

# 所属世帯による避難手段の相違と交通渋滞を考慮した津波避難シミュレーションの検証と避難課題の検討

小林 頌平<sup>1</sup>・杉木 直<sup>2</sup>・松尾 幸二郎<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 豊橋技術科学大学大学院 建築・都市システム学専攻 (〒441-8580愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)  
E-mail:s163518@edu.tut.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 (〒441-8580愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)  
E-mail:sugiki@ace.tut.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 (〒441-8580愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)  
E-mail:k-matsuo@ace.tut.ac.jp

東日本大震災では死者の9割以上が津波によるものであり、その多くが高齢者であった。自動車を運転できない高齢者等は、避難の際に徒歩もしくは家族の車へ同乗する必要がある。避難者の避難速度は所属する世帯構成により異なると考えられる。また、東日本大震災以降は自動車による避難が容認されたが、市街地では交通容量が少ない道路に避難交通が集中するため渋滞の発生が懸念される。そこで本研究では、所属世帯や避難時の交通手段による避難速度の相違を考慮した津波避難シミュレーション手法を構築し、渋滞発生状況の再現性を検証するとともに、豊橋市における適用を行った。その結果、シミュレーションにおける自動車の渋滞の再現を確認するとともに、避難所の増設や高齢者が安全に避難を行えるような地域ごとのルールづくりの必要性を把握した。

**Key Words :** Tsunami evacuation simulation, Evacuation mode, Traffic congestion, Household micro-data

## 1. はじめに

日本は世界的に見ても非常に災害が多い国であり、特に近年は大規模な地震が多発しており、多くの被害が出ている。2011年の東日本大震災においては、津波による大きな被害が発生した。図-1、図-2に示すように死者の9割以上が津波によるものであり、60歳以上の死者割合が人口構成に占める割合の2倍以上を占めている<sup>1)</sup>。このような被災状況から、従来は自動車による津波避難は推奨されていなかったが、東日本大震災以降は、やむを得ない場合の自動車を利用した避難が容認された<sup>2)</sup>。しかし、多くの人々が自家用車で避難した場合には、市街地では交通容量が少ない道路に避難交通が集中するため、交通渋滞が生じ円滑に避難できない可能性がある。また、高齢者が避難する際、自身による自動車運転が困難な場合は、徒歩もしくは家族の運転する車へ同乗する必要がある。避難行動に制約がある場合、安全な避難の完了が困難となる。そのため、高齢者の避難速度は所属する世帯の構成によって異なると考えられる。

地震が発生した場合、人々がどの手段で避難を行うか、避難所までの経路を把握しているかによって被害の規模は大きく異なる。津波避難では、津波到達以前に人々が安全な場所に避難することが最低限必要とされるため、

人々がどの避難手段を用いてどの避難所に避難するのかを、世帯分布に基づいたシミュレーションにより把握し、事前に課題の把握や対応策の検討を行うことが重要である。

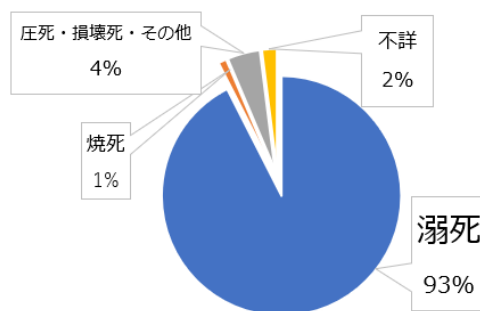


図-1 東日本大震災の死因割合

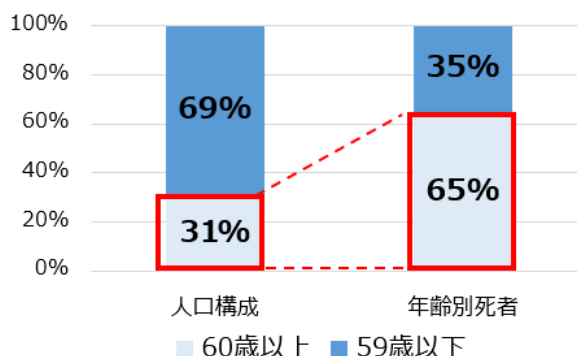


図-2 被災地の人口構成と年齢別死者割合

そこで本研究では、所属世帯や避難時の交通手段による避難速度の相違を考慮した津波避難シミュレーション手法を構築する。具体的には、個人属性、家族属性を世帯マイクロデータ推定によって把握し、所属世帯や避難時の交通手段による避難速度の相違とともに、自動車で避難した場合の交通渋滞の発生を考慮した津波避難シミュレーションを行う。また、南海トラフ地震等の際に津波による被害が発生することが予測されている愛知県豊橋市を対象として津波避難シミュレーションを実行し、シミュレーション結果の妥当性の検証と、津波避難に関する地域課題の把握を行う。

## 2. 津波避難シミュレーションに関する既存研究と本研究の位置づけ

災害時の避難シミュレーションについては、様々な条件を想定した研究が行われてきた。片田らによる研究<sup>3</sup>では、地震発生から津波襲来までの地域状況を総合的に表現したシナリオ・シミュレータを作成しており、想定地震に対する家屋転倒やそれに基づく道路閉塞を表現し、津波災害時のより現実的な人的被害の推計を可能としている。小柳らによる研究<sup>4</sup>では、津波避難タワーと津波シミュレータを連携させた避難シミュレータを用いて、津波避難タワーの有無による人的被害の違いや避難行動への影響を検証している。その結果、津波避難タワーにより、死亡率を大幅に減少させることができると結論付けている。Fanらによる研究<sup>5</sup>では、避難活動をモデル化したシミュレーションを作成している。避難中の避難需要やネットワークの変化を考慮しており、徒歩、自動車、公共交通といった複数の避難手段の動きや相互作用を動的なシミュレーションとなっている。シミュレーションを通し、交通網の閉鎖や交通渋滞による遅延などの問題への回答を示している。Joelらによる研究<sup>6</sup>では、政府から人々への情報フローと人々間の情報フローとして定義されている社会資本をエージェントベースの避難モデルに組み込んでいる。過去の災害を教訓とし、政府が避難ガイドを作成して避難者に情報を提供すると避難率は向上することが示されている。

以上のように、発災条件、発災後の状況の変化、個人単位の交通手段の相違を考慮した様々な研究がなされているが、避難者がどのようなタイプの世帯に所属しているかによって取りうる避難交通手段の相違を考慮した研究はなされていない。東日本大震災において高齢者の死者割合が人口構成に占める割合が高かったことを踏まえ、高齢者の安全な避難を可能とするような避難計画が必要とされているが、運転ができない高齢者が、所属する世帯の非高齢者が運転する自動車に同乗するといった状況を

表現可能なシミュレーションの開発が必要である。本研究は、国勢調査などのデータを用いて世帯マイクロデータを推定し、高齢者の家族の運転する自動車への同乗を可能とするという点において、既存研究とは異なる津波避難シミュレーションの構築を行うものである。

## 3. 世帯マイクロデータの推定

### (1) 世帯マイクロデータの推定手法

世帯の属性を利用した津波避難シミュレーションを実施するためには、対象地域の世帯単位のデータを入手する必要があるが、国勢調査などの集計データからすべての属性を有するデータを入手するのは困難である。従って、人口データ推定より世帯マイクロデータを推定することが必要である。総合的な属性からなる初期マイクロ推定システムの開発と実都市レベルにおける適用として杉木らによる研究<sup>7</sup>がある。本研究では、この初期世帯マイクロデータ推定システムを用いて世帯マイクロデータを作成する。その上で年齢性別、世帯構成、および避難手段を考慮した津波避難シミュレーションを行う。

本推定手法の最も特徴的な点は、連続変数である属性間の相関性の処理方法である。まずサンプルにおける  $m$  人世帯データの属性変数 ( $X_{is} = (x_{1s}, \dots, x_{ms})$ ) を、主成分分析を用いて無相関変数 ( $P_{is} = (p_{1s}, \dots, p_{ms})$ ) に変換する。

$$P = aX \quad (1)$$

世帯サンプルの無相関変数  $P_{is}$  の値に基づいて、図-3 に示すように、 $i = 1 \sim m$  について累積曲線を作成する。式(1)より次式が導出される。

$$X = A^{-1}P = BP \quad (2)$$

世帯を生成する際には属性  $i$  に対して乱数  $ran_i$  を発生させ、図-3 の累積曲線より  $i = 1 \sim m$  について生成世帯の各構成員に対する  $P_{is}$  を求める。生成世帯の  $x_i$  は式(2)より  $i = 1 \sim m$  について求められる。同様の処理を対象地域内の全ての世帯人別世帯数に対して実行することで、世帯推定の初期データセットが作成される。この初期デ

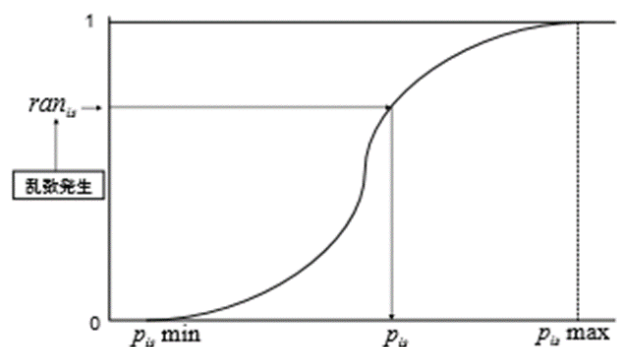


図-3 無相関変数を用いた相関の統合

ータセットは、周辺分布である性別 5 歳階級人口を満たさないため、モンテカルロ法を用いて世帯をランダム抽出し、世帯構成員の年齢が更新された新たなデータによって置き換える。このような調整処理を、周辺分布を満たすまで繰り返し実行する。本研究の初期世帯マイクロデータ推定に関するシステムの処理フローを図4に示す。

(2) 対象地域

豊橋市南海トラフ地震被害予測調査<sup>8)</sup>、ちずみる豊橋<sup>9)</sup>を参考に国勢調査データから抽出した豊橋市の浸水域を分析対象地域とする。また、豊橋市の太平洋側は津波の到達が予想されているが海拔が沿岸部から内陸部に向けて急激に上昇するため、津波が住民に与える影響は少

ないと判断し、本研究の対象外とした。

(3) 推定用データ

推定に利用するデータとして世帯サンプルデータと周辺分布データを用いる。世帯サンプルデータには、平成 23 年第 5 回中京都市圏パーソントリップ調査の世帯票データより世帯属性、個人属性のデータを用いる。周辺分布データは平成 22 年国勢調査データの性別年齢階層別人口、人員別世帯数のデータを用いた。

(4) 推定結果

世帯マイクロデータの推定結果の例を表 1 に示す。65 歳以上を高齢者とし、世帯構成による区分を非高齢者の

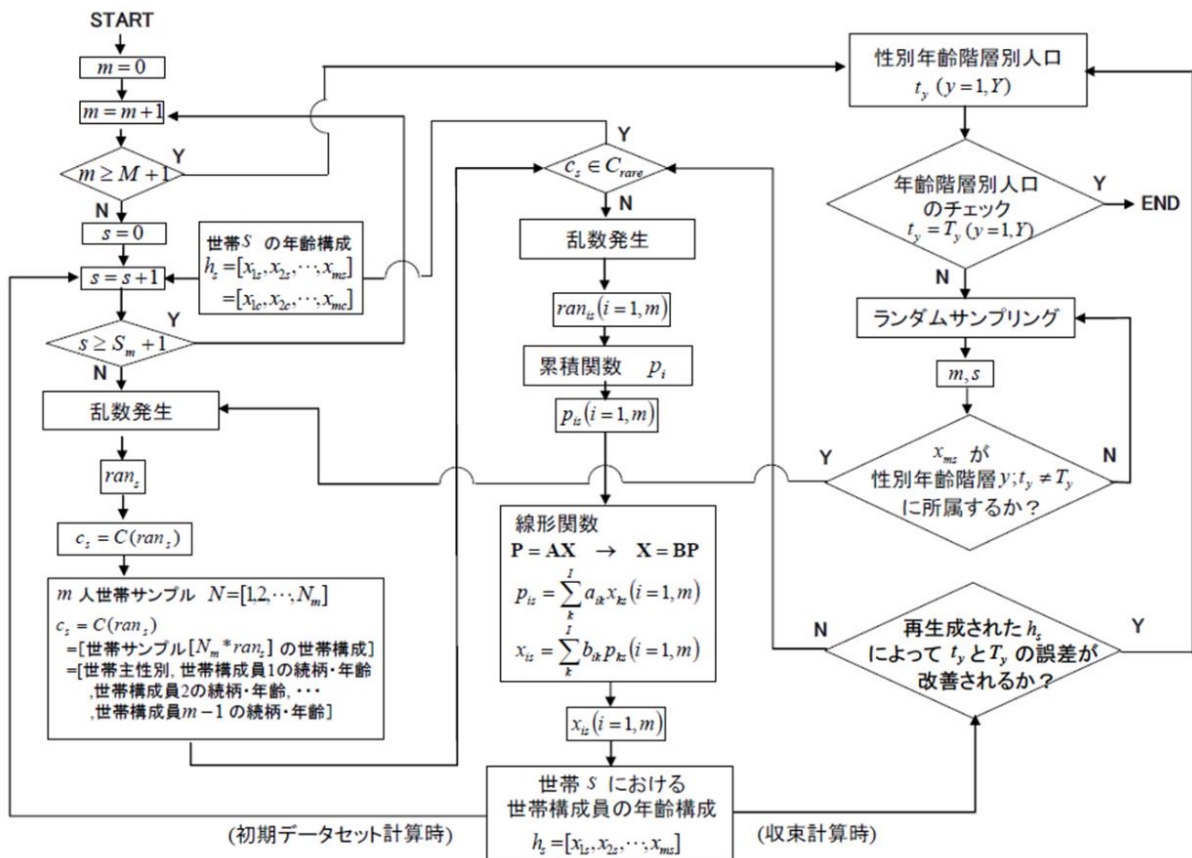


図4 初期マイクロデータ推定システムフロー

表-1 マイクロデータの推定結果

世帯人員数	世帯主年齢	本人・男	子・男	子・男 2	子・男 3	孫・男	兄弟	父	その他・男 1	その他・男 2	その他・男	本人・女	妻	子・女 1	子・女 2	子・女 3	孫・女	姉妹	母	子の妻	その他・女 1	その他・女 2	その他・女
2	35	35										35											
2	75	75										70											
3	50	50										45	20										
3	20	20															25	55					
3	70	70										60	30										

み世帯，高齢者のみ世帯，高齢者と非高齢者からなる世帯の 3 区分に分類した．例えば表-1 の一番上の列の世帯は 35 歳の男性とその妻 35 歳の女性の 2 人から構成される非高齢者のみの世帯となる．

(5) メッシュ配分

世帯マイクロデータは町丁目ごとに推定される．しかし，実際に地震が発生し避難を行う際，町丁目単位での避難は現実的でない．そのため，推定されたマイクロデータから世帯構成別の人口，世帯数を集計し，面積比に応じて 100m メッシュ単位に配分した．

4. 津波避難シミュレーション

(1) 概要

各出発点から避難所までの最短経路探索を行い，最寄りの避難所までの経路を取得する．避難はその経路を通り，避難所まで到達すると避難完了となる．

避難手段として，徒歩と自動車を考慮する．徒歩による避難は取得した経路に基づき行う．自動車による避難は，前方車の有無によって行動を変えるマルチェージェ

ントシミュレーションである．図-5 に示すように前方に自動車があればその場で待機し，無ければ前に進む．徒歩避難と同様，取得した経路に基づいて避難を行う．

避難開始時間については，地震の発生と共に全ての避難者が避難を開始するのではなく，避難を開始するまでに必要である準備時間を考慮している．そのため，出発時間は世帯によって異なる．利用した避難開始時間分布を図-6 に示す．

(2) 利用データ

出発点データとして上記の 100m メッシュの重心座標を利用した．図-7 に出発点を示す．終点である避難所には豊橋市が定める津波発生時における一時避難施設<sup>10)</sup>である津波避難ビルを利用する．図-8 に津波避難ビルを示す．道路ネットワークデータには ZENRIN 社の Zmap-AREA II を利用した．

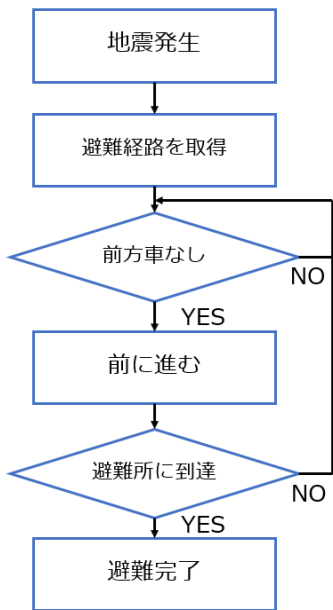


図-5 自動車避難のフローチャート

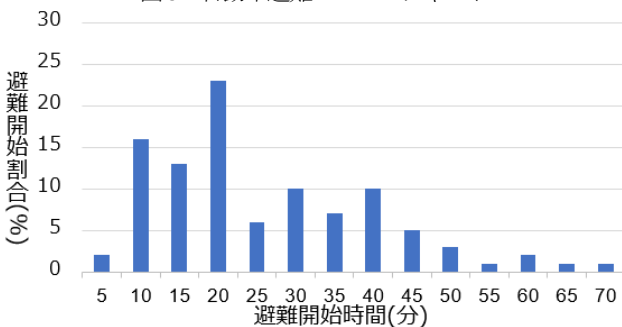


図-6 避難開始時間分布

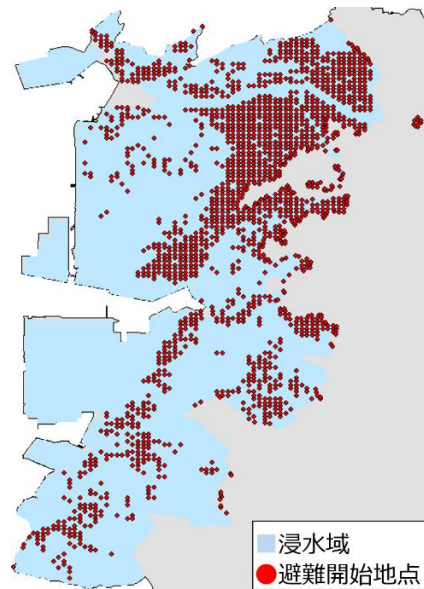


図-7 出発点

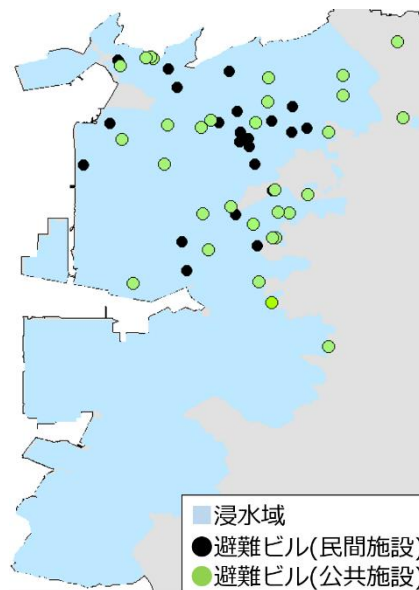


図-8 津波避難ビル



### (3) シミュレーション条件

世帯マイクロデータ推定の結果を元に 65 歳以上を高年齢者と定義し、世帯タイプを(1)高年齢者のみ世帯、(2)非高年齢者のみ世帯、(3)高年齢者と非高年齢者からなる世帯の 3 つに分類し、表 2 に示すように、2 つのシミュレーションケースを設定する。

津波避難ビルの一部には図-8 において●で表したアパートやマンションなどの民間施設があり、自動車による避難場所として設定することは現実的でない判断し、自動車による避難を行う場合のみ目的地として除外した。また、避難所の収容人数については考えないものとする。

自動車による避難は 1 世帯 1 台で行うものとし、渋滞が生じていない場合の避難速度は 30km/h とした。各車両の前方 0.5m 以内に車両があればその場で待機する。徒歩による避難速度は東日本大震災の津波被災現況調査結果<sup>7)</sup>を参考に高年齢者を 15.6m/分、非高年齢者を 39.0m/分とした。

避難完了の判定方法については、豊橋市南海トラフ地震被害予測調査より、地震発生後最短 77 分で三河湾側に津波が到達する予測が公開されている。そのため避難完了の可否判定は避難完了時間が津波到達時間よりも早いかどうかで判別する。

## 5. シミュレーションの妥当性の検証

作成したシミュレーション内で渋滞が再現出来ているか、簡易的なシミュレーションを用いて検証を行う。自動車による避難の避難先となっている津波避難ビルのうち、磯辺小学校、汐田小学校、吉田方小学校を無作為に抽出し、これらを避難先とするメッシュを検証対象とする。図-9 に対象となる津波避難ビルとメッシュを示す。また、対象メッシュ数と世帯数を表-2 に示す。

表-2 シミュレーションケース

ケースNo	避難手段	
	徒歩	自動車
ケース1	高年齢者のみ世帯	非高年齢者のみ世帯 + 高年齢者と非高年齢者 からなる世帯
ケース2	高年齢者のみ世帯 + 非高年齢者のみ世帯	高年齢者と非高年齢者 からなる世帯

表-3 避難所と対象メッシュ・世帯数

避難所名	メッシュ数	世帯数
吉田方小学校	108	2449
汐田小学校	22	594
磯辺小学校	137	1653

結果を図-10~12 に示す。図-10 の吉田小学校と図-12 の磯部小学校のグラフにおいて平均避難速度が 5.0km/h 以下である車両が全体の 60%以上を占めており、東日本大震災における車両平均避難速度が 9.0km/h であったことから、シミュレーション上で交通渋滞が再現出来ていると考えられる。また、図-11 の汐田小学校のグラフにおいては、通常速度である 30km/h に近い速度で避難している車両が多いことから、渋滞が発生しない地域もあることがわかる。渋滞の発生は、世帯の分布や周辺への避難所の存在によるものと考えられる。

続いて、さらに短時間で多くの自動車が避難を開始したと仮定した際に、渋滞状況はどのように変化するかについてシミュレーションの検証を行う。具体的には、図-6 に示した避難開始時間分布の間隔を半分にし、同様の 3 箇所の避難所を対象にシミュレーションを行う。

結果を図-13~15 に示す。図-10~12 と比較すると、いずれの避難所でも平均避難速度が遅くなっている。多くの世帯が同じタイミングで自動車による避難を開始することにより、交通渋滞がさらに発生しやすくなることが確認された。実際の避難においては迅速に避難を開始することが重要であるが、短時間に自動車を利用して避難する人が増加すると、渋滞の発生により避難が困難になる状況が表現された。

## 6. 津波避難シミュレーションによる避難完了状況分析

### (1) 自動車による避難に関する分析結果

図-16 にケース 1、図-17 にケース 2 の発災後の経過時

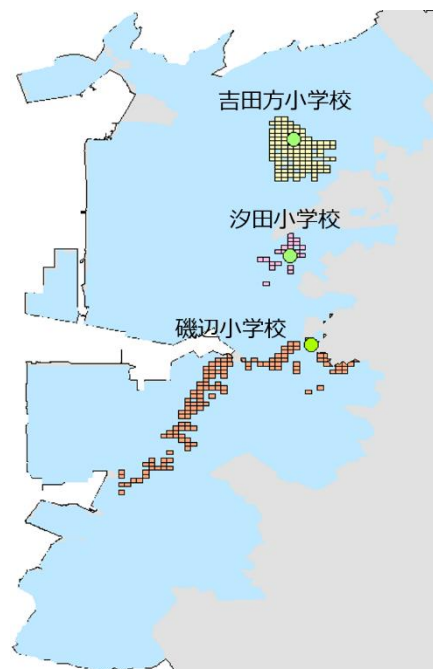


図-9 検証に用いる避難所と対象メッシュ

間別避難完了車両台数を示す。20分から25分にかけて、大幅に避難完了車両台数が減っていることより、渋滞が発生していると考えられる。また、ケース1とケース2では車両台数が2倍近く違うのにも関わらず、分布形はほぼ同じである。このことから、双方のケースにおいて、特定の箇所や時間帯で渋滞が発生するものと考えられる。どちらのケースにおいても自動車による避難を行っている高齢者と非高齢者からなる世帯において、避難完了世帯数には1,715世帯の差がある。避難完了割合を増加させるため、徒歩による避難が可能な世帯は極力徒歩で避難し、渋滞緩和に努めることで全体の避難完了割合が増加すると考えられる。

(2) 避難完了割合に関する分析結果

図-18にケース1、図-19にケース2におけるメッシュ別

避難完了割合を示す。各ケースを比較すると、全体的にケース2の方が避難完了割合が高い。どちらのケースにおいても、南側の地域では避難完了割合が著しく低い。これは、周辺に避難所が無く、交通渋滞により避難が完了する前に津波が到達してしまうためであり、新たな避難所を設置する必要があると考えられる。また、ケース1では北側にも一部、避難完了割合が低い地域がある。この地域は豊橋市の中心地であり、人口が集中しているため渋滞が発生しやすくなっていることが考えられる。比較的避難所が集まっている地域でも交通渋滞により避難を完了することができない世帯が一定数存在する。

(3) ケース別累積避難完了割合に関する分析結果

図-20に各ケースの高齢者、非高齢者の累計避難完了割合を示す。どちらのケースにおいても高齢者の避難完了割

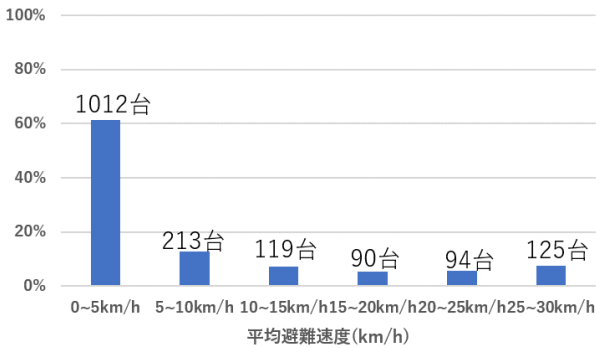


図-10 平均避難速度：吉田方小学校

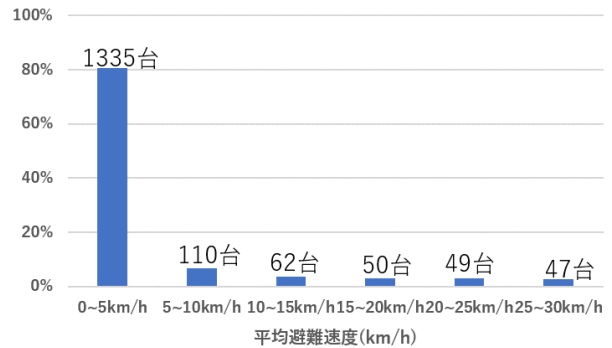


図-13 平均避難速度（避難集中ケース）：吉田方小学校

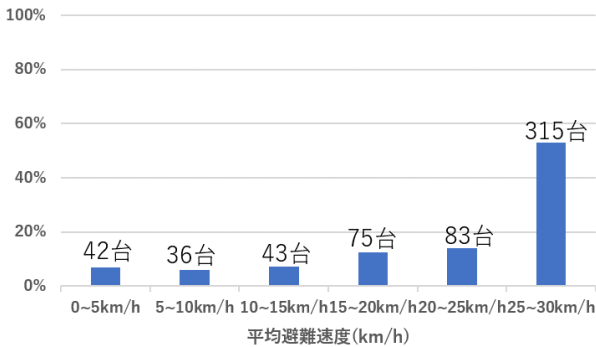


図-11 平均避難速度：汐田小学校

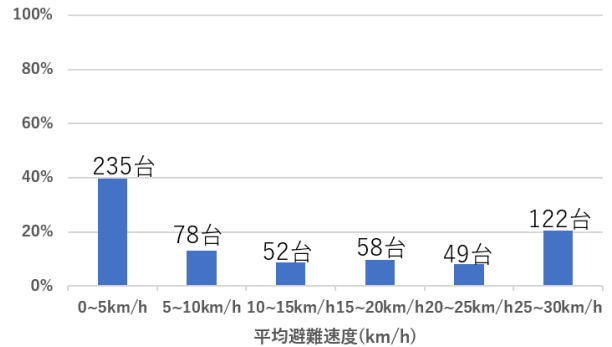


図-14 平均避難速度（避難集中ケース）：汐田小学校

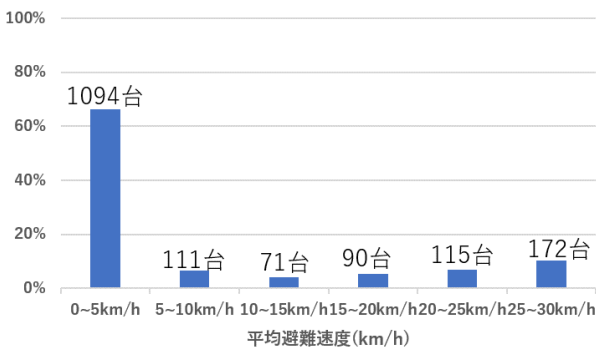


図-12 平均避難速度：磯辺小学校

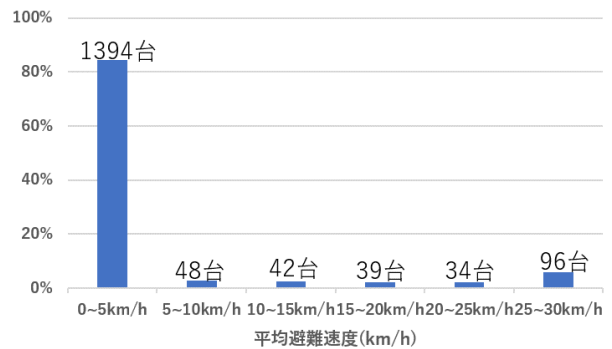


図-15 平均避難速度（避難集中ケース）：磯辺小学校

合が 40%程度であることから、徒歩による避難は現実的ではないと考えられる。そのため、高齢者が自動車による避難を行えるように同乗が必要な高齢者がいる世帯のみが自動車で避難するような地域でのルール作りが必要だと考えられる。

各ケースを比較すると、最短津波到達時間付近においては避難完了割合に大きな違いは無いため、徒歩で避難を行うことができる世帯は徒歩で避難することで渋滞を緩和でき、全体の避難完了割合が上昇すると考えられる。避難所の容量や道路閉塞を考慮すると、より深刻な渋滞が発生する恐れがあるため、渋滞緩和策が与える影響は大きいと考えられる。

## 7. おわりに

本研究では、所属世帯による避難手段の相違や交通渋滞を考慮した避難シミュレーションを行った。その結果、一部地域では渋滞が発生しており、津波到達時間までに避難が完了しない世帯が存在することが分かった。豊橋市の中心部では避難所が多く全体的に避難完了割合が高い一方で、南側地域は避難所が少なく渋滞が発生しやすいため、避難完了割合が著しく低い地域が存在することが分かった。また、各ケースにおける高齢者と非高齢者の避難完了割合を比較した場合、各ケースにおける累計避難割合には大きな差が見られなかった。しかし、高齢者の避難完了割合はどちらのケースも 40%前後であり、高齢者が徒歩による避難を行うのは現実的でない。その

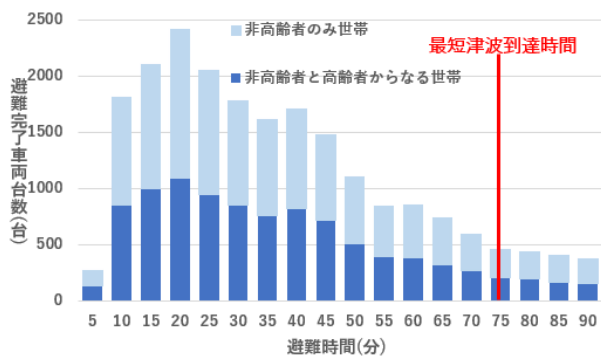


図-16 時間帯別避難完了車両台数:ケース 1

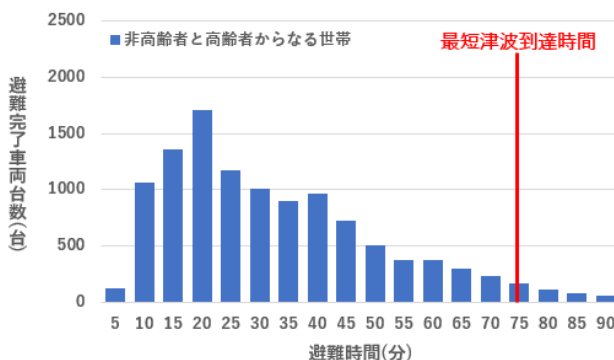


図-17 時間帯別避難完了車両台数:ケース 2

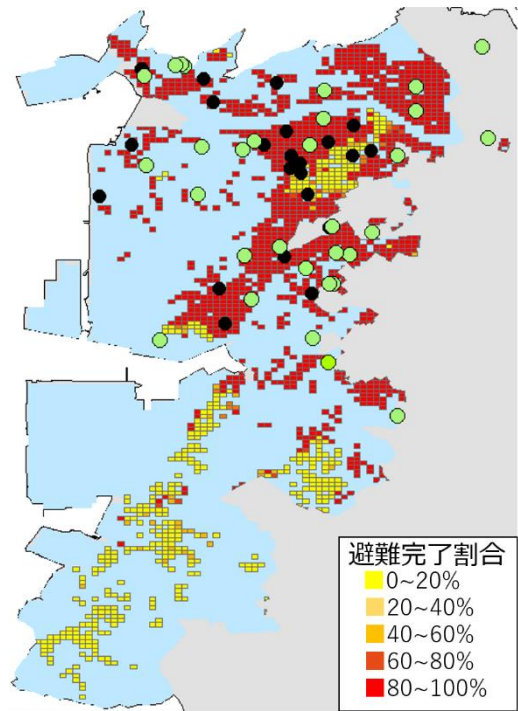


図-18 メッシュ別避難完了割合:ケース 1

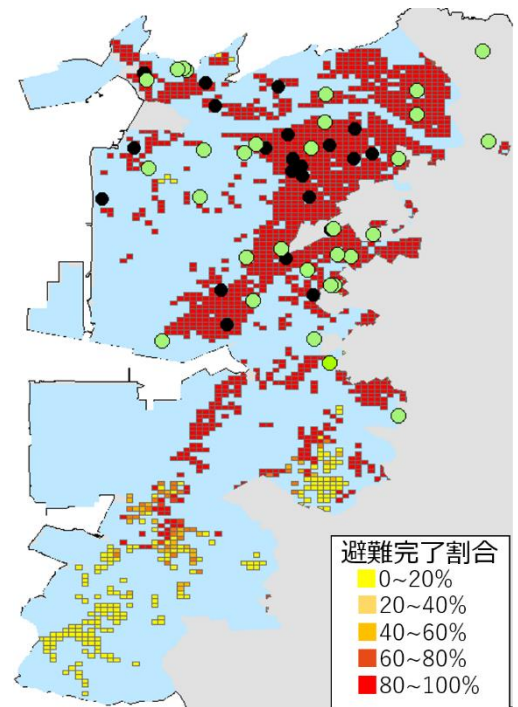


図-19 メッシュ別避難完了割合:ケース 2

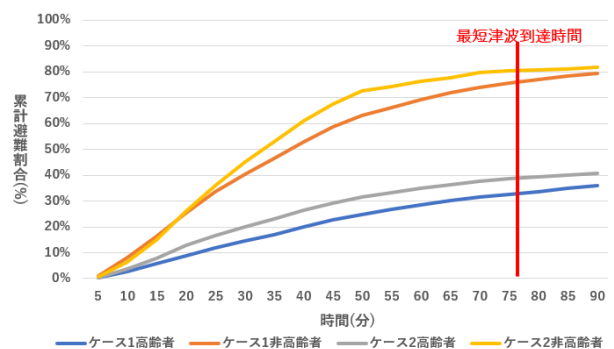


図-20 累計避難完了割合

ため、避難所の増設や地域でのルールづくりを行う必要があると考えられる。

本研究では避難所の収容人数は考慮していないため、避難所の容量を考慮し、到達した避難所に入れない場合に他の避難所に避難先を変更する等の行動を含めたシミュレーションを行う必要がある。また、現在のシミュレーションでは夜間人口分布を用いており、全ての世帯構成員が家にいることを前提としている。昼間は生産年齢人口が仕事のため居住地を離れており、残された高齢者が自動車への同乗による避難を行うことができない場合も考えられる。そのため、地震および津波の発生時刻によって異なる人口分布を考慮したシミュレーションを行う必要がある。今後は、これらの課題を踏まえてシミュレーションの改良を行い、より現実的な分析を行っていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 内閣府：平成 23 年防災白書, <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h23/index.htm>.
- 2) 国家公安委員会：交通の方法に関する教訓（第 10 章 交通事故, 故障, 災害などのとき）, <https://www.npa.go.jp/koutsuu/kikaku/kyousoku/index.htm>.
- 3) 片田敏孝, 桑沢敬行：震災状況下における津波被害の発生構造に関するシミュレーション分析, 土木学会論文集, Vol.64, No.3, pp.380-390, 2008.
- 4) 小柳雄揮, 有川太郎：津波避難シミュレーションを用いた津波避難タワーの効果の検討, 土木学会論文集, Vol.72, No.2, pp.L\_1567-L\_1572, 2016.
- 5) Fang Yuan and Christopher M. Puchalsky : Multimodal Evacuation Simulation and Scenario Analysis in Dense Urban Area Philadelphia, Pennsylvania, Case Study, Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board, Vol.2532, pp.91-98, 2015.
- 6) Joel S. E. Teo, Jan-Dirk Schmöcker, Florin Leon, Joe Y.-T. Li, Jun Ji, Gabriela Atanasiu, and Eiichi Taniguchi : An Agent-Based Evacuation Model Considering Field Effects and Government Advice, Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board, Vol.2532, pp.129-140, 2015.
- 7) 杉木直, 村中智哉, 宮本和明：実都市を対象とした初期マイクロデータの推定手法の適用と検証, 第 45 回土木計画学研究発表会・講演集, CD-ROM, 2013.
- 8) 豊橋市：豊橋市南海トラフ地震被害予測調査, <http://www.city.toyohashi.lg.jp/16584.htm>.
- 9) 豊橋市：ちずみる豊橋 防災・災害情報／避難施設一覧（津波避難ビル等）, <http://www2.wagmap.jp/toyohashi/ThemeSearch?mid=13&mcl=21,5,50,500;21,6,60,600>

(2018. 7. 23 受付)

## TSUNAMI EVACUATION SIMULATION CONSIDERING TRAFFIC CONGESTION AND DIFFERENCE IN EVACUATION MEANS DEPENDING ON HOUSEHOLD ATTRIBUTES

Shohei KOBAYASHI, Nao SUGIKI and Kojiro MATSUO