

VR を用いた津波避難行動の空間分析

塩崎大輔^{†1} 橋本雄一^{†2}

概要：本研究の目的は VR 避難訓練システムを開発し、北海道函館市沿岸部の観光地を対象とした津波避難訓練を行うことによって、避難行動者の行動ログを収集し分析することを目的とした。まず VR 津波避難実験を行うための VR 避難訓練システム（以下 VET システムと称す）を開発する。次に、VET システムを用いて、北海道函館市沿岸部における積雪期夜間の状況を再現した避難訓練実験を行う。最後に、収集された仮想空間内位置情報及び訓練参加者の経路選択情報から、参加者の避難行動を分析し議論する。対象地域は北海道函館市に位置する観光名所の 1 つである金森倉庫周辺とする。

システム運用に関して、VET システムは概ね良好に作動した。VR 避難訓練では参加者のノード選択ログから、参加者の滞留ポイントや交差点での状況を再現することができた。夏季昼間の実験では見通しがきかないような住宅密集地などのルート周知をいかに行うかなど、津波避難対策の課題を明らかにすることができた。積雪期夜間の VR 避難訓練では、視認できない高台よりも、視認しやすい近隣の津波避難ビルに避難者が集中する傾向が明らかとなった。アンケート結果から、参加者は標高の高い場所や海から離れた場所を目指す、積雪期夜間という状況の中で、明確な到達目標を設定できないケースが見られた。参加者は坂道を見つけてようやく高い場所に逃げられると認識するが、見つかるまでは道に迷うという状況を本実験で再現することができた。しかし、避難訓練中の移動に関してノード間の移動を省略したため、参加者が現在位置を見失うといった課題が残された。そのため今後はノード選択画面を静止画とし、移動中の周辺情報を動画で撮影し、ノード間移動の際に出力するなど、行動の連続性が保たれるような仕組みを検討する。

キーワード：津波災害、WebVR、避難訓練、防災教育、北海道

1. はじめに

東日本大震災以降、日本では津波災害に対する危機意識が高まり、国レベルから市民レベルまで様々なスケールで津波対策が議論されてきた。また北海道では、30 年以内に千島海溝沖での巨大地震の発生確率が 80% と予測されており、沿岸部における津波対策は急務である（地震調査研究推進本部、2018）。

国レベルでは、中央防災会議の南海トラフ巨大地震対策検討 WG が、地震及び津波災害に対する防災教育・防災訓練の充実を具体的に実施すべき対策の一つとして挙げており、その中では実際の避難訓練とともに、E ラーニングなどを活用した教育を推進している（内閣府、2013）。地方公共団体は国の指針に基づき津波浸水想定の見直しを進めるとともに、ハザードマップを刷新し、紙や Web といった様々な媒体による普及を進めている。市民レベルでは町内会が中心となり、津波避難訓練を抜き打ちで行うなどの活動も見られるようになった。

こうした中で近年注目されているのが、VR や AR といったいわゆる XR 技術を防災に活用する試みである。Bernhardt 他（2019）は、米国東海岸におけるハリケーン被害を VR によって再現し体験させることによって、災害に対する危機感を向上させるといった結果を示した。日本で

は東京消防庁が VR 防災体験車を開発し、揺れ・風圧・熱・水しぶきといった 4D を交えて災害を体験させる試みを始めた（東京消防庁、2018）。自治体の中では、秋田市と凸版印刷は津波災害を対象とした避難行動・避難誘導を体験できる避難行動シミュレーションシステムを構築した（秋田市、2019）。

しかしこれらのシステムは防災・減災のための啓発を目的とする側面が強く、参加者が体験を通してどのような行動をとるのかを分析するには至っていない。そこで本研究の目的は VR 避難訓練システムを開発し、北海道函館市沿岸部の観光地を対象とした津波避難訓練を行うことによって、避難行動者の行動ログを収集し分析することを目的とする。

2. 研究方法及び対象地域

本研究はまず VR 津波避難実験を行うための VR 避難訓練システム（以下 VET システムと称す）を開発する。次に、VET システムを用いて、北海道函館市沿岸部における積雪期夜間の状況を再現した避難訓練実験を行う。最後に、収集された仮想空間内位置情報及び訓練参加者の経路選択情報から、参加者の避難行動を分析する。

対象地域は北海道函館市に位置する観光名所の 1 つである金森倉庫周辺とする（図 1）。北海道函館市は北海道南部に位置し、古くから本州と北海道の玄関口として栄えてきた。2019 年度 12 月時点での人口は 255,308 人であり、道内では札幌市、旭川市に次ぐ第 3 の都市である。2004 年に戸井町・恵山町・榎法華村・南茅部町が函館市に編入合併し、現在の面積は 677.87 ㎢である。函館市を含め合併したすべ

^{†1} 北海道大学大学院文学院・院

Hokkaido University, Graduate School of Humanities and Human Sciences.

^{†2} 北海道大学大学院文学研究院

Hokkaido University, Faculty of Humanities and Human Sciences.

ての市町村が沿岸部に位置しており、津波発生時には被災する可能性の高い地域である。

合併以降の人口は毎年減少傾向にあるが、観光客数は2011年度から増加傾向にあり、2016年度には合併以来最も多い560.7万人を記録した。特に積雪期が含まれる下期は、2011年度が144.1万人だったのに対して、2018年度は201万人と大きく増加した。そして函館市における主要なホテルの多くは、函館駅から金森倉庫の間に位置している。このことから、積雪期夜間の対象地域周辺には多くの観光客が存在すると考えられ、こうした人々の避難行動を考えるのは防災・減災の観点からも重要であると考えられる。

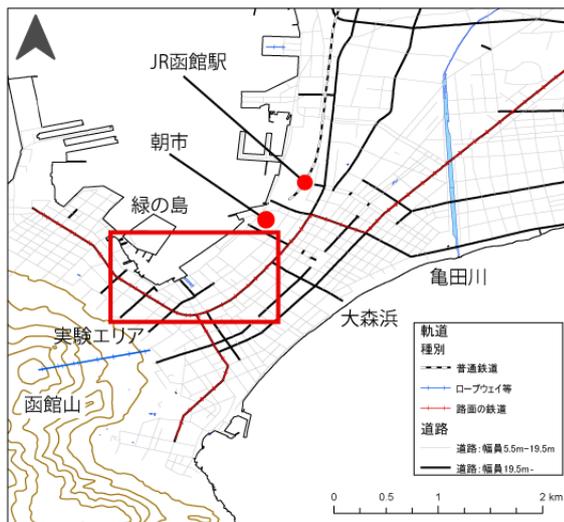


図1 函館駅外観図

3. VR 避難訓練システム概要

3.1 システム概要

VET システムは Mozilla が提供する WebVR フレームワークの A-frame を用いて開発された WebVR アプリケーションと、その VR アプリおよびデータを管理・利用する Web アプリで構成されるシステムである。システムは PHP 及び HTML, JavaScript によって構築され、Virtual Private Server (VPS) 上の CentOS サーバーに設置される。データベースは MySQL を利用する。

VET システムに付与する機能は大きく2つである。1つ目は避難ルートを指定し、指定ルートからそれた場合は警告を発する VR 避難訓練機能である。2つ目は仮想訓練結果を WebGIS 上で確認することのできる訓練結果可視化機能である。VR 避難訓練機能は避難ルートを事前に設定し、その範囲内で VR 避難訓練を行う機能である(図2, 図3)。最適な避難ルートから外れた場合は警告を発し、元の道へ戻るように促す。本機能の目的は、利用者に最適な避難ルートを示すと共に、ルート上の滞留ポイントを特定することである。

3.2 VR 避難訓練機能

実空間で行われる避難訓練は、自宅や学校、職場などの日常的に利用する建物から避難場所を目指す訓練が多い。しかし、出張や旅行などによって訪れた地域では、避難場所や避難場所へのルートを知ることは、ハザードマップなどの2次元上のデータに頼るところが大きく、実際にどのような空間が広がっているかを確認することは難しいが、本機能を用いることにより、避難経路の情報を視覚的に確認することができる。

また、ログデータから次のノード選択までの所要時間を計算することができる。避難行動者の迷いが、ルート選択の時間経過に現れると考えられる。これにより、滞留ポイントやエラーとなるノードの選択状況などから迷いやすいノードを特定でき、今後の津波対策の基礎データとなることが期待される。



図2 訓練参加者の様子



図3 VR 避難訓練システム画面

3.3 VR 避難訓練結果可視化機能

本機能は訓練参加者の経路選択結果を、津波浸水データと合わせて可視化する機能である。参加者のノード選択情報をアニメーションで表示し、地図上を移動するように見せる。また津波浸水データは浸水深変化の時間データを持っており、参加者は浸水深が広がる様子を自身の避難訓練結果と合わせてアニメーションで確認することが可能である。この機能は VR 上で表示するのではなく、PC などのブラウザ上に表示する。

4. VR 津波避難訓練

4.1 訓練概要

本研究は VET システムを用いることにより、函館市金森倉庫周辺における積雪期夜間の状況を再現し、45 人を対象とした VR 避難訓練実験を行う。第一段階として 20 代～50 代の男女 8 人を対象とする第 1 回実験を行う。津波災害に対応した避難所をゴール地点として、その最短経路を避難経路とする。最短経路から外れた場合は VR 空間上に警告を表示し、元の道に戻るよう促す。この実験の結果を元に、システムの課題及び修正点を検証する。

第二段階では第一段階で修正された VET システムを用いたうえで、20 代から 50 代の男女 37 人を対象とした VR 避難訓練を行う。今回の実験では、第一段階から画面遷移及びルート設定の変更を行う。変更点及び理由に関しては後述する。

実験ではまず VR ヘッドセットの操作説明及び疑似避難訓練システムの操作説明を行った上で、疑似避難訓練を開始した。参加者には事前に函館に観光に来たという想定と函館市の大まかな概要のみを説明し、避難経路に関しては事前説明をしなかった。これはハザードマップなどを見たことのない観光者がどのような避難行動を取るのかを確認するためであった。

4.2 避難経路概要

図 4 は VR 避難訓練における避難ルートを示した。丸で示しているポイントが選択可能ノードであり、各ノードの接続情報を赤い線で示している。黄色いノードは警告が発せられるエラーノードである。青いノードはゴールに指定されたノードであり、参加者がここに到着すると訓練終了となる。本実験の避難経路は、第一段階及び第二段階で避難経路が異なる。第一段階は指定緊急避難場所に指定されている函館西高等学校及び、津波避難ビルに指定されているラビスタ函館ベイホテル入りをゴール地点とする。第二段階は図 4 の黒枠内を実験エリアとして追加する。参加者が避難所に到達するか、浸水領域外に出た場合に訓練終了とする。

スタート地点から最も近い避難所はラビスタ函館ベイ

ホテルであるが、訓練参加者がラビスタ函館ベイにたどり着いた場合は、もう一度スタート地点に戻し、再度避難訓練を行う。函館湾沿岸部の指定緊急避難場所はラビスタ函館ベイだけである。そのためこのホテルに多くの避難者が殺到する可能性がある。その結果、収容人数過多、入り口付近や階段での滞留により、避難できない可能性を考慮したためである。

スタート地点からは金森倉庫群の間を海から離れる道路が存在する。これらの道路は全てエラーとした。理由は 2 つあり、1 つはこの道路を直進すると、大森浜側に抜けてしまうためである。つまり、浸水開始が最も早い地域に避難者が自ら近づくことになってしまう。2 つ目は歩道の除雪が完了しておらず、歩道が封鎖されている可能性があるためである。

次にエラーとしたのが、函館山とは逆方向の函館駅や北海道本島内陸部に進む経路である。函館市の浸水領域は函館湾沿岸部に広く広がっている。また内陸部に行くほど道が複雑に交差しているため、金森倉庫からこの浸水領域を抜けて内陸に進む場合、相当の時間がかかる。比較的浸水開始が遅い函館市ではあるが、数十分も歩き続けた場合、浸水に巻き込まれる可能性も否定できない。

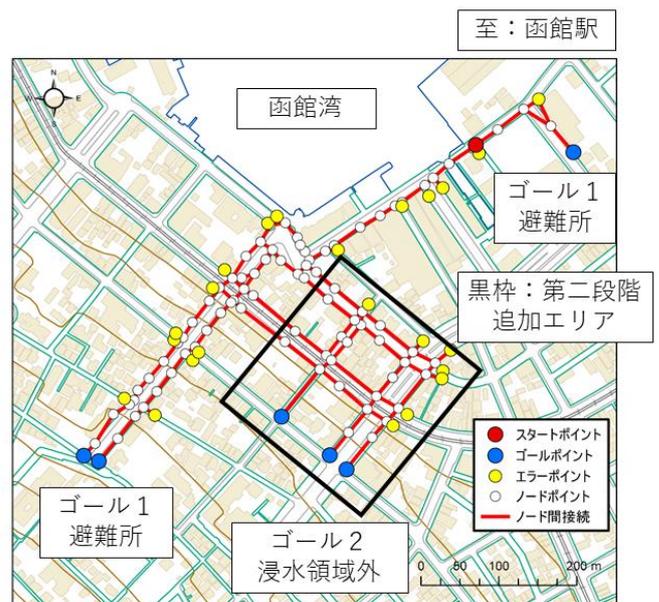


図 4 仮想避難訓練避難ルート

5. 積雪期夜間を想定した VR 避難訓練

5.1 第 1 回 VR 避難訓練結果

第 1 回 VR 避難訓練実験は 2019 年 2 月 27 日から 2019 年 3 月 13 日の 2 回に分けて、20 代から 50 代の参加者 8 名を対象に行った。まず訓練開始地点からは右に行くと津波避難ビルに指定されているラビスタ函館ベイホテル、左に行くと函館山に通じる道に進む。参加者のうち、6 名は最初

の選択でラビスタ函館ベイへ向かう経路を選択し、2名は函館山に向かう経路を選択した。開始地点から周囲を見渡したとき、ラビスタ函館ベイははっきりと参加者に視認できるが、函館山は降雪の関係もあり山の稜線はおろかロープウェイの光も確認できない状態であった。そのため、函館に土地勘のない参加者が、最も目立つ津波避難ビルを選択した。なお、6名のうち1名は函館に居住したことがある参加者であったが、この参加者は後のヒアリング調査から、避難ビルではなく函館駅方面、つまり函館市の内陸側を目指していたことがわかった。

次に函館山に向かう避難訓練上での参加者の行動を見ていく。ラビスタ函館ベイに向かった参加者には、避難ビルが混雑しており入れなかったという想定で、開始地点から函館山に向かうよう促した。函館山への避難では、8名中7名が最短避難経路から外れる結果が得られた。最も多かったのが、金森倉庫から函館山に向かう中間点に位置するT字交差点で最短避難経路を外れるケースであった(図5、図6)。その後のヒアリング調査から、この判断には2つの意見が上がった。まず眼前が海だったため、海から離れる経路を選択したという意見であった。T字交差点に限らず海から離れるという判断は多く見られた。T字交差点以外の経路上で、海から離れようと最短避難経路を外れる選択をした参加者が3名いた。確かに参加者の眼前には函館湾が広がっており、津波を想定したのであれば海から離れるという選択は間違っていない。

しかし金森倉庫は北海道本島から函館山に伸びる陸繋島砂州上に位置しており、函館湾の反対側は太平洋に面する大森浜、つまりこちらも海なのである。海から離れているつもりが、実は反対側の海に近づいているという状況が読み取れた。小規模な津波であればこの大森浜を超えて浸水が広がることはなく、相対的に標高の低い函館湾側で浸水が始まる。函館市が公開するハザードマップに記されている最大規模の津波想定の場合、浸水開始地点は函館湾ではなく大森浜側である。参加者は海に近づいているだけではなく、津波浸水方向に進むという結果がこの実験から得られた。

2つ目の意見としては、T字交差点で比較的高い建物を視認したため、そこを目指そうとしたという意見であった。この交差点から複数のマンションが確認できた。しかしこれらは函館市の津波避難ビルには指定されていない。そのため緊急時に避難可能かどうかは不明である。やはり高台という最も確実性の高い避難場所を選択するべきであるということが言える。

なお今回の実験において交差点周辺にて、何度も交差点を渡るうちに参加者が自分の現在位置を見失ってしまい、何度も交差点周辺を周回するという行動を見せた。大きな要因として2つ挙げられる。1つはこの参加者がルート選択をする際の判定基準に、周囲の画像ではなく表示された

ノード移動アイコンを選んでいった点である。もう1つはノード間の移動状況を省略してしまっているため、自身の行動の連続性を見失ってしまい、自分がどの方角からきて、どの方角に向かっていたのかを見失う点である。特に周囲を見渡しているうちに、自身の方向感覚を見失う傾向が見られた。これらはVETシステムにおける設計上の問題及び、データ整備の問題であり、今後改善が必要と考えられる。

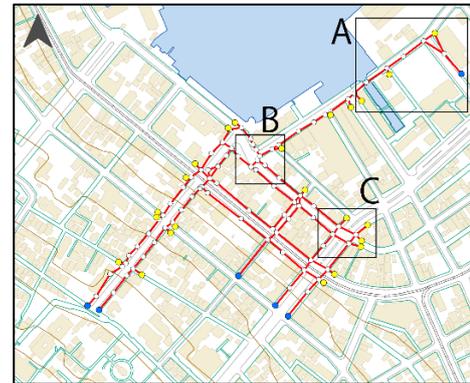


図5 各図における拡大範囲

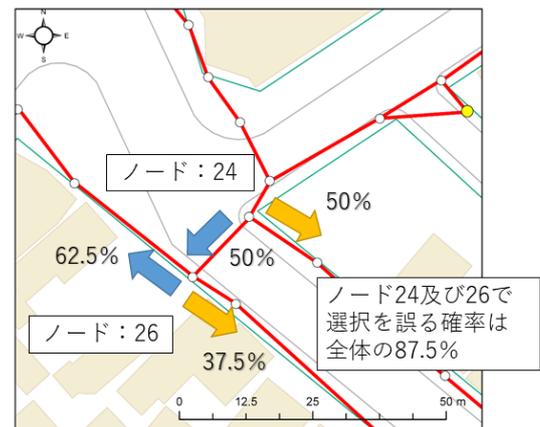


図6 T字交差点における各参加者の経路判断
 (第1回実験時・表示範囲: 図5-B)

5.2 第2回 VR 避難訓練結果

次に10代から50代の男女37人を対象としたVR避難訓練結果から避難行動者の行動結果を示す。第1回実験で得られたデータ及び参加者の意見から、VETシステム及び訓練内容に変更を加えた。まず、システムのロビー画面から仮想訓練に入る際に、地震発生と津波を知らせる大津波警報を知らせる画面を追加した。これは訓練に緊張感を持たせるとともに、発災時の行動を迅速に行えるよう大津波警報を経験させるためである。

次に仮想訓練の訓練エリアが拡張された。第1回実験の際してノード24及びノード26で大森浜側の経路を選択した参加者が全体の約8割に達したため、その後の行動を見る必要があった。そこで図4に示された追加エリアのノードを新たに整備した。

まずスタート地点から函館駅方面の経路を選択した参加者は17人であった(図7)。1名は函館山方面に引き返し、16名のうち6名はノード3でラビスタ函館ベイではなく函館駅方面に進んだ。ラビスタ函館ベイを超えると、この道沿いには函館駅まで津波避難ビルが存在しないため、結果的に避難が遅れる可能性がでた。

スタート地点からT字交差点までの間に、海から離れようとした参加者は37名中27名であった。これは津波災害時における行動として、参加者が“海から離れる”という選択を行った結果であった。このことから、函館市沿岸部における避難行動者の多くが、まず海から離れる経路を選択することがうかがえた。

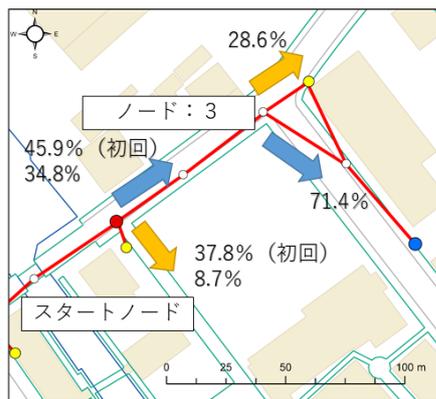


図7 スタート地点における各参加者の経路判断
 (第2回実験時・表示範囲：図5-A)

第1回目の実験で多くの参加者が最短避難経路から外れたT字交差点のノード25では、海から離れ経路となるノード26を選択した参加者が22人、交差点を渡る判断をした参加者が14人であった(図8)。交差点を渡った14人の内、突き当りで海から離れる選択をした参加者が10人であり、このT字交差点で最短避難経路から外れた参加者は36人となった。第1回の実験結果と合わせてみても、多くの参加者がこの交差点で最短避難経路から外れる選択を行う傾向にあることが明らかとなった。しかしこの後、最短避難経路から外れたものの、最終的に函館山を目指す行動が見られた。

ノード173はT字交差点から南方向に進んだ先、最初に交差する主要道路の交差点を渡った先にあるノードである(図9)。主要道は函館駅から函館ロープウェイ乗り場に向かうように伸びている。この交差点から函館山ロープウェイ乗り場に向かう坂道が見えるため、ここで函館山に向かう参加者が多かった。しかし、ノード173を直進するとその先はカーブとなっており、函館山から離れる形となる。ノード173でこの函館山から離れる経路を選択した参加者は12人中8人であった(図9)。T字交差点で左折した参加者は26人であり、3割の参加者が直進を続ける結果となった。

このように積雪期夜間という視界不良の当該地域にお

いて、避難訓練参加者はまず視認しやすい高い建物を目指し傾向にあり、また避難ビルが利用できない場合や、避難ビルを視認できなかった参加者は海から離れる行動に出ることが明らかとなった。なお、今回は避難経路をそれた場合警告を発して参加者を元の道に戻したが、現実ではそのまま誤った避難経路を進む可能性が大いに考えられる。

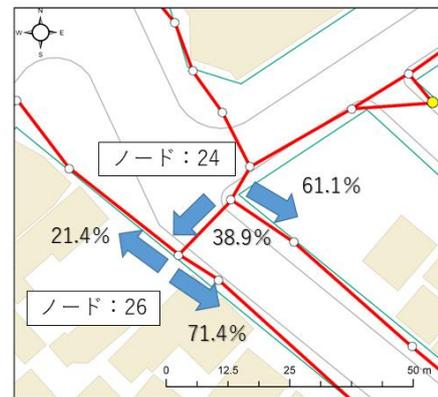


図8 T字交差点における各参加者の経路判断
 (第2回実験時・表示範囲：図5-B)

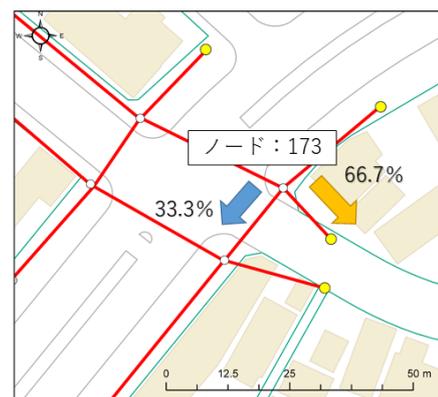


図9 ノード173における各参加者の経路判断
 (第2回実験時・表示範囲：図5-C)

6. 参加者に対するアンケートの結果

実験参加者のうち、30人にアンケート調査を行った。30人の中で函館を訪れたことのある参加者は22人であり、内17人が金森倉庫を訪れたことがあると回答した。「今回表示された風景に見覚えはありましたか?」という問いに対しては、17人のうち13人が「はい」と答えた。2K相当の360度画像であったが、参加者の記憶と照合するには十分な画質であったと言える。

「避難をするにあたって、どこを目指しましたか?」という自由記述の問いでは、「函館山」と答えた参加者が10人、次いで「高い場所」と「海から離れる」がそれぞれ8人、「高い建物」が6人、「坂道」が4人であった。「避難するにあたって何か目印等を探した、あるいは見つけました

か？」という問いに対しては、16人が「はい」と答えた。逆に「いいえ」を選んだ14人のうち6名は、目指した場所を記述する問いに対して「海から離れる」と答えた。海から離れることに意識が向き、高いところに向かうという意識が薄れた、あるいはなかったことが伺える。

「はい」を選んだ16人を対象にした「具体的に何を探した・見つけましたか？」という問いに対しては、「坂・階段」が最も多く9人で、次いで「ラッキーピエロ」が3人、「函館山」が2人、「ホテル」と「青い矢印」が1人であった。函館山や高い場所を探したものの、暗闇の中で函館山が視認できず、移動しているうちに坂道を見つけ、その先に向かったというケースが多かった。函館に限らず、夜間では高い場所が視認できないことから、周辺の地理に慣れない観光者などは道に迷うケースが出てくると考えられる。ラッキーピエロはその特徴的な外見とともに、観光名所のひとつであり訪れる人も多く記憶に残りやすい場所である。ラッキーピエロが函館山と函館駅の中継地点になり、その記憶からラッキーピエロを見て函館山に向かう道を思い出したという参加者が複数人いた。

このように、避難訓練参加者は訓練直後に津波避難の行動指針に従って「高いところ」や「海から離れた場所」に向かおうとするが、積雪期夜間という状況と陸繋島砂州という特殊な地形から明確な移動目標を持たず迷うケースが見られた。こうした状況は実世界でも想定されうるケースであり、対策を議論する必要があると考えられる。

7. おわりに

本研究の目的はVR避難訓練システムを開発し、北海道函館市沿岸部の観光地を対象とした津波避難訓練を行うことによって、避難行動者の行動ログを収集し分析することを目的とした。システム運用に関して、VETシステムは概ね良好に作動した。しかし、避難訓練中の移動に関してノード間の移動を省略したため、参加者が現在位置を見失いといった課題が残された。そのため今後はノード選択画面を静止画とし、移動中の周辺情報を動画で撮影し、ノード間移動の際に出力するなど、行動の連続性が保たれるような仕組みを検討する。

VR避難訓練では参加者のノード選択ログから、参加者の滞留ポイントや交差点での状況を再現することができた。夏季昼間の実験では見通しがきかないような住宅密集地などのルート周知をいかに行うかなど、津波避難対策の課題を明らかにすることができた。積雪期夜間のVR避難訓練では、視認できない高台よりも、視認しやすい近隣の津波避難ビルに避難者が集中する傾向が明らかとなった。函館市では海から離れようと経路を選択する参加者が多く、これは逆に浸水開始地点に近づいているという課題も明らかとなった。

アンケート結果から、参加者は標高の高い場所や海から離れた場所を目指すのが、積雪期夜間という状況の中で、明確な到達目標を設定できないケースが見られた。参加者は坂道を見つけてようやく高い場所に逃げられると認識するが、見つけるまでは道に迷うという状況を本実験で再現することができた。

しかし疑似避難訓練システムでは大きな課題も残された。それは誤り経路を限定したために、誤り選択を行った訓練参加者のその後の行動をトレースできなかった点である。この課題を解決するため、GoogleStreetViewによる広域訓練可能エリアを整備した。ただし、長時間のVR体験は3D酔いなどのような体調に影響を及ぼす懸念もあるため、実装は体験時間も考慮し慎重に検討したい。

今後は同様の実験を進めることによりデータ収集を行い、自治体などの防災計画や防災教育に活用できる分析を進めていく。合わせて建物倒壊や火災、土砂災害など地震発生時に併発する可能性がある現象の再現を行い、状況に応じて被災者の行動がどのように変化するかを明らかにしていく。

謝辞

本研究を進めるにあたり、北海道大学文学部の学部生をはじめ多くの方々に、実験への参加などご協力いただきました。ここに記して深く感謝いたします。なお、本研究は、(一財)北海道開発協会研究助成「ICTを援用した津波防災教育システムの開発と実証研究」及び文部科学省受託事業「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)」、北海道受託事業「津波による最大リスク評価手法の開発と防災対策の実証的展開」における成果の一部である。

参考文献

- [1] 北海道東部(網走、釧路、根室地方)の地震活動の特徴、地震調査研究推進本部(2018),入手先(https://www.jishin.go.jp/regional_seismicity/rs_hokkaido/p01_tbu/) (参照 2020-1-20).
- [2] 中央防災会議防災対策推進検討会議南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ:南海トラフ巨大地震対策について(最終報告),内閣府防災情報のページ(2013),入手先(http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/pdf/20130528_honbun.pdf) (参照 2020-1-20).
- [3] Jase Bernhardt, Jackson Snellings, Alexander Smiros, Ivan Bermejo, Angela Rienzo, Carys Swan : Communicating Hurricane Risk with Virtual Reality. Bulletin of the American Meteorological Society. 100(10), 1897-1902(2019)
- [4] VR防災体験者の概要, 東京消防庁(オンライン), 入手先(https://www.tfd.metro.tokyo.lg.jp/ts/bousai_fukyu/) (参照 2020-1-20).
- [5] 津波シミュレーションシステム, 秋田市(オンライン), 入手先(<https://www.city.akita.lg.jp/bosai-kinkyu/bosai/1002188/1009670/1020829.html>) (参照 2020-1-20)
- [6] 塩崎大輔, 橋本雄一: WebVRを用いた疑似津波避難訓練システムの開発. 情報処理学会情報システムと社会環境研究会研究報告, 2018-IS-146(4): 1-6(2018)