

エージェントモデルを用いた津波避難シミュレーション手法の開発 - 釧路市における津波避難ビルの垂直避難を対象として -

深田 秀実*・橋本 雄一**

Development of Tsunami Evacuation Simulation Using Agent Model - A Case Study of Vertical Evacuation of Tsunami Shelter Building in Kushiro City -

Hidemi FUKADA*, Yuichi HASHIMOTO**

Abstract: The method using multi-agent simulation is one technique for analyzing evacuation behavior when a tsunami occurs. With previous tsunami evacuation simulations using agent models, most research has focused on issues such as the layout of evacuation locations in the area being studied, and there are almost no cases of research incorporating vertical evacuation simulations using tsunami shelter buildings as evacuation locations. Thus, for this research, tsunami evacuation simulator was developed, modeling stairways inside tsunami shelter building, and enabling analysis of the behavior of residents who travel to the building on foot and vertically evacuate. This study developed a simulator for evacuation to the tsunami shelter building in the Central Kushiro, Hokkaido. The results of simulation were able to show the utility and limitations of this building.

Keywords: 津波避難ビル (Tsunami Shelter Building), エージェント (Agent), シミュレーション (Simulation), 釧路市 (Kushiro City)

1. はじめに

地理空間情報活用推進基本計画は、5年ごとに見直され、2017年3月24日に第3期となる基本計画が閣議決定された(内閣官房, 2017)。この第3期基本計画では、「IoT・ビックデータ・人工知能(AI)といった先端技術を活かしたG空間社会の実現によって“目指すべき姿”として、「災害対応力の強化・高度化」があげられており、「G空間防災システムの普及・促進」のひとつとして、地理空間情報を活用したシミュレーションなどが明記されている。

また、2011年3月の東日本大震災を契機に、海岸線を持つ地方公共団体では、津波発生時において迅速に避難できるよう、避難路の再整備や津波避難ビル等の指定緊急避難場所に関する検討が行われている(内閣府:防災担当, 2017)。

これまで行われてきた津波発生時の避難行動に関する研究では、地域全体からみた避難場所の配置や数などに着目している場合が多く、津波避難ビルや

避難タワーといった津波避難施設を対象とした研究は少ない(桑沢ほか, 2015)。また、津波避難施設を対象としたシミュレーションでも、数百人規模の避難タワーを対象とした研究(畑山ほか, 2014)がある。しかし、津波避難ビルを避難場所とし、水平避難と垂直避難を連続させた津波避難シミュレーションはほとんどない。

そこで、本研究では津波避難ビル内の階段をモデル化し、住民が津波避難ビルを徒歩で垂直避難するエージェントベースのシミュレーションを開発した。住民が現に居住している団地ビル内を避難場所とし、周辺住民を対象とした大規模な津波避難訓練を実施するのは現実的ではないが、コンピュータ上でシミュレーションすることで、水平避難と垂直避難が連続する津波避難行動により、どのような状況が発生する可能性があるかを一定程度分析できる。また、その分析結果を行政機関等と共有することで、地域防災力の向上に寄与できるものとする。

* 正会員 小樽商科大学商学部社会情報学科 (Otaru University of Commerce)
〒047-8501 北海道小樽市緑3丁目5-21 E-mail: fukada@res.otaru-uc.ac.jp

** 正会員 北海道大学大学院文学研究院 (Hokkaido University)

2. マルチエージェント・シミュレーション

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)。また、東北地方太平洋沖地震発生後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。

そこで、本研究では、コンピュータを用いたシミュレーションのうち、マルチエージェント・シミュレーション(Multi-Agent Simulation, 以下, MAS)を用いる。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、そのモデルのもとでシミュレーションにより現れる現象を分析する手法である。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相互作用しながら行動を決定する(鳥海・山本, 2014)。

本研究では、研究対象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では、各々のエージェントが相互作用しながら行動するため、避難住民が津波避難ビル内の階段を上昇していく垂直避難行動の状況をシミュレートすることが期待できる。

3. モデル化する地域の概要

本研究では、北海道釧路市橋北地区の一部をモデル化する対象地区とする(図-1)。釧路市は、北海道東部の太平洋沿岸に位置し、人口は174,742人、世帯数は82,078である(2015年国勢調査)。

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2.1m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。

東日本大震災後の2013年8月には釧路市津波避

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以上であることが示された。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)。また、釧路市津波ハザードマップ(2021年6月現在)によると、大津波警報発表時の緊急避難施設として、学校やホテルなど合計67棟が指定されている。

本研究でモデル化する地区は、釧路市橋北地区のうち、JR釧路駅の西側に位置する寿町とする。本研究では、後述する津波避難シミュレーションの適用において、避難傾向の違いを検討するため、寿町を丁目に合わせてA地区～D地区に区分する(図-2)。同寿町は、海岸からの距離は400m～500m、海拔は4m程度で、近隣に高台が無く平坦な地形である。そのため、地震発生から津波到達までの時間的余裕が極めて少ないことから、津波避難ビル等により避難場所を確保することが必要な地区である。

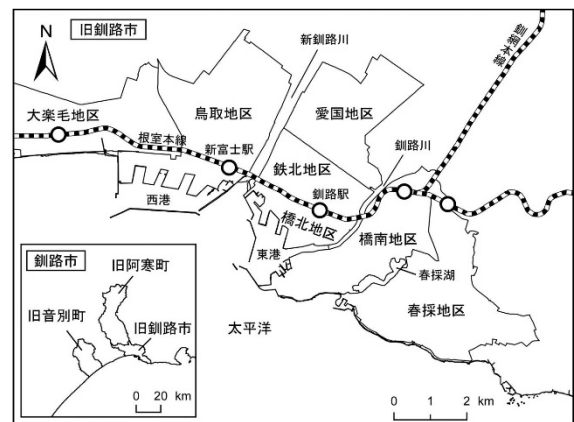


図-1 釧路市橋北地区の位置

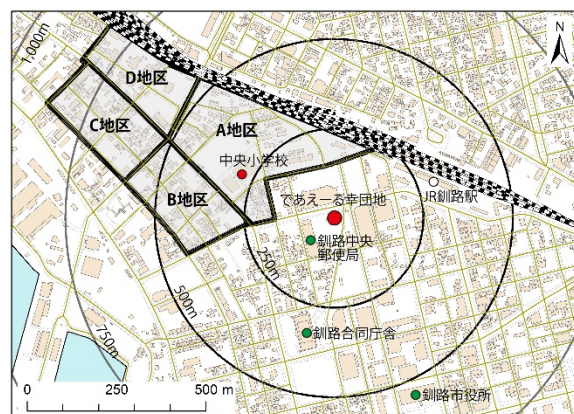


図-2 対象とした津波避難ビルの位置

4. 津波避難シミュレーションにおけるモデル化

4.1. 空間のモデル化

本津波避難シミュレーションにおいて、住民エージェントが避難する市街地空間は、避難を開始する地区、住民エージェントが水平避難する道路、垂直避難する津波避難ビルの内部により構成される。

4.2. 津波避難ビル内階段のモデル化

本研究でモデル化する寿町には、多くの住民を収容可能な高層マンションが無く、津波緊急避難施設の確保が課題となっている(仁平・橋本, 2015)。このような状況であったところ、寿町に隣接する場所に、津波避難機能を備えた道営住宅ビル「であえーる幸団地」が2015年に完成した。釧路市は、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。当該ビルは海岸から約1,000 mに位置し、鉄筋コンクリート造の12階建てである。津波避難ビルとしての収容可能な人数は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。

「であえーる幸団地」の外観を図-3に示す。当該ビルの出入り口(玄関)は、南側1箇所と北側1箇所の2箇所にある。また、ビル内の階段も北側に1箇所、南側に1箇所ある。当該ビルの場合、5階以上に避難できれば概ね高さ15m以上になり、想定される津波の高さ以上に到達すると考えられる。

本研究では、津波避難ビルとして設備の整った「であえーる幸団地」を寿町住民の避難場所と仮定する。



図-3 であえーる幸団地(北側)

当該ビル内の階段部分に関するモデリングに関しては、階段の状況を現地を確認し、実測した寸法をもとに行う。

4.3. 避難者のモデル化

本研究において、津波による避難者は寿町に居住する住民とし、住民エージェント一体が住民ひとりを示すものとする。住民エージェントは、属性として、年齢、移動速度、居住地区、避難場所(目的地)を持つ。ここで、住民エージェントが持つ移動速度とは、市街地を水平避難する際の歩行速度と津波避難ビル内を垂直避難する階段上昇速度の2つである。

5. 津波避難シミュレータの構築

前述したモデルをもとに、マルチエージェントシステム用のシステム開発ツールを用いて、津波避難シミュレータを構築した(深田ほか, 2017)。使用した開発ツールは、株式会社構造計画研究所が提供している artisoc である。

構築したシミュレータ上で、シミュレーションを実行している画面例を図-4に示す。構築したシミュレータを実行すると、左側ウィンドウに、赤い丸で表現された住民エージェントが寿町地区から津波避難ビルへ向けて道路上を水平避難する状況が表示される。同じく中央左寄りウィンドウでは、赤丸の住民エージェントが避難ビル内の2つの階段を移動していく状況を平面的に表示する。

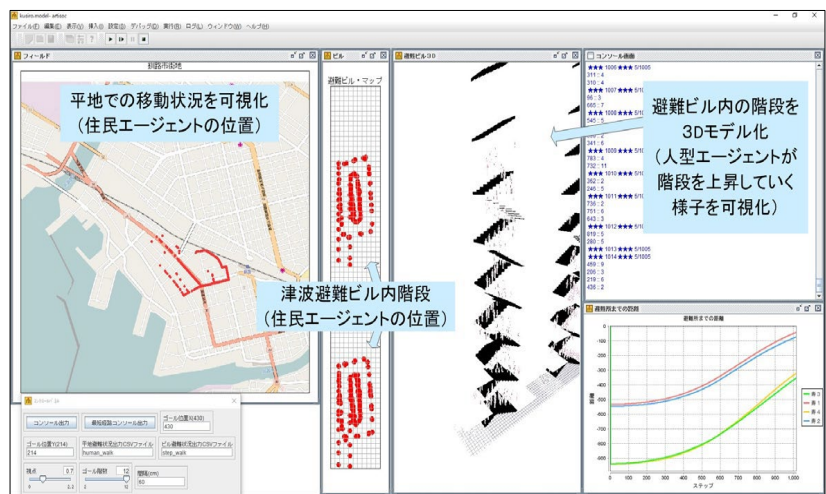


図-4 津波避難シミュレータの画面例

6. シミュレータのモデル対象地区への適用

6.1. エージェントパラメータの設定

エージェントモデルを用いて構築した津波避難シミュレータを釧路市寿町地区に適用する。本研究における津波避難シミュレーションは、地震発生時間を夜間と仮定し、モデル化した住民エージェントが居住する各地区から避難行動を開始して、道路網上を歩行移動し、避難場所とした津波避難ビル「であえーの幸団地」の最上階まで避難移動するまでの行動を扱う。

本シミュレーションで設定する住民エージェント数は、モデルとする釧路市寿町の人口を参考に決定する。寿町の人口データは、2015年国勢調査の年齢別人口とし、年齢不明の人口は除外する。その結果、対象人口は1,005人となった。

本シミュレーションでは、前述のとおり、寿町をA地区～D地区の4地区に分け、地区毎に住民エージェントを発生させて、避難傾向の違いをみる。各地区の住民エージェント数は地区毎の居住人口に合わせて、A地区518、B地区189、C地区227、D地区71の合計1,005エージェントに設定した。

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1.5 m/sを基本速度とし、表-1に示す年齢層別に設定した。また、津波避難ビル内の階段を上昇する速度は、森山ほか(2006)をもとに0.68 m/sを基本速度とし、同様に年齢層別に設定した。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ている。

6.2. 住民エージェントの初期設定

本シミュレーションにおいて、住民エージェントが避難行動を開始する際の初期設定を述べる。実際に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となれば、直ちに避難を開始する住民もいれば、人間の心理的特性などにより、避難開始が遅れる場合もあると考えられる。

そこで、本研究では、住民エージェントの避難開始を一斉同時避難ではなく、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-2に

表-1 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	0.596	0.596
10-19歳	1.32	1.27	0.650	0.626
20-29歳	1.43	1.25	0.705	0.616
30-39歳	1.50	1.18	0.739	0.581
40-49歳	1.38	1.24	0.680	0.611
50-59歳	1.26	1.11	0.621	0.547
60-69歳	1.13	1.00	0.557	0.493
70歳以上	0.69	0.87	0.340	0.429

(大畑ほか, 2007; 岩永ほか, 2014; 森山ほか, 2006により作成)

表-2 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
2.5 ~ 5.0	15
5.0 ~ 7.5	20
7.5 ~ 10.0	30
10.0 ~ 12.5	15
12.5 ~ 15.0	10

(大畑ほか(2007)より引用)

示す頻度分布で避難を開始する設定とした。

また、住民エージェントの初期位置は、住民一人ひとりの居住位置を特定できないことから、寿町A地区～D地区の各地区中央付近を中心とした円状の範囲に、各地区に割り当てた数の住民エージェントをランダムに発生させ、当該津波避難ビルへ向かって避難行動を開始する設定とした。

6.3. 住民エージェントの行動フロー

住民エージェントは、シミュレーション開始直後、研究対象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、時間経過とともに表-2に示した分布で避難行動を開始する。津波避難ビルへ向かう平地の歩行移動ではダイクストラ法を用いて最短経路を選択し、道路網上を移動する。その際、住民エージェントの移動速度は、表-1に示した歩行速度をもとに設定される。また、住民エージェントが道路を歩行移動する場合は、前方の住民エージェントを追い抜くことが出来る設定とした。

住民エージェントが避難ビルに到着した後は、避

難ビルの北側玄関1箇所から避難ビルに入る。ここで、入口を北側玄関1箇所とした理由は、津波避難の際、避難者は最短距離で安全な場所へ逃げ込みたいという意識があると考え、最短距離で津波避難ビルに入ることが可能な北側玄関1箇所のみとした。

津波避難ビル内に入った後は、ビル内部の階段2箇所へ順に分かれ、ひとつの階段を横2列の配置となって上昇する。階段上昇の際、実際の避難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60 cmの間隔を空け、2列に並んで上昇することとし、追い越しが出来ない設定とした。よって、前方に住民エージェントが詰まって滞留していた場合は、住民エージェントは前方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上昇を開始する。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秒としている。

7. シミュレーションの適用結果

前述した住民エージェントの行動ルールに基づいた津波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した。全住民エージェントの避難行動と経過時間（全体平均）の関係を図-5に示す。

この図において、まず、津波避難ビルに到達した割合（避難ビル到達）をみると、避難開始から15分時点で住民エージェント全体のうち、約33.4%が避難ビルに到達、30分時点では約96.8%が到達している。次に、避難ビル内の階段上昇を開始した割合（階段上がり始め）をみると、避難開始から15分時点で住民エージェント全体のうち約23.4%が上昇開始、30分時点では約66.7%が上昇を開始している。

また、避難ビル内階段の5階を通過した割合（5階通過）をみると、避難開始から15分時点で住民エージェント全体の約3.7%が通過、30分時点で約34.8%が5階を通過している。そして、住民エージェントが最上階に到着した避難完了の割合をみると、15分時点では約0.2%、30分時点で約7.3%となり、全住民エージェントの避難完了までに要した時間は約84分となった。

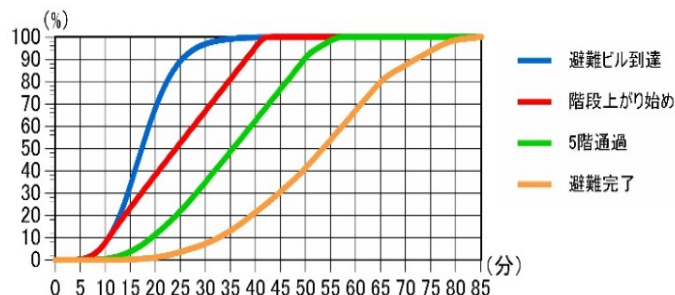


図-5 津波避難ビルへの避難率（全体平均）

8. シミュレーションの検証

本研究において行った津波避難シミュレーションでは、津波避難ビル内で垂直避難のための階段上昇を開始するところで住民エージェントの移動速度が変化し低下する設定となっていることから、この避難ビル内1階階段付近がボトルネックとなり、住民エージェントの滞留発生が予測される。

そこで、前章で述べたシミュレーション適用結果で、図-5の避難ビル到達の割合と階段上がり始め割合の差をみると、避難行動開始から30分時点で住民エージェント全体のうち約96.8%が避難ビルに到達しているにも関わらず、階段上がり始め割合は約66.7%となっている。この差は、住民エージェントが当該避難ビル内の階段付近で滞留している状況を表すものである。

よって、本研究で開発した津波避難シミュレーションでは、事前の予測どおり、住民エージェントの滞留が避難ビル内1階の階段付近で発生していることから、本研究における水平避難と垂直避難を連続させたモデルの妥当性が一定程度確保できているものと考えられる。

9. おわりに

本研究では、釧路市橋北地区における津波避難ビルのひとつをモデル化し、住民エージェントが当該避難ビル内階段を上昇する垂直避難シミュレータを構築した。構築した避難シミュレータを釧路市寿町に適用した結果、事前に予測された箇所で住民エージェントの滞留発生が確認でき、モデルの妥当性が一定程度確保できているものと思われる。

また、津波避難シミュレーションの結果では、当

該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出来ない可能性が示唆された。このことは、マルチエージェント・シミュレーションを用いた本研究の手法により、当該津波避難ビルの効用と限界を一定程度示すことが出来たものとする。

今後は、さらに精緻なモデル化を進め、複数の津波避難ビルを対象とした津波避難シミュレーション分析を行って、その結果を行政機関や地域住民組織などと共有していきたい。

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。本津波避難シミュレータの構築にあたっては、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）」、及び JSPS 科研費 JP20K12394、JP19K01166、JP17K02104 の助成を受けた。

参考文献

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.

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。 <<https://www.city.kushiro.lg.jp/common/000126473.pdf>>.

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.

桑沢敬行・細井教平・片田敏孝（2015）津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.

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.

内閣官房（2017）地理空間情報活用推進基本計画、 <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/sokuitiri/290324/170324_masterplan.pdf>.

内閣府：防災担当（2017）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>>.

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**, 1-14.

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・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.

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.