率の避難距離のパラメータを大きくすれば、相対的に距離の近い避難所を選択する傾向が高まり、その結果、総避難時間という目的関数の値は小さくなると考えられる。避難計画を考えるにあたっては、各避難者の避難距離についても考慮することも重要な視点といえる。

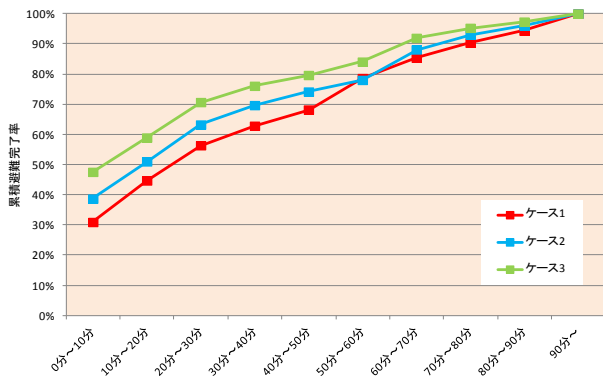


図10 各ケースの経過時間別_累積避難完了率

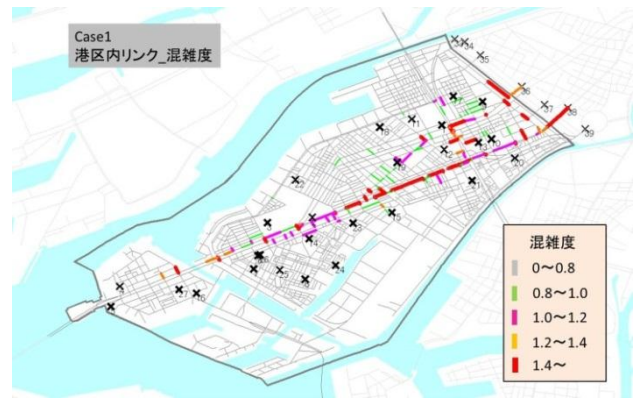


図12 港区道路ネットワークの混雑度 (ケース1)

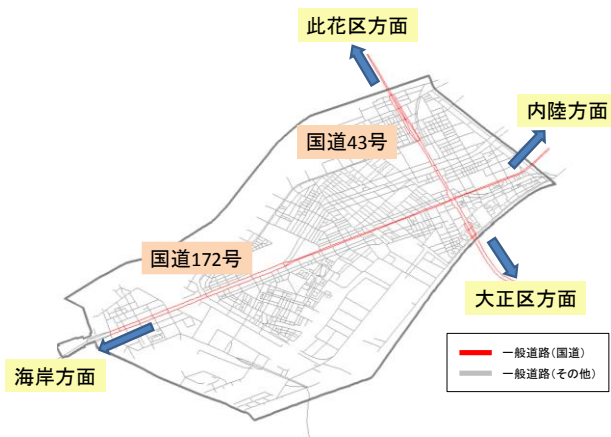


図11 港区の道路ネットワーク

図10は経過時間別_累積避難完了率である。累積避難完了率は、どのケースにおいても、時間の経過とともに上昇する。例えば、避難者のうちの7割が避難を完了するのが、ケース1では40分~50分を要するのに対して、ケース3では20分~30分であり、概ね2倍の時間を示していることとなる。各ケースですべての避難者が避難を完了するのは、90分以降となっており、同じ程度の時間で避難が完了している。しかし、0~10分の段階では、ケース3の場合、累積避難完了率が50%近いのに対して、ケース1の場合では、累積避難完了率は30%に留まっている。また、ケース3の場合では、累積避難完了率が70%を超えるのが、20分~30分の間なのに対して、ケース1の場合では50分~60分の時間を要している。これは、 α の絶対値が大きくなると避難距離の短い避難所を選択するためであり、避難所選択確率のパラメータ α の値によって、避難時間完了までの分布にも違いが生じていることが分かる。

次に、港区内の道路ネットワーク上において、どの道路に自動車が集まっているか可視化した形で把握する。図11に港区の道路ネットワークを改めて確認する。港区には2本の国道が走っており、港区から此花区方面や大正区方面に向かう道路が国道43号、内陸方面や海岸方面に向かう道路が国道172号である。

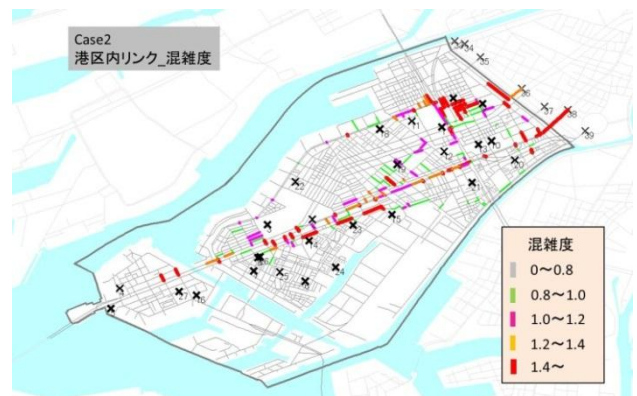


図13 港区道路ネットワークの混雑度 (ケース2)

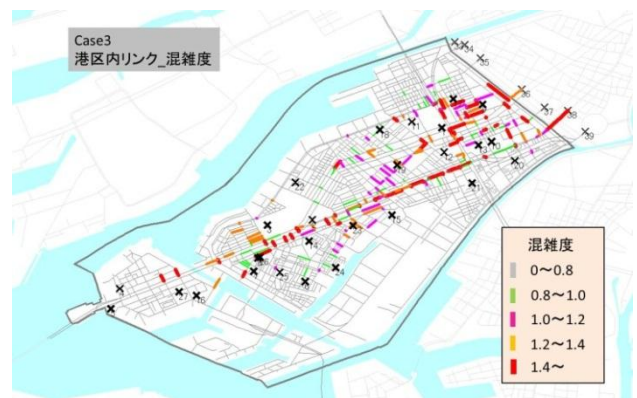


図14 港区道路ネットワークの混雑度 (ケース3)

可視化にあたって、道路の混雑状況を表す指標として、道路混雑度を用いている。なお、混雑度はリンク自由流旅行時間に対するリンク旅行時間の比率である。図12~図14がそれぞれ、ケース1~ケース3の場合の道路ネットワークの混雑度に対応している。

図12より、港区全体を見ると、混雑度が高い値を示すリンクは、それほど多くないことが分かる。混雑度は、港区の概ねの道路リンクが0~0.8である。その中で、特定のリンクの混雑度が高い様子が分かる。具体的には、国道172号は高い混雑度を示しており、規格の高い道路に自動車が集まっている。また、港区外の36番や38番の避難所に接続するリンクは混雑度が1.4を超えており、

渋滞が発生し、避難に時間を要することが懸念される。

図 13 より、ケース 1 の場合と比較して、混雑するリンクに差異が生じている様子が分かる。ケース 1 の場合では、国道 172 号において、混雑度が高いリンクが多数存在していたが、ケース 2 の場合では、依然として混雑度が高いリンクもあるものの、ケース 1 に比べると国道 172 号の混雑度は小さいリンクが多くなっている。

ケース 2 はケース 1 の場合と比較して、避難所選択確率の避難所までの避難距離に関する項 α の絶対値が大きくなっている。すなわち、避難者はケース 1 の場合よりも、避難所までの避難距離を重視し、相対的に近い場所に避難を行っている状況である。また、ケース 2 における目的関数の値を最小化する自動車利用率は 0.5 であり、ケース 1 の場合よりも高いことから、ケース 2 ではケース 1 よりも自動車避難する人が増えている。すなわち、港区内を走行する自動車台数が増加しており、より多くのリンクで混雑が発生したと考えられる。

図 14 より、ケース 3 では、ケース 1、ケース 2 の場合と比べて、混雑するリンクが増加している様子が分かる。ケース 3 における目的関数の値を最小化する自動車利用率は 0.6 であり、ケース 1、ケース 2 の場合よりも、さらに自動車利用率はさらに高く、自動車を利用した避難者が増加し、混雑するリンクが増えたと考えられる。

6. 新たな避難施策実施した場合の適用結果

本研究では、港区における避難所容量を増大させ、避難時間の削減を目指す施策として「阪神高速道路を一時的な避難所とする施策」と、道路容量を増加させ、避難者が避難に要する時間の削減を目的とした「国道をコントラフローとする施策」の 2 つを提案する。これらの 2 つの施策を実施した場合をそれぞれ、何も施策を行っていない場合と比較することで、避難計画モデルの最適化変数や避難時間分布には差異があるのかを比較し、考察する。以下に本研究で提案する施策の詳細な説明を記す。

(a) 阪神高速道路を一時的な避難所とする施策

港区において、多くの人々が避難を行い、避難率が高くなった場合には、避難人口に対して港区の避難可能容量は著しく不足している。すなわち、多くの人々が域外に避難することが考えられ、避難時間を要してしまう可能性が考えられる。この問題に対するハード的な対応施策としては、自治体が新たに津波から避難を行うための建物を建設することも考えられるが、金銭面や時間を考えると現実的ではない。そこで、既存施設の有効活用というソフト的な対応施策の一つとして、高速道路を避難所として活用することを考える。実際、東日本大震災時の津波の際には、仙台東部道路を避難所として利用した

人が津波災害から助かった例が報告されている。高速道路は交通事故の危険性から原則、立ち入ってはいけないが、地震後には点検のため高速道路は通行止めになるため、安全な避難場所として利用できる可能性もある。また、この施策は、自治体が新たに津波避難ビルを造るよりもお金や時間もかからないこともあり、コスト面でも実現可能である。そこで本研究では、港区内の阪神高速道路を避難場所として活用することを提案する。具体的には、港区の阪神高速道路の出入口を避難施設とし、避難容量を与えるものである。図 15 に、港区内で高速道路の出入口となっている場所を示す。

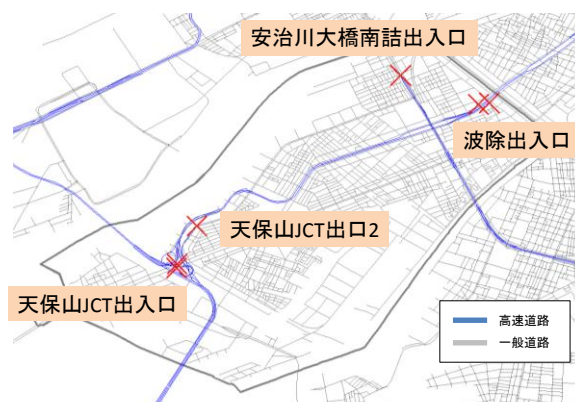


図 15 港区内の高速道路出入口の場所

(b) コントラフロー施策

津波災害からの避難を考える時、海岸の近くへ避難するよりも、海岸から遠い内陸へ避難するべきだと考えられる。特に、港区は、周りのほとんどを海や川に囲まれており、内陸の方向に避難するには、図 3③の方向のみで、内陸の方向に避難する人が集中した場合、内陸方面の道路が大規模に渋滞してしまう可能性も考えられる。そこで本研究では、道路のコントラフロー施策を考える。コントラフロー施策とは、高速道路や一般道路を避難する方向へ一方通行化する施策のことである。実際にアメリカで起きたハリケーン・カトリーナの災害の際には、交通容量を一時的に増加させるコントラフロー施策が行われ、人々の避難の方向を一方通行化させたことで、避難率の向上や避難時間の短縮を行った。

図 11 から、港区で内陸方面に向かう国道は国道 172 号のみである。そこで、国道 172 号の海岸側に向かう側の道路を大阪駅方面の方向に一方通行化することを考える。この施策を行うことにより、内陸側に向かう道路容量が 2 倍になるため、内陸側へ向かう避難行動が行いやすくなる可能性が考えられる。このコントラフロー施策を行った場合の避難計画モデルの政策変数や避難時間の変化を検証することで、施策評価を行うこととする。

(c) 適用結果

適用を行うあたっては、時間区分は平日で避難所選択確率のパラメータは、前節よりケース 3 の場合で目的関数が最少となったため、ケース 3 のパラメータ $\alpha = -0.0003$, $\beta = 0.0007$ を用いて分析を行う。

表5 各施策時の政策変数

施策	自動車利用率	自動車同伴率
施策無し	0.6	1.0
阪神高速利用施策	0.6	1.0
コントラフロー施策	0.9	1.0

表 5 は各施策を行った場合の政策変数の変化であり、施策実施の有無に関係なく、要援護者の自動車同伴率は 1.0 となった。全体の目的関数の値を最少とするには、要援護者は全員自動車に同伴させることが必要であることを示している。また、阪神高速利用施策を行う場合では、自動車利用率は 0.6 と施策なしと同様の値となったが、コントラフロー施策を行う場合には、自動車利用率は 0.9 まで許容される結果となった。特に、コントラフロー施策は、道路の利用方法を内陸部方面への移動時に容量を与え、港区外の避難所へのアクセスをしやすくする施策であることから、自動車利用が 9 割まで許容されたと考えられる。

次に、図 16 に施策実施の有無での目的関数の変化を示す。施策実施時には目的関数の値が減少し、一定程度の施策効果があったと考えられる。阪神高速利用施策時には、施策なしの場合と比較して、目的関数の値は 5% 程度の減少幅であったが、コントラフロー施策時には、施策なしの場合と比較して 30% 以上目的関数の値が減少し、施策の効果大きいことが示された。

図 17 は、各施策で経過時間別の累積避難完了率阪神高速利用施策時には、施策なしの場合と比較して、一部の時間帯で施策を行った時の方が避難完了率が高かったものの、概ね同様の分布傾向が見られた。一方で、コントラフロー施策実施時には、経過時間が小さい段階から累積避難完了率が高いことが示され、10分～20分の段階で、累積避難完了率が80%を超える結果となった。つまり、コントラフロー施策を行った場合には、施策なしの場合と比較して、早期に避難を完了できる人が増加している。一方で、施策の有無に関わらず、一定程度、避難に長時間を要する人が存在していることも示されている。

以下では、コントラフロー施策に焦点を当てて、出発メッシュ別で平均避難時間の要するエリアを確認する。特に、避難手段が自動車の場合で、施策なしの時と比較して異なる傾向が見られており、その結果をに示す。

避難人数・時間(分)

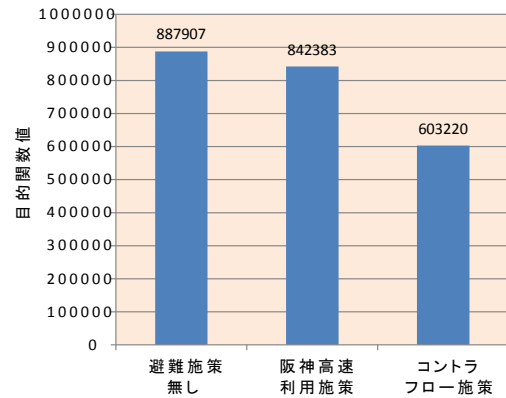


図 16 各施策時の目的関数値の変化

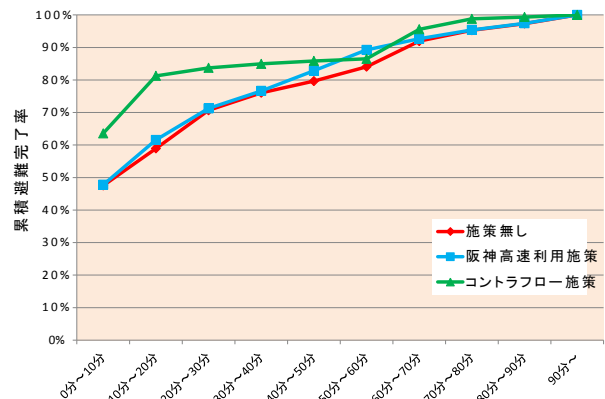


図 17 各施策時の経過時間別累積避難完了率

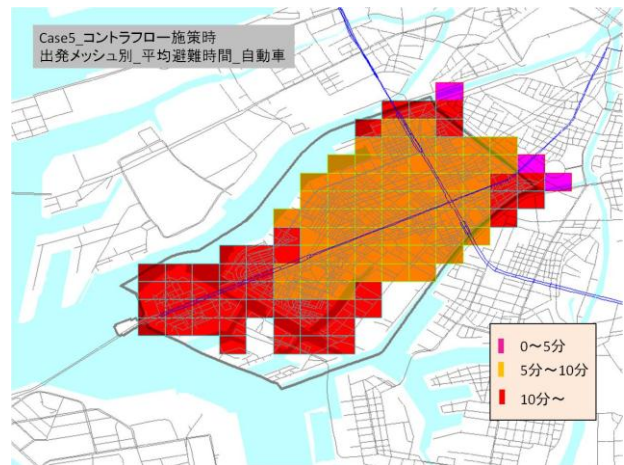


図 18 コントラフロー施策実施時のメッシュ別の平均避難時間(自動車)

図 18 より、施策なしの場合と比較して、平均避難時間分布には変化が見られた。具体的には、港区の図中左側(西側)の赤色のエリアが施策なしの場合と比較して、赤色のエリアが拡大していることが分かる。加えて、港区の図中右上(北側)の赤色のエリアも、施策なしの場合では橙色のメッシュであったのが、赤色の

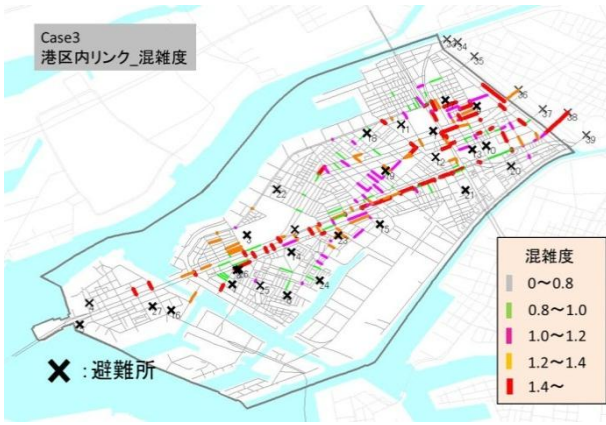


図19 施策なし時の混雑度

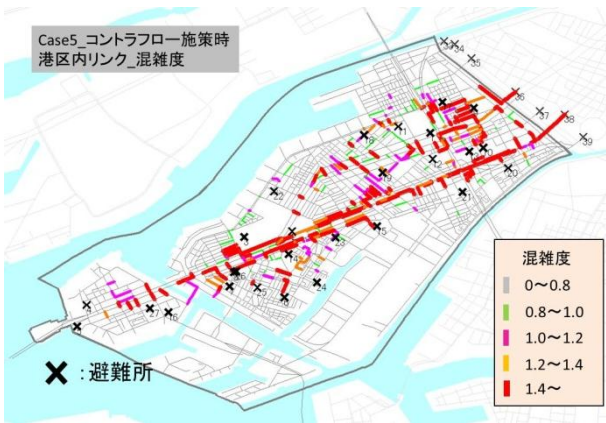


図20 コントラフロー施策時の混雑度

メッシュに変化し、平均避難時間が大きくなるメッシュが複数見られる結果となった。これは、コントラフロー施策の実施により、国道172号において一方通行規制が行われており、施策なしの場合には、国道172号を利用して避難所へ到達できていたのに対して、国道172号が利用できないために、道路規格の低い道路を走行しなければならず、平均避難時間が大きくなったことを示している。

赤色のエリアが施策なしの場合と比較して、赤色のエリアが拡大していることが分かる。加えて、港区の図中右上（北側）の赤色のエリアも、施策なしの場合では橙色のメッシュであったのが、赤色のメッシュに変化し、平均避難時間が大きくなるメッシュが複数見られる結果となった。これは、コントラフロー施策の実施により、国道172号において一方通行規制が行われており、施策なしの場合には、国道172号を利用して避難所へ到達できていたのに対して、国道172号が利用できないために、道路規格の低い道路を走行しなければならず、平均避難時間が大きくなったことを示している。

図20のコントラフロー施策時の道路ネットワークの混雑度は、施策なしの場合（図19）と比較して、リ

ンクの混雑度の状況には差異が生じていることが分かる。コントラフロー施策を実施した国道172号では、交通量が集中し、そのほとんどのリンクにおいて、混雑度が非常に高い値を示す結果となった。また、避難所周辺のリンクでも、施策なしの場合と比較して、混雑度が高くなっている傾向が見られた。コントラフロー施策を実施した場合の目的関数を最小化する自動車利用率は0.9であり、港区内の多くの人々が自動車を利用して避難を行うことから、多くのリンクで混雑度が高くなったと考えられる。ただし、混雑度が高いリンクが多くなっている一方で、目的関数の値については、施策なしの場合と比較して32%程度減少していることに留意が必要である。本研究のケーススタディでは、徒歩による避難と比較して、自動車利用の方が混雑度が高くなっても短時間で避難場所まで移動できるため、自動車利用率の増加が目的関数値の大幅削減につながったと言える。

7. おわりに

本研究では、大阪沿岸地域を対象とし、地震による津波災害からの避難行動に焦点をあて、自動車利用を考慮した避難計画モデルを構築した。また、いくつかの適用パターンを設定し、モデルに適用することで、計算結果の検証を行った。

本研究で得られた知見として、5点を示す。

1点目は、避難所選択確率のパラメータ値を変化させると、政策変数である自動車利用率の値が変化する傾向が見られた。特に、避難距離に関するパラメータの絶対値を大きくしていくと、相対的に知覚の避難場所を選択するとともに、自動車利用率の値は増加傾向を示し、目的関数値は減少する傾向を示された。

2点目は、1点目とも関連するが避難距離に関する項のパラメータ α の絶対値を大きくしていくことで、距離の近い港区外の避難所へと避難するよりも、距離の近い港区内の避難所へ避難する傾向が見られた。

3点目は、避難所選択確率のパラメータ値を変化させた場合、各リンクの混雑度には差異が生じる。特に、港区内から大阪内陸方面へ向かう国道172号では、道路混雑度は高い値を示し、避難者が集中する可能性が考えられる。

4点目は、提案した2つの施策を行った場合、目的関数値を減少傾向が見られ、特にコントラフロー施策時には大幅な減少傾向が見られた。特に、コントラフロー施策実施時には、リンクの混雑度が大幅に増加した。コントラフローを行う国道172号では、自動車が集中している様子が示され、施策なしの場合と比較して、利用者が増加する傾向が見られた。

今後の課題として、構築したモデルでは避難所選択確率のパラメータ設定について、今回は3パターンで検証を行っているが、さらなる拡充が求められる。また、避難距離と避難所容量のみから避難所を設定しているが、現実の避難を考えるにあたっては、行政により事前に避難計画が策定され、避難者の居住、滞在している地区や周辺の状況等により、予め指定される避難場所は異なることも想定される。そのため、避難場所の決定に関しては、規範モデルとして人々の避難行動を正確に記述することも必要ではないかと考えられる。

さらに、港区外から港区内へ避難してくる避難者も存在する可能性が考えられるため、対象地域の拡大を行い、より広域の道路ネットワークを対象にして、避難行動を分析する必要がある。

また、地震発生の際の、建物の崩壊、液状化等などによる道路の途絶や交通事故などの影響も現実には発生することが想定される。その点についてもモデルに組み込む方法を検討し、検証する必要があるものと考えられる。

参考文献

- 1) 内閣府中央防災会議, 「南海トラフの巨大地震モデル検討会」, <http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai_trough/nankai_trough_to_p.html> (2013/1/17 時点)
- 2) 内閣府中央防災会議, 「平成 23 年東日本大震災における避難行動等に関する面接調査 (住民)」, <<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/higashinohon/7/index.html>> (2013/1/18 時点)
- 3) 警察庁, 「東北地方太平洋沖地震による死者の死因等について【3/11~4/11】」, <http://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2011/zenbun/pdf/1s2s_6_4.pdf> (2013/1/17 時点)
- 4) 国土交通省, 東日本大震災の津波被災現況調査結果 (第 3 次報告) ~津波からの避難実態調査結果(速報)~, <<http://www.mlit.go.jp/common/000186474.pdf>>, (2013/1/28 時点)
- 5) 土木学会: 交通ネットワークの均衡分析—最新の理論と解法—pp40~41
- 6) 内閣府中央防災会議, 「避難率向上に向けた施策事例」, <http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/suigai/080908/080908_shiryō_5.pdf>, (2013/1/28 時点)

EVACUATION MODEL FOR TSUNAMI CONSIDERING CAR USAGE

Takafumi NAKAGAWA , Toshiyuki NAKAMURA , Hiroshi SHIMAMOTO
and Nobuhiro UNO