

マルチ・エージェント・シミュレーションによる 津波避難ビルへの避難行動分析 —北海道釧路市中心市街地を事例として—

A Multi-Agent Simulation of Evacuation Behavior toward Tsunami Shelter Buildings: A Geographical Study Conducted in Central Kushiro, Hokkaido

深田 秀実¹・橋本 雄一²

Hidemi FUKADA¹ and Yuichi HASHIMOTO²

要旨

本研究は大津波の到来が予想される釧路市の中心市街地を事例として津波避難ビルの整備状況を概観し、その有効性と課題を住民の徒歩避難に関するマルチ・エージェント・シミュレーション（MAS）から明らかにした。このシミュレーションでは、高層建築物が存在しない地区を対象として住民をモデル化し、居住地の近隣にある津波避難ビルまで水平移動した後、ビル内の階段で最上階へ避難するまでの行動を想定した。その結果、当該地域では東日本大震災後に津波浸水想定が更新されてから、津波対策により収容人数の多い津波避難ビルが複数建設されたことで避難環境は改善されたことが確認できた。しかし、MASでは、津波避難ビルから離れた地区の住民にとって、津波到達までにビルの上層階へ避難することは困難という結果も得られた。これは、階段を上り始める際の歩行速度の変化や、階段付近における滞留などにより、避難移動が遅滞することが原因となっていた。このように津波避難ビルの有効性については定員数だけから判断するのではなく、水平移動や垂直移動も考慮して、津波到達までの時間に収容できる避難者についても検討する必要がある、そのために本シミュレーション手法は有効と考えられた。

Abstract

Kushiro town center is expected to experience a major tsunami in the future. This study used a multi-agent simulation comprising walking residents to elucidate the changes in the spatial patterns of tsunami shelter buildings in this location and examined their effectiveness as well as difficulties. The conducted simulation modeled residents in a district with no high-rise buildings. The behavior of residents was assumed as a horizontal movement toward tsunami shelter buildings located in residential neighborhoods where they would access the top floor via stairs. Tsunami inundation projections for this region were updated after the Great East Japan Earthquake. As a part of the tsunami countermeasure, multiple high-capacity shelters were constructed. The results of this study confirmed that such efforts improved the evacuation environment. However, the simulation also revealed that residents of areas distanced from the tsunami shelters would slow down on climbing stairs, and walking would likely to be obstructed near the stairs. These people would find it difficult to reach the upper floors of the buildings by the time the tsunami arrives. Therefore, the study results indicate that the effectiveness of tsunami shelters should not be judged solely by their holding capacities; rather, their usefulness should be evaluated by the number of evacuees they can accommodate before the tsunami hits. This scope was estimated by considering the horizontal and vertical movements of the residents, and the simulation outcomes evinced that the study method was apt for the performed appraisal.

キーワード：マルチ・エージェント・シミュレーション（MAS）、津波避難ビル、避難行動、釧路市

Key words： multi-agent simulation (MAS), tsunami shelter building, evacuation behavior, Kushiro City.

I. はじめに

2011年3月11日に生じた東日本大震災では、北海道から関東に至る太平洋沿岸地域に甚大な被害がもたらされた。この震災以降、地域住民の生命を守る津波避難対策の必要性が強く認識されるようになり、内閣府中央防災会議は、想定を超える規模の

津波発生時に迅速かつ的確な避難を行うための対策の必要性を報告した（中央防災会議、2011）。そこで海岸線を持つ地方公共団体（以下、自治体）では、津波対策として避難路の再整備や津波緊急避難施設などに関する再検討が行われた（内閣府 防災担当、2017a）。

¹ 小樽商科大学 商学部 社会情報学科 / Department of Information and Management Science, Otaru University of Commerce, Japan

² 北海道大学大学院文学研究院 / Faculty of Humanities and Human Sciences, Hokkaido University, Japan

このような流れの中で2011年12月7日には「津波防災地域づくりに関する法律（平成23年法律第123号）」（以後、津波防災地域づくり法）が成立した。東日本大震災以前の津波対策に係る法制度では、頻度の高い津波（L1）を想定し、各主体（国・県・市町村等）が防災のみの観点から計画を策定していた。それが、津波防災地域づくり法では、最大クラスの津波（L2）を想定し、各主体が実施する施策を組み合わせ、防災に加え地域づくりの観点から総合的な計画を市町村が策定することとなった。

そこで各市町村は、ハザードマップの津波浸水想定を更新し防災対策を行ったが（深田・橋本, 2014）、それによって新しい課題が指摘されるようになった。特に津波災害時に避難場所へ長距離移動しなければならない避難困難区域の画定や、避難移動を遅延させる障害については、多くの研究が行われてきた。例えば、橋本（2013, 2015）は道路ネットワーク空間上での避難圏を画定する方法を考案し、そこに含まれない避難困難区域の人口推定を行った。また、衛星測位を用いて避難行動情報を収集することで移動を遅延させる要因を分析した研究として、個人避難では奥野・橋本（2015）、集団避難では奥野ほか（2018）などの研究がある。さらに、福祉研究の視点を取り入れ、保育所からの集団避難の課題について空間的視点で取り組んだ最上・橋本（2015）や、自主防災組織への聞き取りから避難困難区域の課題を明らかにした仁平・橋本（2015）などの研究もある。

このように、新たな津波浸水想定をもとにして多様な視点で研究が行われているが、これらに共通する結果として、津波避難ビルには大きな効果が期待されている。内閣府の津波避難ビル等に係るガイドライン¹⁾によれば、津波避難ビルとは「津波浸水予想地域内において、地域住民等が一時もしくは緊急避難・退避する施設（人工構造物に限る）」と定義されている（内閣府, 2005）。また、このガイドラインでは、津波避難ビルの役割を「津波による被害が想定される地域の中でも、地震発生から津波到達までの時間的猶予や、地形的条件等の理由により、津波からの避難が特に困難と想定される地域に対し、やむを得ず適用される緊急的・一時的な避難施設である」としている。津波避難ビルは、短時間で津波が到来する地域からの避難で、高台までの避難に長時間を要する平野部や、背後に急峻な地形が迫るような海岸部で欠かすことのできない避難の拠点として位置づけられている（小川ほか, 2015）。

この津波避難ビルは、津波発生時の避難行動に関する研究の中では、地域全体における避難場所の配置や数などの分析対象として扱われる場合が多く、それ自体を対象とした研究は少ない（桑沢ほか, 2015）。津波避難ビルへの避難者の移動をシミュレーションによって研究した大畑ほか（2007）、Mas et al.（2013）や畑山ほか（2014）などもあるが、これ

らは居住地からビルまでの平地における移動（水平移動）を扱ったものである。津波避難においては、ビルに到達した後も、階段などによる上層階への移動（垂直移動）も必要であるが、これを扱った研究は稀である。

津波浸水想定域が広範囲を覆う臨海都市では、津波から命を守るために、いち早く海岸から離れて津波避難ビルの上層階に向かうことが必要である。この津波避難行動を一定の精度を持って予測できれば、適切な避難ルートの整備や避難施設の確保に繋げることが可能となる。しかし、実際の避難行動は個人ごとに異なり、避難開始のタイミングだけをとっても様ではない。そのため、個人の集合体としての避難を地域全体で予測するのは難しい。特に、津波避難では平地部を移動する水平的移動だけでなく、津波避難ビル内部の階段を上る垂直移動も考慮する必要があるため、地域全体の行動はきわめて複雑なものとなる。このように複雑な事象を扱うには、行動する個人をコンピュータ上のエージェントとして捉え、行動ルールを付与した複数エージェントの動きから全体を把握することが可能なマルチ・エージェント・シミュレーション（Multi-Agent Simulation, 以下、MAS）が有効とされている（岩永ほか, 2014）。

集団避難の空間分析に関しては、奥野ほか（2018）のように衛星測位で取得した避難訓練の移動履歴データを用いた研究があるが、これは数十人という人数であるため実施できたものである。高齢者を含む1,000人規模の集団避難訓練の場合、実施や移動履歴データ収集は困難である。また、屋内の垂直移動に関しては、衛星測位を行う事が難しい。そのため住民をエージェントとしてモデル化し、その住民エージェントに先行研究で得られている移動速度等のデータをもとにした行動ルールを付与して、コンピュータ上でシミュレーションすれば、津波避難行動に伴って発生する状況を観測することができる。

そこで、本研究は大津波の到来が予想される臨海都市において、東日本大震災以降の津波対策としての津波避難ビル整備について概観し、その有効性と課題を水平移動と垂直移動を含む住民の徒歩避難に関するMASから明らかにすることを目的とする。なお、本研究の対象地域は北海道釧路市の中心市街地である。ここは千島海溝沿いの海溝型地震による大津波が予想されており²⁾、その対策として多くの高層建築物が津波避難ビルに指定されている。

本研究では、まず津波浸水想定 of 更新後における津波避難場所の分布と避難圏の変化を分析し、避難場所と夜間人口との関係について検討する。また、主要な津波避難ビルの概要についても確認する。次に、津波避難ビルへ徒歩で向かい、ビル内の階段を上って最上階へ避難するまでの行動をMASにより分析する。そのために初期設定、道路や津波避難ビル内階段のモデリング、住民の行動ルールなどを決

定する。さらに、対象地区全体と街区ごとの2種類のシミュレーションを行い、避難開始から津波避難ビルに到着した割合（到達率）、ビル内階段の上昇を開始した割合（上昇開始率）、5階を通過した割合（5階通過率）、最上階に到着した割合（避難完了率）を時系列的に分析する。最後に、これらの結果を統合し、大津波が予想される臨海部の市街地において、津波避難ビルの有効性と課題を明らかにする。

II. 地域概観

本研究の対象である釧路市は、北海道東部の太平洋沿岸に位置し、2015年国勢調査によると人口は174,742人、世帯数は82,078世帯である³⁾。釧路市では東日本大震災後の2013年8月には、新たな想定による津波避難計画が策定され、中心市街地は、ほぼ全域が津波浸水想定5m以上の範囲に入るようになった。この津波避難計画によると、想定する大津波の到達予想時間は、釧路市中心市街地で概ね30分である（釧路市防災危機管理課、2018）。

釧路市は北海道の市町村で最も津波想定域内の人口が多く、内藤・橋本（2018）によると、2015年の国勢調査ベースでの推計で、夜間人口が約12万5千人、昼間人口が約13万人である⁴⁾。釧路市の中心市街地は港湾を中心に発展した地区であり、南側は海に接している（図1）。また、中心市街地の東西には釧路川と新釧路川の2本の河川が流れており、釧路川には3本、新釧路川には1本の橋しか通行できない。さらに、北側にはJR根室本線の高架ではない鉄道があり、鉄道を越えるためには2本の高架道路を通る必要がある。このように中心市街地は一方が海、残りを川と鉄道に囲まれており、津波発生時には橋や高架道路に多くの避難者が集中し、移動が困難になる可能性が高い。そのため、中心市



図1 釧路市中心市街地の概観
国土地理院基盤地図情報により作成。

街地での避難においては津波避難ビルが重要となる。

III. 釧路市中心市街地における津波避難場所の変化

1. 避難場所の分布変化

まず、釧路市の中心市街地で、津波避難場所の変化をみる。2012年6月に北海道が公表した最大クラスの津波（L2）の浸水想定によると、釧路市の中心市街地には5.0m以上の津波が襲来し、釧路川沿岸では8.0m以上、西部の海岸付近には10.0m以上の津波が予想されている（図2）。

釧路市の旧想定では海岸付近と釧路川沿いのみの狭い範囲が浸水想定域とされていたが、新しい想定で浸水範囲が拡大すると、釧路市は12か所の津波避難場所を指定した（図3）。その中で釧路市は駅前のホテルなどを津波避難ビルに指定して津波避難の対策を考えたが、当時は中心市街地の西部に適当なビルがなかったため、地域住民は避難場所への到達が困難であった。

2020年時点では、釧路市によって指定される避難場所は14か所となった（図4）⁵⁾。ここで注目されるのは、市街地東部に道営住宅であえーる幸団地（12階）および釧路市役所防災庁舎（6階）という2つの津波避難拠点が加わったことである。道営住宅であえーる幸団地は2015年に釧路駅付近で建設され、災害時には4階以上の共用廊下も含め約1,000人の避難が可能である⁶⁾。

釧路市役所防災庁舎も2015年に完成し、災害時には約640人が避難できる。津波避難場所については、指定避難場所のように明確な定員が示されているわけではないが、このように多くの避難者を受け入れることができる耐震構造を持った避難施設が完成したことで、釧路市中心部の津波避難準備は大きく改善されたと考えられる。しかし、消防本部（3階）が避難場所から除外されたため、釧路川河口付近の避難場所の密度は低下している。

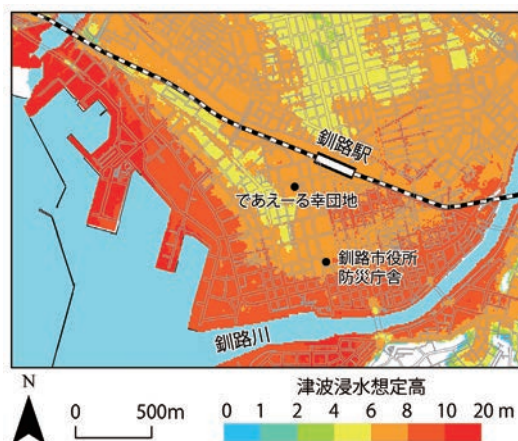


図2 釧路市中心部における津波浸水想定
北海道の津波浸水結果GISデータにより作成。

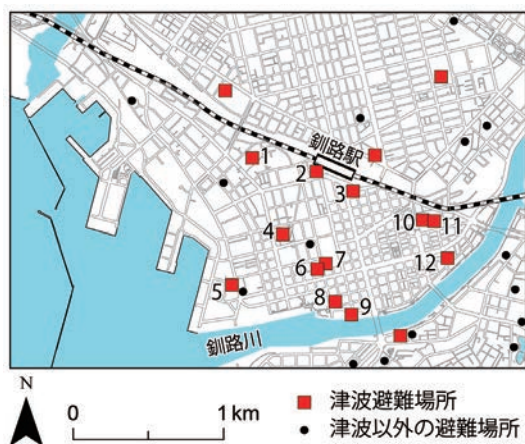


図3 釧路市中心部の津波避難場所（2012年）

1：中央小学校，2：釧路ロイヤルイン，3：釧路東急イン，4：釧路地方合同庁舎，5：消防本部，6：釧路プリンスホテル，7：釧路市役所，8：釧路全日空ホテル，9：釧路フィッシャーマンズワーフ MOO，10：ヤマダ電機，11：ビッグハウス旭町店，12：総合福祉センター。釧路市資料により作成。

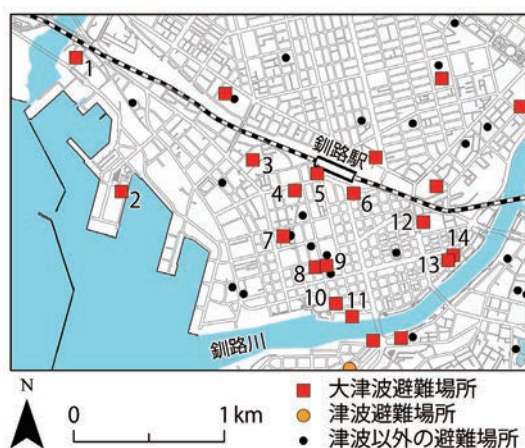


図4 釧路市中心部の津波避難場所（2020年）

1：浜町ポンプ場（屋上），2：マリントボス，3：中央小学校，4：道営住宅であえーる幸団地，5：釧路ロイヤルイン，6：ホテルクラウンヒルズ釧路，7：釧路地方合同庁舎，8：釧路プリンスホテル，9：釧路市役所防災庁舎，10：ANA クラウンプラザホテル釧路，11：釧路フィッシャーマンズワーフ MOO，12：ヤマダ電機・ビッグハウス旭町店，13：総合福祉センター，14：旭改良住宅。釧路市資料により作成。

この他に，中心市街地の西部では浜町ポンプ場とマリントボス（釧路市水産資料室）の2か所が避難場所に指定されたため，近隣への避難が可能になった。ただし，浜町ポンプ場は3階建ての建物であり，避難場所に指定されているのは屋上のみであるため，収容人員や積雪期の滞在などが課題となる。また，いずれも海岸近くで10.0 mを超える津波浸水が想定されていることから，さらなる安全性への検討が必要である。

当該地域への津波第1波は地震発生後，約30分

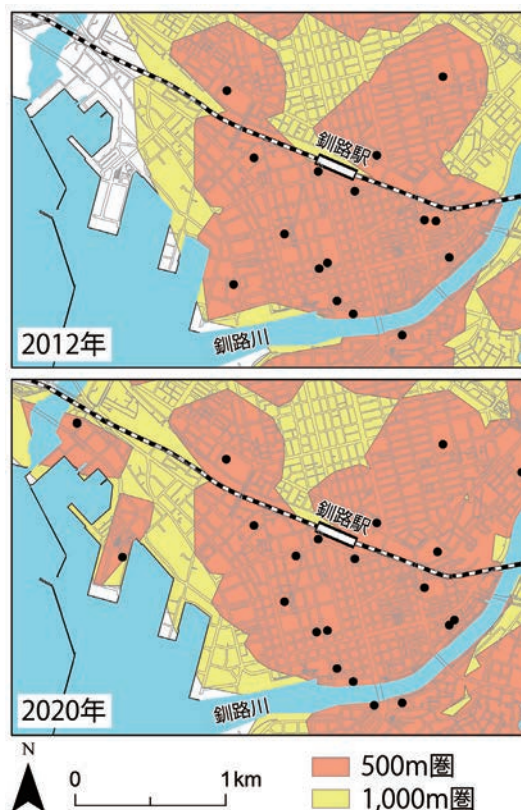


図5 釧路市中心部の津波避難圏の変化
2020年は大津波避難場所のみの避難圏。

と予想されている。国土交通省や消防庁は避難時間を15分とし，500 m以内の移動で避難場所へ到達できる環境を推奨している。また，釧路市は独自に避難場所への到達距離を1,000 mとして対策を行っている。ここで，各避難場所からの道路距離による500 m圏と1,000 m圏を示すために，避難場所を中心とするGISで道路ネットワーク空間上の等距離圏（ネットワークバッファ）を描画する⁷⁾。2012年における避難圏をみると，中心市街地の東部は，ほぼ全域が500 m圏に入る（図5）。しかし，寿町から西側は1,000 m圏となり，宝町より西側は避難のため1,000 m以上の避難が必要となる。

2020年における大津波避難場所の避難圏をみると，西部に2か所の避難場所が指定されたため，中心市街地のほぼ全域が1,000 m圏に覆われる。また，2012年に避難困難とされた地域の一部は避難場所の500 m圏に含まれ避難が容易となっている。しかし，釧路川河口付近は，消防本部が避難場所ではなくなったため500 m圏から外れ，1,000 m程度の移動が必要となっている。

2. 避難場所と人口密度の対応

ここで避難場所と夜間人口の分布の関係をみるため，2015年国勢調査（小地域）の人口密度と，2020年時点での大津波避難場所を重ねる（図6）。人口密度は，釧路駅と弊舞橋とを結ぶ北大通沿線の

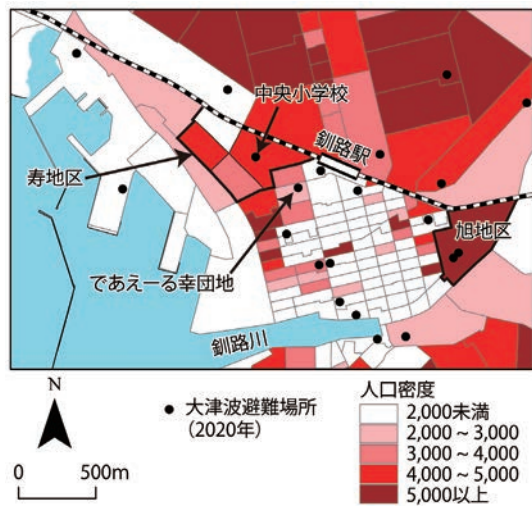


図6 津波避難場所と夜間人口との対応
人口密度は2020年国勢調査（小地域）統計により作成。

都心地区で低く、中心市街地東部の旭町地区や西部の寿地区で高い。なお、大津波避難場所は、人口密度が高い地区と低い地区の境界付近に分布している。

東部の旭町地区では、浸水想定の更新後、鉦路川沿岸の旭改良住宅（9階）が新たに避難場所に指定され、自治区内での避難が可能になっている。しかし、西部の寿地区には、大津波の発生時に鉦路市が避難先として推奨する4階以上の建物が存在しない。鉦路市津波避難計画によれば、寿地区の避難場所は中央小学校である。しかし、この校舎は3階建てで、屋上に避難することができないため、津波浸水想定が10.0mに達するこの地区では十分な高さがあるとは言えない⁸⁾。このような状況において、寿地区に近い場所で新たな避難場所として、道営住宅であえーる幸団地が建てられたため、津波避難の拠点となることが期待されている。

3. 道営住宅であえーる幸団地の概要

北海道建設部住宅局によりJR鉦路駅付近において津波避難機能を備えた道営住宅の整備が進められ、2015年に道営住宅であえーる幸団地が完成した。鉦路市は、この建物を津波緊急避難施設（津波避難ビル）として指定した。であえーる幸団地は海岸から約1,000mに位置し、鉄筋コンクリート造の12階建てであり、収容可能な避難者数は1,000人で、最上階の集会室や共用廊下を避難スペースとしている。また、ビル屋上部分に非常用発電機が設置されており、仮に津波で下層階が浸水した場合、冬季においても暖房を確保することが可能である（高橋ほか、2016）。このビルには北側と南側に出入り口（玄関）があり（図7）、ビル内の階段は北南2か所に設置されている。

ここへの避難における課題で深刻なものは、屋内

の階段を上り安全な階までの移動に時間を要することである。国や鉦路市による避難圏は、あくまでも道路などを移動する水平移動に限ったものであり、津波避難ビルの場合には階段などを上って垂直移動を行う必要がある。なお、このビルの入り口は狭いため、多くの避難者が入るためには待ち時間が必要となる。また、ビル内の階段を避難者は1列もしくは2列になって移動するが、階段の幅が狭いため追い抜くことは難しい。

このような状況が考えられるため、であえーる幸

a) 北側外観



b) 南側外観



図7 新設された津波避難ビル「であえーる幸団地」
道営住宅であり、鉦路市津波避難計画にもとづく津波緊急避難施設に指定されている。2017年7月深田撮影。

団地の津波避難ビルとしての有効性や課題を検討するためには、居住地からの水平移動だけでなく、ビル内における階段での垂直移動についても考慮する必要がある。そこで本研究は、中心市街地西部の寿地区を事例とし、住民が居住地から徒歩でビルの最上階に避難するまでの行動を、道路や階段をモデル化したシミュレーションを行うことで⁹⁾、津波避難の課題を検討する。なお、2018年北海道胆振東部地震のように地震発生後に停電の起きる可能性があるため、ビル内の避難は徒歩のみとし、エレベータを使用しないこととする。

IV. シミュレーションモデルの構築

1. シミュレーションの手法と対象地域

本研究は、道路や団地の階段をモデル化した上で、寿地区の住民が居住地から徒歩で、であえーる幸団地の最上階に避難するまでの行動をMASでシミュレーション¹⁰⁾することにより津波避難の課題を検討する。MASとは、コンピュータ上の行動主体であるエージェントの行動ルールや相互作用をモデルとして記述し、それによってシミュレーションを行う手法である(鳥海・山本, 2014)。本研究では、寿地区に居住する住民をエージェントとしてモデル化し、その住民エージェントに行動ルールを与え、津波避難行動をシミュレーションする。MASにおける各々のエージェントは、内部に行動ルールを持ち、環境や他エージェントとの相互作用により行動を決定するため、避難住民が津波避難ビル内の階段を上昇していく避難行動の状況をシミュレートすることが期待できる。

本シミュレーションでは、中心市街地西部の寿地区を対象とする(図8)。この地区の2015年国勢調査における年齢別人口は、年齢不明の人口を除外すると1,005人である¹¹⁾。なお、この地区は2020年国勢調査では4つの統計区に分かれているため、これらをA～D地区とし、それぞれの地区に関してシミュレーションを行うことで、ビルからの距離などによる避難傾向の違いについて検討する。



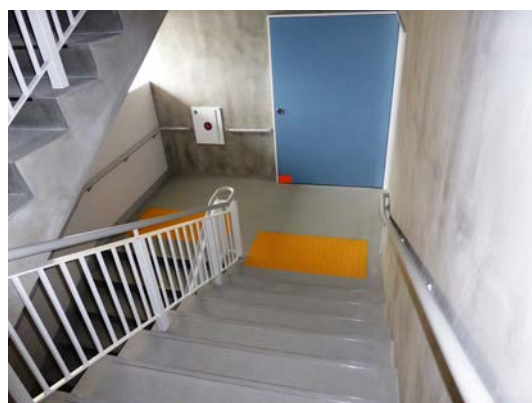
図8 シミュレーションの対象地区と道路ネットワークモデル

国土地理院の基盤地図情報および国土基本情報により作成。

本研究のシミュレーションでは、であえーる幸団地の最上階を終点とする。このビルの場合、5階まで上れば高さ15.0 m以上に到達するが、避難者が中層階で避難行動を止め廊下や階段に滞留すると、多くの者が玄関や下層階から階段を上れないという状況になる。そこで、本シミュレーションでは、より多くの避難者を津波避難ビルに収容することを考え、最上階を終点とする。

本シミュレーションの当該地区における道路のモデリングは、道路網の交差点をノード、道路をリンクとした。また、ビル内の階段部分に関するモデリングは、実際の階段の状況を2017年7月に現地を確認し(図9)、ビル内の階段における実測寸法をもとに、12階の高さを等分割した3Dモデルとしている(図10)。なお、図10は株式会社構造計画研究所のMASシミュレータartisocをベースに、筆者らが構築した津波避難シミュレーションモデルにおける画面表示の一部である。この図のように、本シミュレーションでは階段を上昇するエージェントを人型モデルで表現できる。構築したシミュレーションをコンピュータ上で実行すると、津波避難ビルに到着した人型モデルのエージェントが階段を上っていく様子を確認できる。その際、滞留が発生

a) 階段と踊り場



b) 階段の横幅



図9 津波避難ビル内部の階段

2017年7月に、であえーる幸団地内で深田撮影。

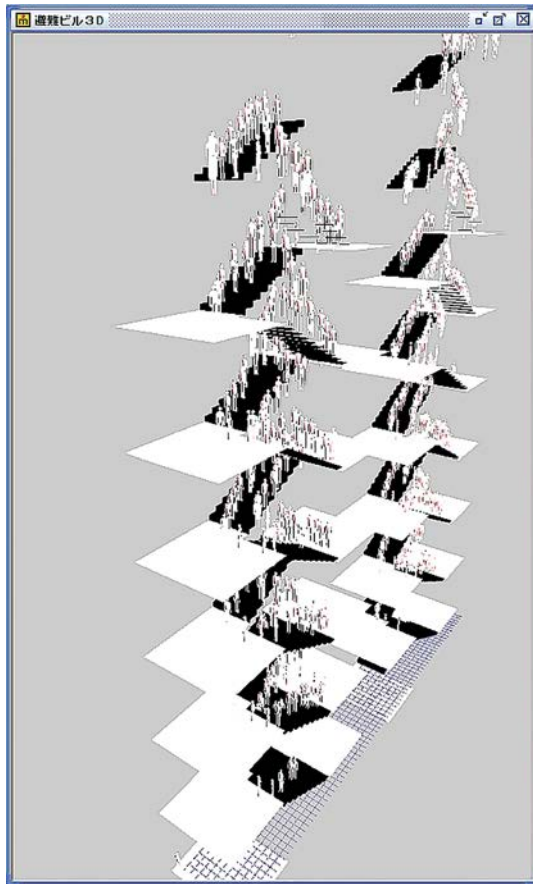


図 10 モデル化したビル内部の階段
画面上では人型モデルのエージェントが集団でモデル化した階段を上る。

するとエージェントがかたまって動かない状態になる。

2. エージェントの初期設定

本研究で行う MAS では住民 1 人を 1 エージェントとしてシミュレーションを行う。住民エージェントの初期位置は、現住民の詳細な居住位置が不明であるため、本研究対象地区である A 地区～D 地区の各中央地点付近を中心とした円状の範囲に、住民エージェントをランダムに発生させ、この津波避難ビルへ向かって最短経路で歩行移動する設定とする。住民エージェントの発生数は、本対象地区における 2015 年国勢調査の人口と一致するように、A 地区 518、B 地区 189、C 地区 227、D 地区 71 の合計 1,005 エージェントとする。であえーる幸団地の収容人員は 1,000 人であるため、ほぼすべてのエージェントを収容することができる。

本研究では、住民エージェントの避難開始を一斉避難ではなく、時間経過とともに開始することとし、大畑ほか (2007) をもとに、表 1 に示す頻度分布で避難する設定とする。これは、大地震が発生した場合、過去に経験したことがない大きな揺れのため、直ちに避難を開始する住民もいれば、人間の心

表 1 避難開始時刻の頻度分布

避難開始時刻 (分)	頻度 (%)
0.0 ～ 2.5	10.0
2.5 ～ 5.0	15.0
5.0 ～ 7.5	20.0
7.5 ～ 10.0	30.0
10.0 ～ 12.5	15.0
12.5 ～ 15.0	10.0

大畑ほか (2007) より引用。

表 2 住民エージェントの移動速度設定

年齢層	歩行速度 (m/s)		階段上昇速度 (m/s)	
	男性	女性	男性	女性
10歳未満	1.21	1.21	0.60	0.60
10-19歳	1.32	1.27	0.65	0.63
20-29歳	1.43	1.25	0.71	0.62
30-39歳	1.50	1.18	0.74	0.58
40-49歳	1.38	1.24	0.68	0.61
50-59歳	1.26	1.11	0.62	0.55
60-69歳	1.13	1.00	0.56	0.49
70歳以上	0.69	0.87	0.34	0.43

森山ほか (2006) により作成。

理的特性や過去の経験が逆に作用して、避難開始が遅れる場合もあることを考慮したためである。なお、この避難開始時刻の頻度分布は、2003 年 9 月に十勝沖を震源として発生した巨大地震のあとに、吉井 (2004) がまとめた住民避難行動調査の結果を参考としている¹²⁾。

住民エージェントの歩行速度は、先行研究 (大畑ほか, 2007; 岩永ほか, 2014) をもとに、平地で 1.50 m/s を基本速度とする。また、ビル内の階段の移動速度は、森山ほか (2006) を参考に 0.68 m/s を基本速度として年齢層ごとに設定する (表 2)。さらに、個人差を考慮し、各年齢層で ± 30% のばらつきをランダムに与える (深田ほか, 2017)。

なお、実際にエージェントが階段上昇する際には、疲労によってスピードが鈍る。そのため、上層階に上がるほどスピードが遅くなる重み付けが必要であるものの、先行研究での実験データ等がないため、今回のシミュレーションでは、まず最も単純なシミュレーションとして、重み付けを加えない方法で研究を行った。

3. エージェントの行動ルール

住民エージェントの行動フローを図 11 に示す。住民エージェントは、シミュレーション開始直後、寿地区内でランダムに発生させた初期位置から津波避難ビルの最上階へ向けて、最短経路で避難行動を開始する。その際、住民エージェントは年齢層別に

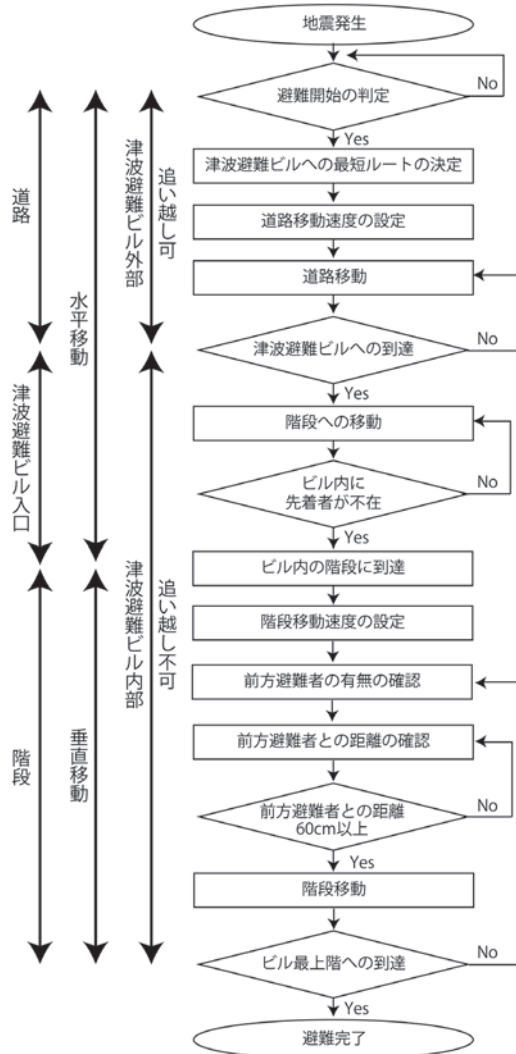


図 11 住民エージェントの行動フロー



図 12 住民エージェントの水平移動状況

この図は(株)構造計画研究所のMASシミュレータ artisoc をベースに、筆者らが構築した津波避難シミュレーションモデルにおける画面表示の一部で、赤い点が住民エージェントである。

設定された道路移動速度で道路網上を移動する(図12)。このビルへ徒歩で向かう平地の道路移動はダイクストラ法を用いて最短経路を選択する。なお、住民エージェントが道路を移動する場合には、前方の住民エージェントを追い抜くことができるように設定している。

住民エージェントが津波避難ビルに到着した後は、北側玄関1か所から内部に入る。ここで、入口を1か所とした理由は、津波避難において避難者が最短距離でビル内部に移動することを前提としたためである。なお、入り口から階段までには先着の避難者を追い越せない設定となっている。そのため前方に住民エージェントが階段下で滞留していた場合には、後着の住民エージェントは先着のエージェントを追い越さないで待機し、滞留が解消すると再び階段に向かって移動する。

住民エージェントが津波避難ビルに入った後は、2か所の階段に分かれて進み、それぞれの階段を横2列で上る。実際のビル内階段の状況を鑑み、前方の住民エージェントと常に60cmの間隔を空け、2列に並んで上ることとし、追い越しができない設定とする。そのため前方に住民エージェントが詰まっている場合には、住民エージェントは前方のエージェントを追従し、階段を上っていく。そして、住民エージェントが最上階に到着した時点で避難完了とする。なお、本シミュレーションでは、シミュレータの計算1stepを1秒として時間換算している。

V. 避難行動シミュレーションの結果と考察

1. 対象地区全体のシミュレーション結果

本研究では、前述した住民エージェントの行動ルールにもとづいた避難シミュレーションを100回実行し、その結果を平均して避難行動に要した時間として算出する。着目する項目は、避難開始から津波避難ビルに到着した割合(ビル到達率)、ビル内階段移動を開始した割合(階段移動開始率)、ビル5階を通過した割合(5階通過率)、最上階に到着した割合(避難完了率)の4項目である。

ここでは、避難開始後15分と30分の値に注目する。15分時点の値は、地震発生から15分を避難準備などに費やした後避難移動を開始した場合の結果である。また、30分時点の値は、地震発生から津波の到来までの時間をすべて避難移動に費やした場合の結果である。

まず、シミュレーション結果による全住民エージェントの避難行動と経過時間(全体平均)の関係をみる(図13)。ビル到達率をみると、避難開始から15分時点では住民エージェント全体の33.4%、30分時点では96.8%である。次に、階段移動開始率は、避難開始から15分時点で23.4%が、30分時点では66.7%である。この結果は、準備時間に15分を費やした場合、3分の1程度しかビルに到達できないことを示す。また、津波が到来するまでの

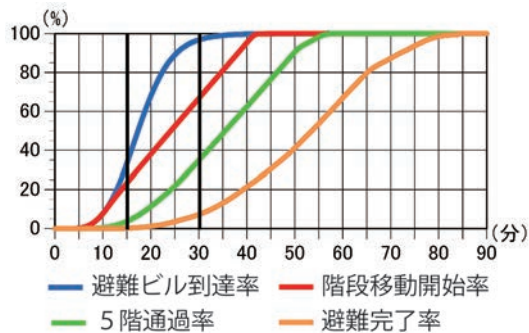


図 13 地区全体の津波避難ビルへの避難率

15分時点の値は、地震発生から15分を避難準備などに費やした後に避難移動を開始した場合の結果、30分時点の値は、地震発生から津波の到来までの時間をすべて避難移動に費やした場合の結果である。

30分を移動に費やすと、ほとんどの住民エージェントはビルに到達できるが、その一部しか階段を上っておらず、残りは階段の下で滞留した状態となる。

津波避難ビル内で安全圏に入ったことを示す5階通過率をみると、避難開始から15分時点で3.7%、30分時点で34.8%である。住民エージェントが最上階に到着した避難完了率をみると、15分時点では0.2%、30分時点で7.3%であり、全住民エージェントの避難完了までに要した時間は84分である。このビルの収容能力としては、ほぼすべての住民エージェントが避難可能であるが、シミュレーション結果では大部分が津波到達までに安全な上層階へ到達できていない。

2. 地区ごとのシミュレーション結果

地区ごとに算出した津波避難ビル到達率をみると(図14a), ビルに最も近いA地区の住民エージェントは、避難開始から15分時点で全体の45.4%, 30分時点で99.7%がビルに到達している。A地区に次いでビルに近いB地区の住民エージェントは避難開始から15分時点で37.7%, 30分時点で99.4%が到達している。ビルから遠いC地区の住民エージェントは、避難開始から15分時点で9.4%, 30分時点で89.3%が、D地区の住民エージェントは15分時点で10.5%, 30分時点で92.5%が到達という結果になる。

階段移動開始率をみると(図14b), A地区の住民エージェントは避難開始から15分時点で32.7%, 30分時点で81.7%が階段の上昇を開始している。また、B地区では15分時点で26.4%, 30分時点で75.1%が上昇を開始している。一方、C地区では避難開始から15分時点で5.0%, 30分時点で34.7%, D地区では15分時点で5.6%, 30分時点で37.9%と階段の上昇開始が遅い。

5階通過率をみると(図14c), A地区では避難開始から15分時点で5.8%, 30分時点で47.0%が5

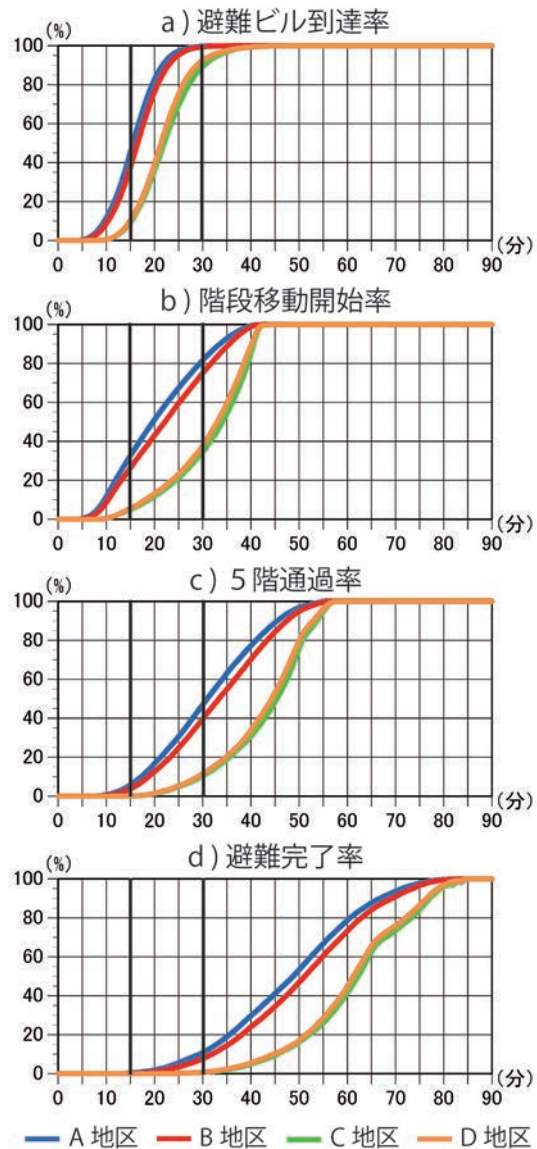


図 14 津波避難ビルへの地区別避難率

15分時点の値は、地震発生から15分を避難準備などに費やした後に避難移動を開始した場合の結果、30分時点の値は、地震発生から津波の到来までの時間をすべて避難移動に費やした場合の結果である。

階を通過している。B地区では15分時点で3.8%, 30分時点で39.6%が5階を通過している。C地区では15分時点で0.1%, 30分時点で約10.4%, D地区では15分時点で0.1%, 30分時点で11.6%という低い数値となっている。

地区別避難完了率をみると(図14d), A地区では避難開始から15分時点で0.3%, 30分時点では10.9%が最上階に到達している。B地区では15分時点で0.1%, 30分時点で7.8%である。C地区では15分時点で0.0%, 30分時点で0.7%, D地区では15分時点で0.0%, 30分時点で0.7%という結果となっている。

Ⅵ. 考察

釧路市は、東日本大震災の後、中心市街地において津波避難ビルを増やし、津波災害時における収容人数の増加や、近接性の上昇といった対策を講じてきた。その中で、道営住宅を津波避難の拠点として建設したのは画期的な試みであった。特に、津波避難場所の少ない中心市街地西部にとって、収容能力の大きな津波避難ビルは大きな防災効果を持つと思われる。その有効性と課題を、本研究はシミュレーションを用いて検証した。

釧路市津波避難計画によれば、大津波の中心市街地への到達予想時間は約30分とされ、それまでに安全な津波避難ビルの上層階に避難する必要がある。今回のシミュレーションにおける住民エージェント全体のビル5階の通過率は、地震発生から30分すべてを移動に費やした場合には34.8%であった。特に、ビルに近いA地区では47.0%、B地区では39.6%が5階以上に避難できているため、津波来襲時の避難先として、ある程度有効性が認められる。しかし、住民エージェントの半分以上は階段の混雑などにより4階以下にとどまっており、被災する可能性があることがわかった。

次に、津波避難ビルから離れているC地区とD地区のシミュレーション結果をみると、避難後30分時点で5階に到達できない住民エージェントは約90%であった。そのため、これら地区の住民にとって、このビルではなく、別の避難先を考える必要が感じられる。このように同じ地区においても津波避難ビルからの距離によって、その効果には大きな違いが生じることが明らかになった。

さらに、シミュレーション結果で、津波避難ビルへの到達割合と階段上昇開始割合の差をみると、地震発生後から津波到来までの30分間を避難移動に費やせば、住民エージェント全体のうち96.8%がビルに到達するが、階段上昇開始率は約66.7%であった。これは、住民エージェント全体の約30%がビル内の階段を上れずに立ち止まっている状況を示す。この滞留が生じる要因としては、住民エージェントの移動速度の変化が挙げられる。平地の歩行速度とビル内の階段上昇速度に差異があり、その差異が生じる地点がビルの入口であるため、ここで滞留が発生するものと推察される。このように津波避難ビルに関しては、従来の防災計画のように500mや1,000mといった水平移動の距離だけではなく、垂直移動や階段付近における滞留の時間も考慮に入れる必要がある。

なお、シミュレーションは、避難者全員がきわめて理想的な行動を取った結果を示している。実際には、階段上昇による体力が低下で速度が落ちることや、階段の途中で多くの者が休止して移動の妨げになることなどが考えられる。今回のように理想的な行動でも、一部の避難者しか津波到達までに上層階へ移動できないため、この津波避難ビルへの避難だ

けでなく、他の避難方法もあわせて検討すべきである。

以上のように、東日本大震災後に津波浸水想定が更新されてから、釧路市は中心市街地における津波避難対策として、収容人数の多い津波避難ビルを整備してきた。住民の水平移動を中心に考えると、その効果は大きく、特に中心市街地西部の避難環境は改善された。しかし、高層のビルでは階段移動に時間がかかり、収容人数に余裕はあるものの、多数の避難者が津波の到来までに上層階に移動できない可能性のあることがわかった。津波避難ビルの収容能力が大きいことは大切であるが、その有効性については定員数だけから判断するのではなく、水平移動や垂直移動も考慮して、住民にとっての近接性の高さから判断することが、津波対策において重要と思われる。

Ⅶ. おわりに

本研究は大津波の到来が予想される釧路市の中心市街地を事例として、津波避難ビルの有効性と課題を、水平移動と垂直移動を含む住民の徒歩避難に関するマルチ・エージェント・シミュレーションから明らかにした。

釧路市の中心市街地では、北海道が津波浸水想定を更新した2012年から2020年までに津波避難場所を増やしており、特に市街地西部では新たに避難場所を指定した。これにより、市街地西部の住民にとって避難場所への近接性が上昇した。また、釧路駅前には高層の道営住宅が津波避難ビルとして建設されたことで、多数の避難者の収容が可能になった。

避難場所が少ない市街地西部で、自地区内に高層建築物が存在しない寿地区では、この団地が有力な避難先となっている。本研究は、その有効性や課題を検討するために、居住地から避難場所まで徒歩による水平移動を行い、その後に津波避難ビル内の階段で垂直移動を行って、最上階へ避難するまでの行動をMASにより分析した。

シミュレーションの結果では、対象地区住民の半数以上が、想定される津波到達までの時間内に、安全と考えられる避難ビル5階以上に避難することができない可能性が示唆された。特に、ビルから離れた地区にとっては、この避難ビルの有効性は低いものであった。さらに、水平移動から垂直移動に移行する際の歩行速度の変化や、階段付近における滞留なども全体的な避難移動を遅滞させる原因となっていた。この結果から、津波避難ビルの有効性については定員数だけから判断するのではなく、水平移動だけでなく垂直移動も考慮して、津波到達までの時間に、どの程度の避難者を収容できるのか検証した上で判断すべきだと考えられる。さらに、津波対策の策定においては、避難ビルの位置や高さだけでなく、床面積、階段の数や幅、入り口の広さなどの要素を考慮する必要性が感じられた。

本研究は、津波避難ビルの効用と限界を一定程度示すことができたと考えられる。このように、シミュレーション手法を用いれば、津波避難ビルへ向かう平地での移動や、避難ビル内における階数ごとの通過状況などを一定程度予測できることから、より詳細な津波避難行動計画の検討が可能になるものと考えられる。今後は、大畑ほか（2007）のような複数の避難場所を設定して避難者を分散させるシミュレーションと、本研究で行った垂直移動シミュレーションを組み合わせ、避難の最適化に向けての検討を行う必要がある。また、夜間人口だけでなく、中心市街地に人口が集中する昼間の時間帯でのシミュレーションも行うことも重要である。さらに、奥野ほか（2018）のように実際の避難移動に関する履歴データと比較して、シミュレーション結果の検証を行う事も今後の課題である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、北海道住宅局住宅課の方々に現地調査等のご協力を頂いた。本研究における津波避難シミュレーションの構築にあたり、京都大学防災研究所の畑山満則教授、(株)ヒューネスの沖観行氏にご助言頂いた。また、(株)構造計画研究所にはMASシミュレータ artisoc を提供頂いた。ここに記して深謝いたします。なお、本研究は文部科学省受託研究「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第二次）」、および JSPS 科研費 JP20K12394, JP19K01166, JP17K02104 の助成を受けたものである。

注

- 1) 2017 年 7 月に発表された『津波避難ビル等に係る事例集』の取りまとめに合わせ、津波避難ビル等に係るガイドラインは廃止された（内閣府 防災担当, 2017b）。
- 2) 政府の地震調査研究推進本部は、2021 年 1 月 1 日での算定結果として、十勝沖でも釧路沖でも今後 30 年以内に M7.0 ～ 7.5 程度のプレート間地震が発生する確率は 80% 程度とし、巨大な津波をもたらす地震が切迫していると述べている。
- 3) これまで釧路市では、1994 年 10 月の北海道東方沖地震など、地震と津波の被害に何度も見舞われてきた。近年では、2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震で、釧路市には最大 2.1 m の津波が来襲し、釧路川の河口部両岸地域で浸水被害があった。
- 4) 内藤・橋本（2018）によると、津波浸水想定域内人口は、夜間人口で 124,794 人、昼間人口で 129,866 人である。
- 5) 2012 年には別々の避難場所として指定されていたヤマダ電機とビッグハウス旭町店は、2020 年には 1 つの避難場所になった。そのため、中心市街地の避難場所は、実際には 3 か所が増加している。
- 6) 道営住宅であえーる幸団地は、まちなか居住の促進とともに、計画段階から津波緊急避難施設として活用できるように想定された最初の道営住宅である。最上階には災害時に避難スペースとして利用できる集会所兼避難スペースが設けられている。本体工事は 2014 年 3 月～ 2015 年 11 月で

ある。

- 7) 道路距離による 500 m 圏と 1,000 m 圏の作成には、橋本（2013）による GIS でのネットワークバッファの作成手法を用いた。
- 8) そのため、この地区の自主防災組織は合同庁舎への避難を検討しているが、移動距離が長くなることに加え、海に近づくことになるので望ましくない。また、仁平・橋本（2015）によれば、同地区内の町内会では、地区内にある民間マンションを津波避難施設として利用できる協定を結んでいるが、多くの住民を収容できるだけの十分な容量はなく、待機する場所は開放通路であることから積雪のある冬季の避難は困難である。
- 9) 津波避難行動に関して、これまで多くの研究が行われてきた。例えば、社会心理学分野では、住民に対する津波意識調査をもとに津波避難の意思決定過程を分析した研究がある（例えば、関谷・田中, 2016）。また、コンピュータの高性能化に伴って、人間行動や情報伝達等をモデル化した津波避難シミュレーション分析が行われてきた（例えば、片田・桑沢, 2006）。さらに、東北地方太平洋沖地震発生の津波避難行動に対して、シミュレーションの再現性を検証した熊谷（2014）の研究がある。この研究では、アンケート調査による実際の避難所要時間とシミュレーションの結果は概ね一致し、徒歩による避難者の避難行動に対して津波避難シミュレーションが適用できることが示されている。
- 10) シミュレーションとは、実際には体験や実験が出来ないようなことを、モデルを用いて、コンピュータ上などで擬似的に体験・実験することである。モデルには、模型などを使って対象とする現象を実際に起こし、その結果を分析する物理モデル、問題とする対象を数式や論理式などを用いて表現した数理モデルなどがある。しかし、現実には、社会現象のような複雑な対象をモデル化しようとする、複数の変数群である数理モデルとして表現することは難しい場合が多い。このような場合、エージェントという行為主体を用いて、対象をモデル化することが適している。ここで、エージェントとは、内部に行動ルールを持ち、コンピュータ上で自律的に行動する主体で、例えば、人間の行動をモデル化する場合、エージェントは「ヒト」に相当し、道路交通網をモデル化するのであれば「自動車」に対応する。エージェント・モデルは、エージェントの行動ルールや相互作用をコンピュータ・プログラムとして表現するものであり、MAS とは、複数のエージェントの行動をコンピュータ上で「実行」し、そこで何が起るのかを観察することを意味している。
- 11) 寿地区は海岸からの 400 m ～ 500 m の位置にあり、標高は 4 m 程度である。2015 年国勢調査における中心市街地の人口は 4,999 人であり、その中で寿地区の人口は 1,010 人（年齢不詳の 5 人を含む）と 20.2% を占めている。また、65 歳以上の人口の比率では、釧路市が 30.35%、中心市街地が 33.00%、寿地区が 30.15% とほぼ同程度である。
- 12) 吉井（2004）によれば、2003 年十勝沖地震の際、公的避難場所に行った人の避難方法は徒歩が多いと報告されている。そこで、本シミュレーションにおける住民エージェン

トは、すべて徒歩にて避難する設定とする。

文 献

- 岩永佐織・藤井亜弥・松浦義則 (2014) : 呉市の津波避難シミュレーション. 海上保安大学校研究報告, 57 (1-2), 15-24.
- 大畑大志郎・高井伸雄・鏡味洋史 (2007) : 釧路市中心市街地における津波避難施設配置の評価—マルチエージェントシステムを用いた津波からの避難シミュレーション その2—. 日本建築学会計画系論文集, 612, 87-91.
- 小川雅人・坪井壘太郎・畔柳昭雄 (2015) : 津波避難ビルの建築的特徴と地域的傾向に関する研究—南海トラフ巨大地震に伴う被害想定地域を対象として—. 日本建築学会計画系論文集, 707, 221-230.
- 奥野祐介・橋本雄一 (2015) : 積雪寒冷地における疑似的津波避難に関する移動軌跡データ分析. GIS—理論と応用, 23 (1), 11-20.
- 奥野祐介・塩崎大輔・橋本雄一 (2018) : GNSSを用いた疑似的津波集団避難行動分析—北海道釧路市・厚岸町を事例として—. 地理情報システム学会講演論文集, 27, B-5-5.
- 片田敏孝・桑沢敬行 (2006) : 津波に関わる危機管理と防災教育のための津波災害総合シナリオ・シミュレータの開発. 土木学会論文集 D, 62 (3), 250-261.
- 釧路市防災危機管理課 (2018) : 『釧路市津波避難計画第5版』釧路市.
- 桑沢敬行・細井教平・片田敏孝 (2015) : 波避難場所の誘導効果とそれを踏まえた設置場所のあり方に関する研究. 土木学会論文集 D3, 71 (3), 117-126.
- 熊谷兼太郎 (2014) : 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動の津波避難シミュレーションによる再現性の検証. 土木学会論文集 D3, 70 (5), 187-196.
- 関谷直也・田中 淳 (2016) : 避難の意思決定構造—日本海沿岸住民に対する津波意識調査より—. 自然災害科学, 35, 91-103.
- 高橋信二・関 伸泰・菊地邦春 (2016) : 津波避難機能を備えた道営住宅の整備—釧路市道営住宅「であえーる幸団地」—. 国土交通省北海道開発局第 59 回 (2015 年度) 北海道開発技術研究発表会論文集. <https://thesis.ceri.go.jp/db/files/16157526535847b995c6bf3.pdf> (最終閲覧日: 2021 年 5 月 10 日)
- 中央防災会議 (2011) : 中央防災会議東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告. <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/pdf/houkoku.pdf> (最終閲覧日: 2021 年 5 月 10 日)
- 鳥海不二夫・山本仁志 (2014) : マルチ・エージェント・シミュレーションの基本設計. 情報処理, 55 (6), 530-538.
- 内閣府 (2005) : 『津波避難ビル等に係るガイドライン』津波避難ビル等に係るガイドライン検討会, 内閣府政策統括官 (防災担当).
- 内閣府 (防災担当) (2017a) : 指定緊急避難場所の指定に関する手引き. <http://www.bousai.go.jp/oukyu/hinankankoku/pdf/shiteitebiki.pdf> (最終閲覧日: 2021 年 5 月 10 日)
- 内閣府 (防災担当) (2017b) : 津波避難ビル等に係る事例集. <http://www.bousai.go.jp/jishin/tsunami/hinan/pdf/jireishuu.pdf> (最終閲覧日: 2021 年 5 月 10 日)
- 内藤健裕・橋本雄一 (2018) : 積雪寒冷都市における津波避難困難地域に関する空間分析—北海道釧路市を事例に—. 地理情報システム学会講演論文集, 27, B-5-1.
- 仁平尊明・橋本雄一 (2015) : 釧路市における自主防災組織の活動から見た津波避難の課題. 地理学論集, 90 (1), 1-14.
- 橋本雄一 (2013) : GIS とジオマイクロデータを用いた臨海都市における冬季災害時避難の地理学的研究. 一般財団法人第一生命財団: 『平成 24 年度研究助成調査研究報告書』.
- 橋本雄一編 (2015) : 『QGIS の基本と防災活用』古今書院.
- 畑山満則・中居楓子・矢守克也 (2014) : 地域ごとの津波避難計画策定を支援する津波避難評価システムの開発. 情報処理学会論文誌, 55 (5), 1498-1508.
- 深田秀実・橋本雄一 (2014) : 地方自治体における自立的な津波ハザードマップ作成のための PM 手法適用可能性に関する検討. 地理情報システム学会講演論文集, 23, C-2-3.
- 深田秀実・橋本雄一・沖 観行 (2017) : 津波避難ビルの階段上昇を含む避難行動シミュレーション—釧路市橋北地区を対象とした基礎的検討—. 地理情報システム学会講演論文集, 26, B-4-2.
- 最上龍之介・橋本雄一 (2015) : 積雪寒冷地における保育園の津波集団避難—北海道釧路市における認可保育園を事例に—. 地理学評論, 88(6), 571-590.
- 森山修治・長田悠平・土屋伸一・小川純子・浜 暁也・神忠 久・渡邊大地・長谷見雄二 (2006) : 津波避難ビルにおける階段歩行特性に関する実験研究—その 2 階段上昇時の群集歩行特性—. 日本建築学会学術講演梗概集, E-1, 907-908.
- 吉井博明 (2004) : 住民に対する津波避難アンケート調査. 平田直編: 『平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震に関する緊急調査研究報告書』東京大学地震研究所, 1-24. <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/people/hirata/tokati/4.3.7/4.3.7.pdf> (最終閲覧日: 2021 年 5 月 10 日)
- Mas, E., Adriano, B. and Koshimura, S. (2013) : An integrated simulation of tsunami hazard and human evacuation in La Punta, Peru. *Journal of Disaster Research*, 8 (2), 285–295.

(2021 年 8 月 8 日受理)