

ICT を援用した津波防災教育システムの開発と実証研究

北海道大学大学院 文学研究科博士後期課程 塩崎 大輔
北海道大学大学院 文学研究科教授 橋本 雄一

I. はじめに

東日本大震災以降、日本では地震や津波といった巨大災害に対する防災・減災意識が高まり、国や地方自治体、そして個人といった様々なスケールで防災・減災に対する取り組みが議論されてきた。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）。

自治体レベルでは、津波浸水想定の見直しを進めるとともに、新想定に対応したハザードマップを作成し、住民に周知するなどしている。避難困難地域においては津波避難ビルを指定、あるいは津波防災タワーを設置するなど、ソフト・ハード両面から対策を進めている。

個人レベルでは防災・減災に関する知識を収集するとともに、家族などと情報を共有するなど、平常時からの対応が推奨されている。こうした中、個人が取り組める災害対策として防災訓練が重要視されており、中でも避難訓練は発災時の行動を迅速に行うための訓練として各地域にて行われている。避難訓練は日頃から、発災時における避難場所の確認と、避難経路の確認に非常に有効であると考えられる。

近年では情報通信技術を利用した防災訓練が取り込まれており、中でも広がりを見せているのが、シェイクアウト訓練である。シェイクアウト訓練は訓練用アプリをインストールし、インストールされた端末に対して、地域によって指定された日時に一斉に訓練情報を送信され、その情報を元に発災時の行動を訓練するというものである。北海道では2012年から北海道庁が北海道の地域・組織・住民に対して、一斉訓練に参加するよう啓発活動を行っている。防災の日に合わせて2017年9月に実施されたシェイクアウト訓練では、北海道の登録サイトに185,513人の登録があるなど、訓練の広がりを見せていた（北海道庁, 2017）。また北海道室蘭市で行われた室蘭シェイクアウトでは、発災時の緊急回避行動だけでなく、その後の避難訓練も合わせて実施した。

しかし避難行動者が自らの避難行動を振り返り、災害情報と合わせて議論するようなフィードバック学習を目的とした情報共有手法については未だ議論の余地があると考えられる。訓練後の防災教育等で専門家がデータを参照しながら説明できるようなシステムは未だ少ない。情報通信技術を利用することの利点の一つに、リアルタイムで情報を収集し共有できることが挙げられ、訓練後に行われる防災教育や講演会等で利用できるシステムは、避難訓練者が自身の行動を振り返る上で有用であると考えられる。

他方で一斉避難訓練形式はいくつかの問題を抱える。その 1 つが参加率の問題である。大和ハウス工業株式会社が 2017 年に行ったアンケート調査では、5 年以内に防災訓練の参加経験を持つ回答者は全体の 39.2%という結果が出た。防災訓練という括りは幅広く、避難訓練の参加経験はさらに低いと考えられる。避難訓練は参加者が避難所の位置とその経路を確認するだけでなく、そうした参加者の行動を分析することによって、潜在的な災害リスクを洗い出すことも可能になるなど、今後の防災・減災対策を考えるうえで重要な機会の一つと考える。

もう 1 つは参加者の安全面も考慮した場合、訓練に最適な条件を選びがちであるということである。悪天候の場合は中止になることもあり、また夜間の避難訓練なども行われていない。しかし災害は夜間でも起こりうる。北海道では 2018 年 9 月に北海道胆振東部地震が発生した際に、火力発電所停止に伴う一斉停電（ブラックアウト）が発生しており、不測の事態をも想定しなければならないと改めて認識させられた。

特に北海道胆振東部地震に際しては、電力が通じないことによりネットワークが切断され、被災者が防災情報を取得することが難しくなったことも特筆される。発災時は様々な混乱から災害関連情報へのアクセスが難しくなることが想定され、また津波災害などは避難するための時間が非常に少ない地域もある。そのため各個人が状況を確認し、適切な行動を取ることができるよう事前に災害に関して学習しておくことが、防災・減災を実現する手段の一つと言える。そこで本研究は、ICT 及び Web 技術を用いることにより津波防災教育システムを開発し、実験を通してシステムの効果及び課題を検証することを目的とする。

II. 研究方法及び先行研究

1. 研究方法

本研究ではまず ICT 及び Web 技術を用いた 2 つのシステムを開発する。1 つ目は実際に行われる避難訓練の情報を地図上に可視化し、訓練参加者にフィードバックする避難訓練可視化システムである。このシステムはスマートフォンに代表されるような多機能端末の GPS を用いることにより位置情報を収集し、ネットワーク機能を通してサーバーに情報を送信し、サーバーサイドでは収集された情報をリアルタイムで可視化する機能を有する。

2 つ目は WebVR 技術を用いることにより、仮想空間上で擬似避難訓練を行うことのできるシステムである。これは居住空間を離れる例えば観光行動などを想定し、普段では訓練できないような状況を仮想空間上に再現し擬似避難訓練を行うシステムである。不特定多数のユーザーを想定し、高性能な PC 等を必要とせず、多機能端末で訓練を行うことができるシステムの開発を目指す。

これらのシステムを利用して、実際の避難訓練及び擬似避難訓練を行う。訓練結果から得られたデータを分析し、津波避難行動の課題を明らかにすることを目指す。まず避難訓練可視化システムの検証を行う。この検証では北海道釧路市において津波集団避難訓練を

行い、訓練時の情報を避難訓練可視化システムにて収集・可視化する。そして訓練後に訓練結果を津波浸水の時間発展データと合わせて可視化し、参加者にフィードバックする時間を設ける。フィードバック学習の前後でアンケート調査を行うことにより、システム利用前後で災害に対する意識がどのように変化するかを検証し、避難訓練可視化システムの有用性及び課題を検証する。

次に擬似避難訓練システムの検証を行う。擬似避難訓練システムは大きく分けて2つの実験を行う。1つはGoogle社が提供するGoogleStreetViewのデータを用いて、北海道厚岸町における夏季昼間の空間をVR上に再現する。次に北海道函館市における冬季夜間の空間をVR上に再現し実験を行う。実験から得られたデータをもとに、実験参加者が非日常空間における避難時、どのような行動をとるのかを見ていく。実験後、可視化システムを利用したフィードバックを行う。

最後に各実験結果及び分析結果を総合し、北海道沿岸部における津波避難行動時の課題を議論し、考察と今後の展望を述べる。

2. システムを用いた防災に関する先行研究

これまでも津波浸水、河川氾濫といった災害関連情報の活用を目的とした防災システムの研究開発が積極的に行われてきた。深田ほかは既存防災システムの多くがオンラインを前提に動いていることを指摘し、オフラインでも利用できる津波避難支援システムを提案した。このシステムは発災時の緊急避難を支援することを前提にしており、端末内に必要情報を蓄積している。移動軌跡および津波浸水想定可視化機能を有している点が、本研究との類似点が見いだせる。しかし、発災直後の避難行動支援に有効であるが、津波浸水域がどのように変化するかといった情報はなく、利用者が自身の避難行動を評価することが難しい。

大越らは、ユーザーが個別に避難訓練を実施することでログデータを蓄積し、またメモなどの情報を収集するという非同期参加型津波避難訓練システムを開発した。ユーザーの避難行動軌跡が確認でき、合わせて災害関連情報を集約する点に優れているが、こちらも津波浸水の時間発展を合わせて確認することはできない。

孫ほかは多機能端末が持つGPSにより取得された位置情報と津波シミュレーションデータを用いた避難訓練アプリを開発し、社会実装を通してその評価を行った。シミュレーションおよび収集した移動軌跡データをアニメーションで表示することができ、利用者が自身の避難行動を評価する事ができる。しかし、リアルタイムで収集された情報の活用に関しては、議論の余地がある。

Gusmanらはリアルタイム津波浸水シミュレーションの手法を提案し、そのシミュレーションを用いた津波避難実験を行った。この実験では従来のハザードマップではなく、想定された地震情報に基づいて津波浸水予測を即時シミュレートし、その結果をGoogleMap上に表示し、その後住民にフィードバックし適切な避難を促すという方法が取られた。シミュレーション結果が変わると浸水エリアも変化するので、毎回想定に応じた避難行動を促す点が、これまでの避難訓練と異なる。しかし避難行動軌跡の情報を収集していないため、避難行動結果をフィードバックできないという課題がある。

避難行動の分析に関する研究を見ると、生富らは室蘭市で行われたシェイクアウト訓練

に伴う避難訓練に際して、100 台の GPS 端末を配布し、避難行動者の位置情報を収集した。収集された移動軌跡を元にマルチエージェントモデルによる避難行動のシナリオ分析を行い、そのフィードバック手法を提案した。しかし GPS 端末はデータの抽出に時間がかかり、リアルタイムでの情報共有は難しい。防災訓練や教育機関などで実施される学習指導の中では準備・実施時間が限られており、効率的に情報を収集し活用する手段が求められる。

VR を用いた防災システムに関しては、東京消防庁が地震や火災を体験できる VR 防災体験車を開発し、すでに防災イベントなどで運用されている。車両は VR 上で災害時の様子を 360 度確認できるとともに、モーションシートで揺れや匂い、水しぶきといった演出効果を出すことができる。このシステムは災害時の様子を確認する点では非常に優れているが、現状の体験できるのは受動的なコンテンツであり、参加者自身に行動を促すようなイベントは含まれていない。発災時の行動を評価する上でも、体験者自身の行動を確認する能動的コンテンツを用意する必要がある。

Ⅲ. 避難訓練可視化システム

1. 津波防災教育システム用サーバー構成

本研究では津波防災教育システムの実証に先立ち、2 つの津波防災教育システムの開発を行う。この 2 つのシステムは民間の Virtual Private Server (VPS) に設置された Web アプリケーションを基幹とし、ネットワーク機能を通して多機能端末のアプリ及びブラウザと通信し情報を送受信する。サーバーは Web アプリケーションサーバー (Web サーバー) とデータベースサーバー (DB サーバー) に分かれており、DB サーバーはファイヤーウォールにて Web サーバーとの通信のみを許可する。

Web サーバーは CentOS 上に Apache HTTP Server をインストールし、外部アプリ及び外部 API と http 通信で情報のやり取りを行う。Web アプリケーションの基本言語は PHP とし、ブラウザコントロールのために HTML 及び JavaScript を用いて表示機能を作成する。DB サーバーは MySQL を利用し、リレーショナルデータベースとして構築する。

2. WebGIS を用いた避難訓練可視化システムの概要

避難訓練可視化システムは大きく分けて 2 つのアプリケーションから構成される。まず避難訓練参加者の位置情報を収集する端末アプリである。今回の実験では参加者の多機能端末を利用して位置情報の収集を行ため、多機能端末の OS を統一することができない。これは実際に運用する際にも問題となることである。そこで今回は日本で多く利用されている Android 及び iOS を対象としたマルチプラットフォームアプリを開発する。マルチプラットフォームアプリを開発する際に問題となるのが、開発工数の増大を引き起こす点である。

Android 及び iOS のネイティブアプリを開発しようとした場合、それぞれ Swift や Java といった異なる言語で開発する必要がある。また対応バージョンが増えることで開発工数が

増加する懸念もある。そこで今回は共通のソースコードからマルチプラットフォームに対応したビルドを行える環境を持つ Unity を利用する。Unity は特に 3D ゲームなどの開発に利用されているゲームエンジンであるが、その開発環境はデバイスに合わせた形でのビルドが可能である。C# で書かれた 1 つのソースコードを OS に応じてビルドするため、開発工数の削減が可能となる。しかし位置情報の収集に関しては OS 間の際も存在するため、本研究では位置情報の中でも最も基本的な情報である緯度・経度・時間を取得し利用する。

位置情報収集アプリは起動されると 5 秒ごとに位置情報を収集し、モバイルネットワーク機能を通じてリアルタイムに Web サーバーに送信する。情報の送受信に関しては、端末アプリ側はアプリインストール時に付与する端末固有 ID と位置情報、さらに高度と加速度、取得日時を Json 形式でまとめ、情報通信 API を通じて Web サーバーに送信する。Json 形式のデータを受け取った Web サーバーは情報を読み取り、DB サーバーに記録する。

可視化機能を有する Web サーバーは、PHP で開発される Web アプリケーションを基盤とし、可視化及び通信 API、データの管理を行う機能を有する。可視化機能は WebGIS ライブラリの Cesium を利用する。Cesium は OpenLayers や leaflet に比べて、特にダイナミックデータを用いて時間操作を行う機能が優れており、津波浸水の時間発展や移動軌跡を動的に可視化することを可能とする (図 1)。Json 形式を拡張した CZML 形式のデータを読み込む事により、自動的にアニメーションが再生される。また Cesium のユーザーインターフェースにはタイムバーが標準で利用することができ、このタイムバーを操作することにより、任意の時間や再生速度を設定することができる。

可視化機能は避難訓練の様子をただ可視化するだけでなく、時間をコントロールすることにより、様々な状況を再現することができる。自治体などで実施される一斉避難訓練はあらかじめ訓練日時と状況が周知されており、考えられる最短の時間で避難行動が開始される。しかし実際の災害発生時では、発災時緊急避難行動や状況把握などを行った後に避難行動を行うため、避難訓練時よりも避難行動開始時間が遅くなることが考えられる。この状況を再現するために、可視化機能は分単位で避難開始を遅らせることができる。これらの機能を利用して実際に行われた集団避難実験の位置情報を可視化し、津波親水の時間発展と合わせて表示することにより、訓練参加者に対する訓練結果のフィードバックを行う。

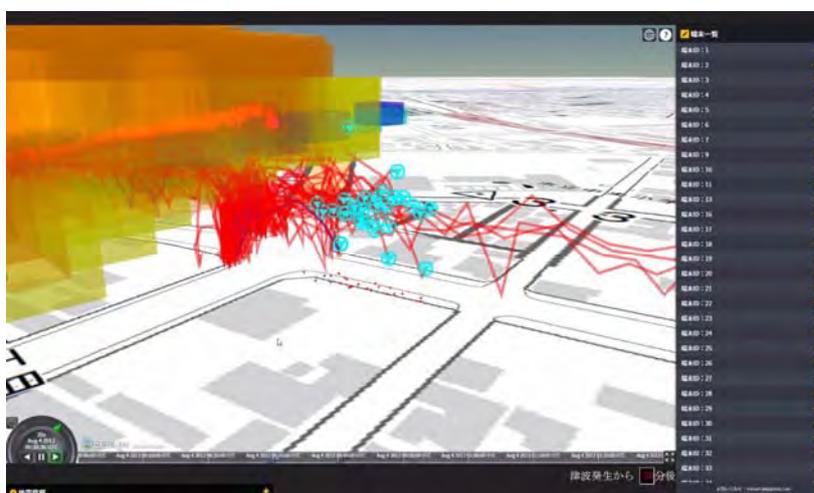


図 1 避難訓練可視化システム画面図 (最新 Ver)

3. 利用する背景地図情報及び津波浸水想定データ

本システムが避難行動を可視化する際に利用する背景地図は、国土交通省国土地理院が提供する地理院地図である。地理院地図は背景基盤となるベースマップと共に、航空写真やデジタル標高地形図などといった地物情報、地形情報なども合わせて表示することができる。必要に応じて背景地図を変えることによって、幅広い表現が可能となる。

GoogleMapsAPI のような民間の地図を利用する場合、利用規約やライセンスが問題となることが多い。地理院地図 WebAPI は日本の政府標準利用規約及びクリエイティブ・コモンズ・ライセンスの表示 4.0 (CC-BY) に準拠したライセンスで提供されている、いわゆるオープンデータの 1 つである。国土交通省や国土地理院の発行する地図をネットワーク経由で取得することができ、特にブラウザ上で地図を利用する際に有益である。

津波浸水想定データは北海道危機対策局危機対策課から提供された、北海道沿岸部に最大想定津波浸水を想定したシミュレーションデータを利用する。北海道は新しい津波波源モデルを用いて津波シミュレーションを実施し、その成果として作成された津波浸水予測図は多くの自治体のハザードマップに利用されている。本研究で用いられたデータはシェープファイル形式で保存されており、50メートルメッシュもしくは10メートルメッシュ毎に属性が付与されている。属性データとしては、位置情報及びID情報に加え、1cm、20cm、30cm、100cm、200cm、最大浸水深に達する時間が秒単位で付与されている。

従来の紙媒体を用いた津波ハザードマップは、津波浸水エリア、津波浸水深、避難所などの情報が地図上に記載されたものが一般的である。また近年では WebGIS を用いて、WebMap 上に災害情報をオーバーレイし公開する自治体も増えてきた。北海道函館市もその 1 つであり、函館市防災ハザードマップ Web 版を公開している。このハザードマップで最も目立つのが、函館湾から大森浜側に向けて広がる最大浸水深 4m 以上のエリアである。資料だけを見ると津波は浸水深の深い函館湾から浸水が始まるように見えるが、可視化システムを用いて確認すると大森浜から浸水が始まる様子が分かる。

IV. WebVR を用いた擬似避難訓練システム

1. 擬似避難訓練システムの概要

擬似避難訓練システムは大きく 3 つの機能を有する。1 つ目は特定の地点から避難所までの最短避難経路確認機能である。この機能は特定の地点にて地震に伴う津波が発生したという想定で、避難行動を VR 空間上で行う。交差点などでは任意の経路を選択できるが、最短経路から外れた場合はシステムが警告を表示して、元の道に戻るよう誘導する。2 つ目は確認機能をベースに、夜間や火災といった災害時に考えられる状況を再現することができる限定条件下最短避難経路確認機能である。現実の避難訓練はその多くが昼間に行われることが多く、また火災などの状況をリアルに再現することは難しい。北海道のような積雪寒冷地では、積雪による通行止めなどにより夏季と冬季で避難経路が異なる場合も存在する。こうした状況を再現することによって、日常生活空間での発災状況を体験することができる。最後に、警告などにより避難行動を制約せず、自由に行動することのできる

避難行動確認機能である。

これらの機能は全て WebVR 技術を利用し開発される。WebVR 技術とはブラウザ上に 3D 空間を描画し、端末のセンサー情報等を用いて VR 操作を可能とする技術である。最大の利点はブラウザ上に描画されるため、GoogleChrome や Firefox のような WebVR に対応したブラウザを搭載する端末であれば利用することが可能という点である。OculusRift のような専用のヘッドマウントディスプレイや高性能 PC などを必要とせず、多機能端末と対応したゴーグルを用意するだけでこのシステムが利用できる。

本システムは GoogleStreetView や事前に用意する 360 度カメラで撮影された画像を投影し、経路選択のアイコンを配置するという単純な設計とする。そして開発コストの削減とメンテナンスを考慮し、WebVR フレームワークには Mozilla がサポートし HTML と JavaScript で VR 空間を作成できる A-Frame を利用する。

2. 擬似避難訓練システムの操作方法

本システムは開始場所から避難場所までに設定されたポイント単位のノードを順次移動していく形で避難訓練を行う（図 2）。ノードデータにはノードの位置情報及び、紐づくノードの情報が属性情報として付与される。システムは避難開始と共にノード情報及び紐づくノードの情報を読み込み、VR 空間上に表示する。UI はスマートフォンでの利用も想定しているため、コントローラーなどを必要としない設計とする必要がある。そこで、経路選択に際しては紐づくノードをアイコンで表示し、注視ベクトルとアイコンが 3 秒間交差した場合、経路選択と認識し次のノードに遷移する（図 3）。

本システムではユーザーの避難開始から終了までの選択ログを保存する。避難開始と同時にユニーク ID を生成し、ユニーク ID に紐づく形で選択されたノード ID を順次記録する。このログは避難所要時間の計算及び、避難行動の分析に利用される。避難訓練においては、避難開始から避難終了までの所要時間が重要となる。実際の訓練では開始時のからの経過時間を計測することができるが、本システムではユーザーの経路指定による空間から次空間への移動、つまり点から点へ瞬間的に移動するため、開始時間と終了時間のデータだけでは所要時間を計算することができない。そこで、各ノード間の距離をノードに紐づく位置情報から算出し、成人の歩行速度を毎秒 1m と仮定して所要時間を算出し、VR 空間上に表示する。



図 2 ルート選択画面（2018 年 10 月 27 日著者撮影）

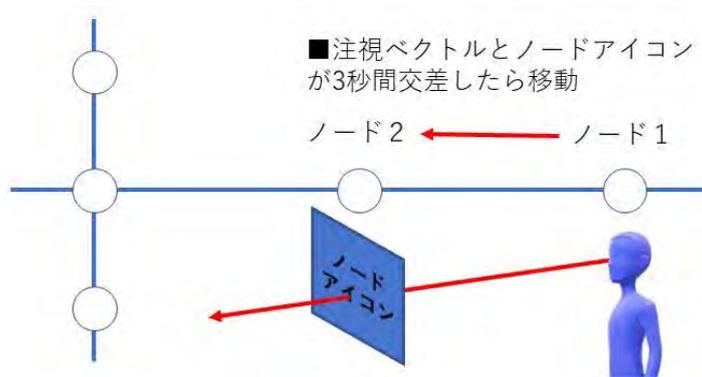


図3 ノード選択イメージ

3. 擬似避難訓練システムの操作方法

本システムの避難経路確認機能及び避難訓練機能では、周辺画像の投影に GoogleStreetView を利用する。GoogleStreetView は Google 社が提供する API の 1 つであり、位置情報及び指定する角度等のパラメータに基づいた画像をレスポンスする。画像の指定可能であるが、フリーライセンスでの最大サイズは 640×640 ピクセルである。

昨今、Google 社の提供する API は一律従量課金制に移行しており、フリーで利用する場合には月 200 ドルの制限が設けられている。StreetView の場合、200 ドルはおおよそ 28,000 枚の画像がロードできる金額である。画像サイズに関しては最大 2048×2048 ピクセルの画像のロードが可能となるが、別途ライセンスが必要である。フリーライセンスで高解像度の 360 度映像を投影しようとした場合、解像度に応じた枚数の画像のロードが必要となる。本システムでは 1 つの空間に対して、試験的に 640×640 ピクセルの StreetView を 6 枚読み込み 360 度画像の生成を試みる。

GoogleStreetView は山岳地帯や観光名所といった特定の条件がない限りは、車載カメラによる画像の撮影が行われている。そのため、StreetViewAPI を利用した 360 度空間はその殆どが車道からの景色になる点、実際の歩行による避難と異なる。また市街地に点在する歩道などの車の入れない道に関しては、画像が存在しない場合が多い。そうした場所は別途画像を用意する必要がある。

V. 避難訓練可視化システムを利用した集団避難訓練

1. 津波集団避難実験概要

本章では 2018 年 6 月 29 日及び 6 月 30 日に、北海道釧路市及び厚岸町で実施された津波集団避難実験結果と支援システムの運用結果をまとめる。津波集団避難訓練には北海道大学文学部で開講された地域システム科学演習を受講した学部生、院生の 36 名が参加した。参加者には事前に避難訓練対象地域及び避難経路を示した地図を配布し実験概要を周知した。避難経路に従い、なおかつ安全には十分配慮して訓練を行うよう合わせて指示した。

訓練は2018年6月29日に釧路市で2箇所、2018年6月30日厚岸町で1箇所、計3箇所にて実施された。釧路市では、釧路市寿3丁目付近の住宅地から津波避難ビルに指定されている道営住宅「であえーる幸団地」へ避難する経路と、入船5丁目付近の河口沿いから高台の釧路市立釧路小学校へ避難する2つの経路を設定した。厚岸町では、厚岸大橋付近から高台に位置する道の駅コンキリエへ避難する経路を設定した。実験開始場所まではバスで移動し、降車後に位置情報収集アプリの稼働状況を確認した上で避難訓練を開始した。

アプリのインストールに関してはAndroidとiOSアプリでインストール方法が異なった。Androidアプリは事前にAPKファイルを作成しておき、Googleドライブ経由で参加者に配布した。iOSに関してはライセンスの関係上、PCに多機能端末を接続し直接インストール作業を行った。操作方法に関してはOSによる差異はないため、参加者全体に10分程度の説明を行い、A4用紙一枚に記した操作マニュアルを配布することで周知した。訓練用アプリは操作が起動と停止に限定されているため、この程度の説明で十分であった。

2. 避難訓練可視化システム運用結果

位置情報収集アプリは起動と同時に位置情報の収集を開始し、位置情報がサーバーに送信された。Webアプリケーション側では各端末の位置情報がリアルタイムで確認できたため、実験開始前に位置情報収集アプリケーションの稼働状況を把握することができ、状況が確認できない端末は、開始直前にチェックした。本研究では位置情報のリアルタイム共有はもとより、その後の利活用を視野に入れている。特に今回訓練時に着目した集団避難行動の行動変化に関しては、集団の位置情報が揃っていることが望ましい。事前に端末をチェックすることで、データの信頼性を高めることができた。今回の実験では開始直前にチェック対象となった端末は、極端に初回衛星測位に時間がかかったことに起因していた。

実験開始と同時に各端末の位置情報がリアルタイムで収集され、可視化機能によりWebブラウザを介して確認することが可能となった。これにより実験場所にいなくても集団の行動変化を把握できた。またCesiumの特徴であるタイムラインの操作により、実験後に重ねて確認し、集団避難実験時の行動変化を詳細に検討することができた。今回の実験では3回の実験とも集団が分断化するか隊列が伸びるといった、集団内の行動速度の変化が捉えられた。加えて津波浸水の時間発展を確認することで、行動速度の変化が被災リスクを高めていることが明らかとなった。この一次情報及び津波浸水想定データを元に、参加者に対するフィードバック学習を行った。

実験後に収集された位置情報を集計した結果、1回目は端末36台の位置情報、計40,825件だった。2回目の実験では35台、24,746件であった。3回目の実験では36台の端末、計41,394件となった。取得件数の違いは、実験時間に応じて変化しているが、概ね5秒毎にデータが取得できた。

3. 津波避難訓練支援システムを利用した訓練結果のフィードバック

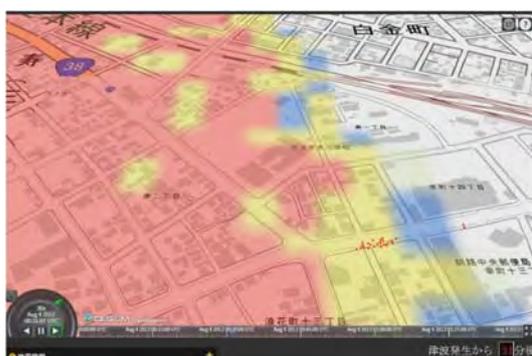
フィードバック学習はプロジェクターに映し出された内容を基に説明を行う講義形式で行った。まず支援システムにより可視化された訓練結果を参加者に示し、その後詳細な説明を行った(図4)。説明を行うにあたり、より身近に捉えさせるために具体的なシチュエ

ーションを提示した。今回は「バスにて釧路観光を行っていた時に、地震が発生し、渋滞に巻き込まれたため徒歩での避難を選択した」というシチュエーションを提示した。これにより、避難開始までのタイムラグを実際に起こりうる事象として捉えられ、もっと早く避難開始をしていればという考えを相殺した。

1 回目の避難実験では、訓練中に集団の避難速度が変化し、信号の切り替わりと共に行動速度が速く信号を渡り切った集団と、信号で立ち往生した集団に分断された。信号で足止めされた集団はその後、避難ビルにたどり着く直前で浸水エリアと重なったという結果を支援システムにて示し、避難の遅れが被災につながるリスクを説明した。

2 回目の避難実験では津波浸水が高台まで迫る結果を示し、高台を登らずに他の避難経路を選択した場合、被災する可能性があることを説明した。これにより、避難行動速度の重要性と共に、適切な避難経路を選択する重要性を指摘した。

3 回目の実験では避難経路が他の実験よりも長く、集団が長い隊列と化した。なお前 2 回は事前に浸水データをラスタデータとして作成し利用したが、ここでは DB から直接浸水データを読み込みより細かい津波浸水の時間発展を提示した。秒単位で変化する浸水域の変化は、津波浸水の広がりやの速さを示すことになった。そして集団の最後尾が浸水外エリアに移動した 1~2 分後には、避難経路が浸水する様子を示すことができた。実際にこのアニメーションを見ていた参加者は、自らの記憶と可視化結果を照らし合わせるような声が聞かれた。



a. 住宅地から津波避難ビルへの避難経路



b. 沿岸部から高台への避難経路



c. 沿岸部から高台への避難経路

※ 1. 赤い点が訓練参加者位置

※ 2. a 及び b は画像化された浸水データを利用

※ 3. c はデータベースからメッシュ単位でデータを取得し、ライブラリ上で可視化

図 4 避難訓練結果及び津波親水の時間発展可視化画面

4. フィードバック学習の効果

ここではフィードバック学習前後に行われたアンケート調査結果をまとめる。アンケート項目はまず「今回の避難訓練では、迅速な避難ができたと思いますか？」という問いに対して「はい」または「いいえ」で回答し、その理由を自由記述で回答してもらった。次に「今回の避難訓練・振り返り学習を通して、避難行動を考える上で最も重要だと思ったことはなんですか？」という問いに対して7つの選択肢を用意し回答させ、その理由を自由記述で記載してもらった。

まず訓練の成否を自己評価する問いに対して、フィードバック学習前では50%の参加者が「はい」を選択した。1回目の実験では、浸水が迫る前に避難できた参加者は3名だったが、支援システムを利用する前では評価基準が乏しくかったためと考えられる。選択理由欄では「問題なく普通で移動できたから。」や「経路をしっかりと理解していたため。皆と同じ方向に進んでいたため安心することができた」と記載されており、迷いやその他の要因による行動の遅れが出なかったことが、迅速な避難と考えた要因であったと推測される。

「いいえ」を選択した参加者はその選択理由として、「避難意識不足のため、移動速度が遅い」「ゆっくり歩いていたから。」と挙げていたように、避難行動速度を問題視していた。また「道が狭い(歩道が狭い)ため、前の人を追い抜かすことができなかった場所が多かった。」「避難意識不足のため、移動速度が遅い」と、行動速度の遅さの要因まで言及する参加者もいた。1章で述べた参加者毎の意識によって評価が左右されるという課題が表れた。

フィードバック学習後に行ったアンケート調査では、「はい」を選択した参加者が29%、「いいえ」を選択した参加者が71%であった。評価を改めた参加者は一回目のアンケートでは「はい」を選択した参加者であった。選択理由の変化については、「津波が予想以上に早く浸水した」「津波の浸水予測とのオーバーレイの映像を見たときに、避難が間に合っていないと感じた。」と回答にあるように、浸水エリアと避難者が重なるといった客観的データに基づいたといえる。また「間に合っていなかった。厚岸でもそういえば少しダラダラ歩いてしまった。」という回答者のように、自身の行動速度を記憶と照らし合わせ評価する傾向も見られた。

次に避難行動時の重要項目に対するアンケート調査結果を見ていく(図5)。フィードバック前では「避難所位置の確認」と「避難経路の確認」を選択した回答者がそれぞれ40%であった。これは前項の評価基準になっていた、迷わず避難できるための要素として選択されたと考えられる。その他の選択肢では「事前の防災学習」が8%、「周囲の人とのコミュニケーション」「避難行動速度」がそれぞれ6%であり、「災害情報収集手段」と「その他」を選択した参加者はいなかった。

フィードバック学習後の調査結果では、「避難行動速度」を選択した39%であった(図6)。次いで「避難経路の確認」が28%、「避難所位置の確認」が19%であった。またフィードバック前では選択した参加者がいなかった「災害情報収集の手段」が3%となった。津波浸水の時間発展と自身行動をあわせて確認することにより、よりすばやく避難を行うことが重要であるという認識を持ったことが、行動速度を重要視した一つの要因ではないかと考えられる。学習後の感想の中には「津波の避難について、少しの差が生死を分ける

かもしれないこと、到達するスピードがとても早いことを知ることができてよかった。」と回答した参加者がいた。集団の中でも津波が来る前に避難できた者とそうでない者が分かれていたため、行動速度の変化が参加者自身の安全に直接的に関わることを実感できたことも意識変化を促した要因と言える。

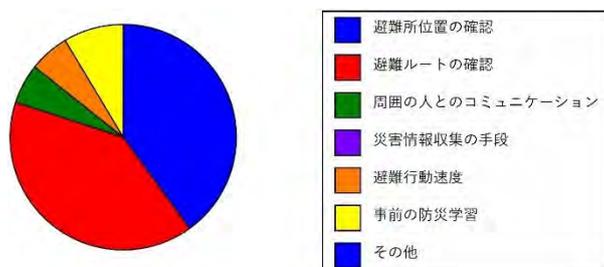


図 5 アンケート調査集計結果（フィードバック学習前）

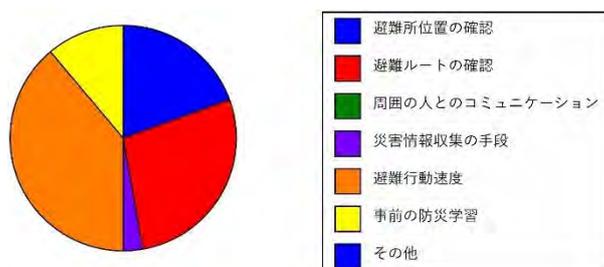


図 6 アンケート調査集計結果（フィードバック学習後）

VI. 北海道沿岸部における津波災害を想定した擬似避難訓練

1. 避難経路確認機能概要

本章では疑似避難訓練システムを用いた実験の説明と結果を示す。まず利用するのが対象地点から避難場所までの経路を確認する避難経路確認機能である。この機能は避難経路を固定し、最適な避難経路から外れた場合は警告を発し、元の道へ戻るように促す。3つの機能の中ではノード数の観点から最もデータ作成が容易であり、周辺画像もGoogleStreetViewを利用することから、全国各地域での運用も可能となる。本機能の目的は、利用者に最適な避難経路を示すと共に、経路上の滞留ポイントを特定することである。

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経路を知ることが、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。もちろん、本システムで利用しているGoogleStreetViewのアプリを利用すれば確認は可能であるが、津波情報や避難経路と合わせて確認することができない。本機能は避難経路の確認とともに

に、VR空間上で避難経路の確認を行えるようにする。

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、経路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。

2. 北海道沿岸部における夏季昼間を想定した擬似避難訓練実験

本研究では擬似避難訓練システムの避難経路確認機能を利用し、2018年8月3日に北海道大学大学院文学研究科・文学の学生8人による疑似避難実験を行った(図7)。参加者のうち、5名は実際に行われた津波集団避難実験に参加しており、避難経路を知る学生である。3名は集団避難実験に参加しておらず、厚岸町を歩いたことがない参加者である。



図7 実験中の風景
(2018年8月3日著者撮影)

今回はVR空間の投影にスタンドアロンヘッドマウントディスプレイであるOculus社が販売するOculusGoを利用した。避難行動に際しては後方に戻ることも考えられるため、ケーブルなどで行動が阻害されないことが必要だったためである。

図8は参加者がノードから次のノードを選択するまでの秒数を、個人の平均選択時間を差し引き示した。学生A-Eは集団避難実験の参加者であり、F-Hは未参加者である。ログの結果から、特に集団避難実験未参加者のGが、平均的に他の参加者よりも経路選択に時間をかけていた。実験中の様子を確認すると、交差点付近で何度も首を振り、周囲の状況を確認している様子が伺えた。住宅街では周囲が住宅に囲まれ、高台の場所が確認しづらく、経路選択に時間を要したと考えられる。逆に、高台が確認できるノード以降は、Gも他の参加者と同様の時間で経路を選択しており、住宅街における避難経路確認の重要性が明らかとなった。

その他の集団避難実験未参加者は、直ぐに海から離れようととにかく直進を選択していた。避難所要時間の観点から言えば、後者は結果的に時間が短縮されたことになるが、これは潜在的な危険を含んでいるとも言える。この実験では直進からT字交差点に差し掛かった段階で、明確に高台と海に近づく経路が分かれるが、地域によっては道が緩やかにカーブし、海から離れているつもりが、実は海に近づいているというケースもある。今後はそうした状況をシミュレートする必要が出た。このようにノードの選択の様子から、実際

の避難行動者がどのような行動をとるのかを推測する参考となる結果を得ることができた。

しかし本実験の背景データは GoogleStreetView を利用したため、参加者は車道上を避難した状況になった。参加者からは車道上を避難することに対して違和感があるという意見が出たほか、実際の避難訓練に参加した参加者からは、記憶とのすり合わせが若干難しかったという意見がでた。GoogleStreetView を利用した疑似避難訓練は、広範囲のデータを整備する事には秀でていたものの、より現実との比較を正確に行うためには歩道上のデータを整備する必要があるという課題が残った。

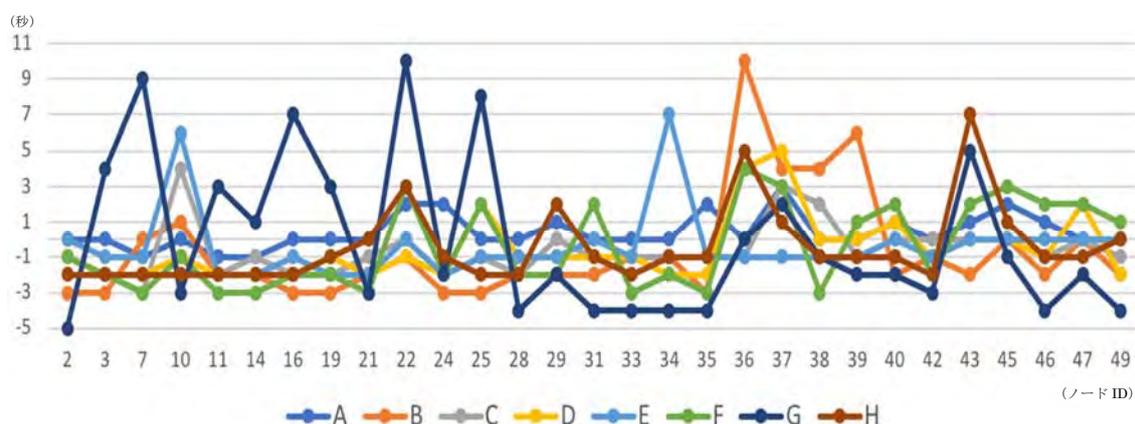


図8 参加者毎の各ノードにおけるルート選択までの所要時間（秒）

3. 限定条件下避難経路確認機能概要

次に限定条件下避難経路確認機能を利用し、北海道でも有数の観光地である函館市沿岸部における積雪期夜間の疑似避難訓練を行う。限定条件下避難経路確認機能は基本機能を避難経路確認機能と同じであるが、積雪期や夜間といった GoogleStreetView で対応できない状況を再現するための機能である。そのため、本機能は条件に応じて背景データを作成する必要がある。今回は函館市の観光名所の一つである金森倉庫を避難開始地点に設定し、そこからの避難経路を RICOH 社製の 360 度カメラである THETA を利用して背景データを収集した。通常 360 度カメラで画像を作成した場合、撮影者が映り込むことが多い。しかし疑似避難訓練時の参加者への影響を最小限にするためには、撮影者が画面に写り込まない背景データを作成しなければならない。この処理には複数の画像を合成し作成するなどの処理が必要である。今回は最も簡単な方法として黒いヘルメットの頂点にカメラを設置し撮影する方法を採用した。撮影画像の下に黒い領域が映る画像が作成され、疑似避難訓練中に参加者が真下を凝視しない限りは、撮影者が気にならない背景が作成できる。次に条件を設定し、その条件にあった背景データを作成する必要がある。今回の実験では金森倉庫を避難開始地点とし、積雪期夜間という条件を設定した。金森倉庫から避難する際、避難場所候補は 2 つある。1 つは金森倉庫から最も近い避難ビルであるラビスタ函館ベイホテルである。金森倉庫からも近く、なおかつ客室の明かりが夜間の避難の目印になると考えられる。2 つ目は函館山である。函館山周辺は金森倉庫から近く、なおかつ標高も高いため、1 ブロック坂を上げれば津波浸水領域から外れる。函館山は昼間であれば金森

倉庫からもよく見えるため、避難先に選択するという判断ができる。しかし夜間になると函館ロープウェイの光が見える程度であり、この光も積雪時になると確認しづらくなる。最初の避難先選択をどう判断するのかを検証することも、今回の実験の目的とする。なお本実験に使用する背景画像は2019年2月13日に撮影した画像を使用する。

4. 北海道沿岸部観光地における積雪期夜間を想定した疑似避難訓練実験

本実験は2019年2月27日と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(図9)。なお、8名のうち函館に住んだことのある参加者が1名、函館に観光などで訪れたことのあるものが8名、内1名は実験開始エリアに行ったことのない参加者であった。実験に使うシステムは、夏季実験で出た参加者の意見を元に改修を加えた。特に、災害発生の危機感が無いという意見から、実験開始時に警報音とともに画面を揺らし、大津波警報放送を流すことで地震発生を体験する機能を付与した。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。

実験の最中はVRヘッドセットに投影された映像をミラーリングし、リアルタイムで確認した。これは実験後にヒアリング調査をする際に参考にするとともに、避難行動を随時確認し、避難訓練結果を災害関連情報と合わせてフィードバックする際の要点をまとめるためであった。こうすることにより、訓練終了後にスムーズに参加者に対して各個人に合わせた防災教育を行うことが可能となった。

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の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。また函館山を目指した2名に関しては、開始地点の左側に函館山があると認識し、なおかつ高台への避難を目指した参加者であった。この参加者は北海道大学の学生であり、平日頃から津波避難に関する知見を得ていた参加者であった。

このことから2点のことが言える。1点目は視界が制限される積雪期夜間という限定条件下では、土地勘のない観光者は津波避難ビルを目指す傾向にあるということである。函館市は観光客も多く、もしその観光客が皆津波避難ビルを目指した場合、地域住民の避難も相まって収容人数を超える可能性が出る。また、津波避難ビルは入り口も大勢の人間を1度に収容できるほど大きくはなく、入口付近で混雑が起こる懸念もある。

2点目は、函館に住んだことある人は、内陸を目指す可能性があるということである。もともと函館市はこれまでも津波災害で被災した経験はあったものの、ハザードマップに想定されたような巨大津波災害の経験は現在の函館市民には無い。そのため、函館市に住

んでいる者ほど、津波浸水は函館湾沿岸部の港湾地域で限定的に起こるものという意識があった。先行研究で行った函館市役所に対するヒアリング調査でもその傾向が見られた(塩崎・橋本, 2017)。しかしハザードマップにも示されているように、最大浸水想定では函館駅周辺から函館の内陸部まで広い範囲で浸水が予測されている。内陸部を目指した場合、浸水開始前に浸水領域から抜け出すのは難しく、今後函館山のような最も近い高台への避難を誘導する必要性が出た。

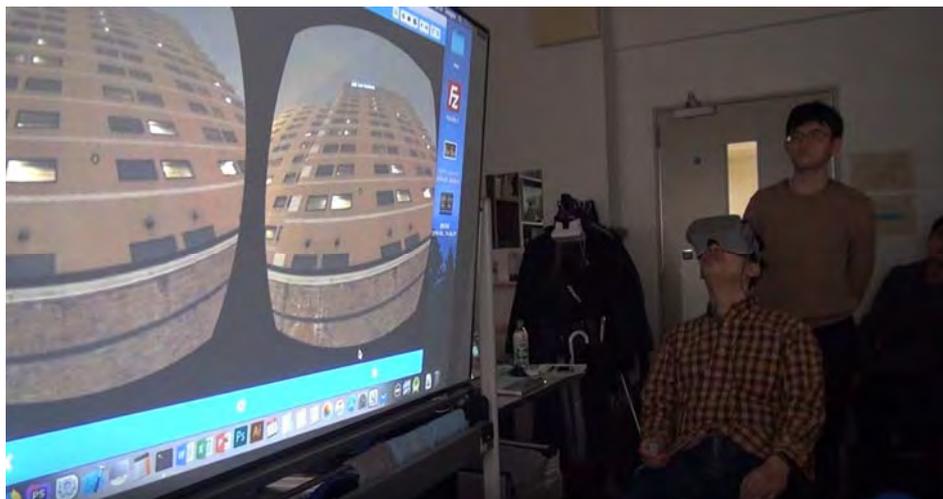


図9 疑似避難訓練中の参加者の様子 (2019年3月18日著者撮影)

5. 限定条件下における疑似避難訓練参加者の行動

本節では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。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。しかし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。実験参加者は海に近づいているだけでなく、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

らは函館市の指定する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べきであるということが言える。

次に各参加者の経路選択が発生するノード毎の経路判断時間を見ていく。図 10 は各ノードに入った時間と次のノードに入った時間の差分から、経路判断時間を計算し示した。経路判断時間の総計は参加者毎にばらつきが見られた。最も経路判断時間が短い参加者が 76 秒であり、最も経路判断時間が長い参加者は 322 秒で、平均が 188 秒だった。経路判断の時間だけで 4 分以上の差が出たことになる。特に最も経路判断に時間がかかった参加者は、1 つの経路選択に最大 21 秒かけていた。またノード毎の経路判断時間を見ると、ノード 24 以降の T 字交差点周辺における判断時間が増加する傾向が読み取れた。これは T 字交差点に突き当たることにより見通しが悪くなり、周辺風景から読み取れる情報が制限されてしまったためではないかと推測される。

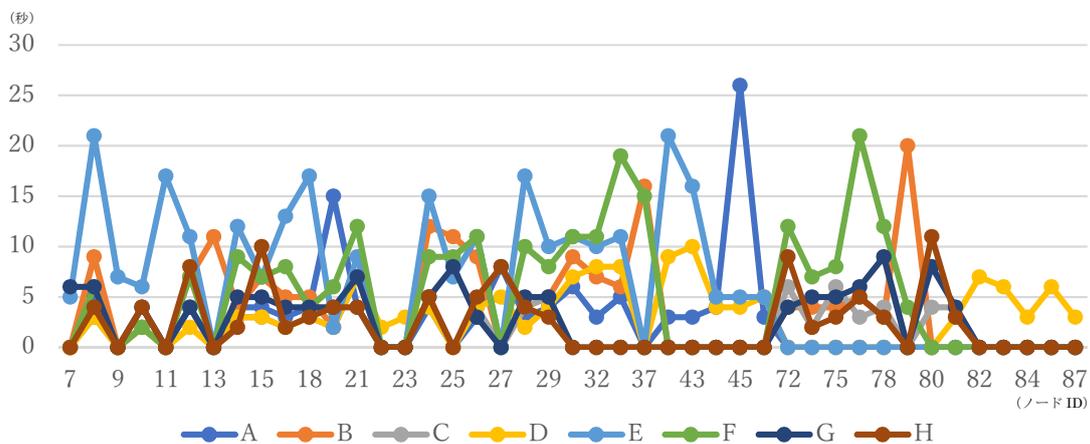


図 10 函館市における参加者毎の各ノードにおけるルート選択までの所要時間（秒）

なお、ノード ID の後半に極端に選択時間が増えたが、これはブラウザ上で何度も画像のリロードを繰り返していたため、実験経路の後半でブラウザの動作が重くなったことに起因するものであった。特に今回 FullHD 画質の 360 度画像を利用したため、各背景画像データの容量が大きくなった。その画像を最大 42 回リロードし背景として 360 度に投影することになったため、こうした現象が発生したのではないかと考えられる。この容量増大の問題は通信にも影響する。今回多機能端末での利用を可能としたが、リロードが増えるほど読み込み容量が増えるため、携帯回線のような制限付きのネットワーク回線では利用が難しい。また今後 4K などのような背景データの画質化を目指す上でも、通信量と通信手段には再考の余地が残った。

6. 疑似避難訓練後の防災情報フィードバック

本実験では疑似避難訓練直後にヒアリングを行い、疑似避難訓練結果と関連する災害情報のフィードバックを行った。まず WebGIS 上に金森倉庫周辺の地図を表示し、参加者の避難行動選択結果を説明した。次に津波浸水可視化システムを利用して、函館市における

津波浸水の時間発展がアニメーションで表示され説明された。実験終了直後には、誤り判定の基準がわからず、前述したように速やかに海から離れるべきという意見や、内陸部を目指すべきという意見が出た。しかし、浸水の様子が可視化された地図をみることにより、なぜこの最短避難経路が設定されたのかという意図を知り、参加者は納得した。災害関連情報と合わせて自分の選択結果を確認したことにより、客観的に自身の避難訓練結果を評価することができたのではないかと考える。そして GoogleStreetView の画像を用いて夏季昼間の様子を比較することにより、条件が異なると避難が難しくなるということを説明した。常日頃から災害時の行動を確認しておくことが、素早い避難を可能にすることを周知することができたと考える。

また今回は実験を終えた参加者に対して、次の参加者の実験の様子及び、経路選択の様子をミラーリングした映像を見せた(図 11)。自身の実験結果とともに災害関連情報を確認した後に、他者の行動を観察することによって自身だけではなく他者の避難行動を評価することを可能とするためである。近年「津波てんでんこ」に代表されるように、身近なコミュニティの中で災害時の行動を周知しておき、災害発生時には最適な行動を取ることが官民間問わず促されている。しかし、コミュニティの中で災害時の行動を判断し評価することができる人がいない場合、誤った判断を周知してしまうことも考えられる。そのため、津波防災教育システムは、その情報を受け取った人が更に情報を正しく伝達できるように努める必要があると考えられ、本システムはその訓練の一助となることも期待された。

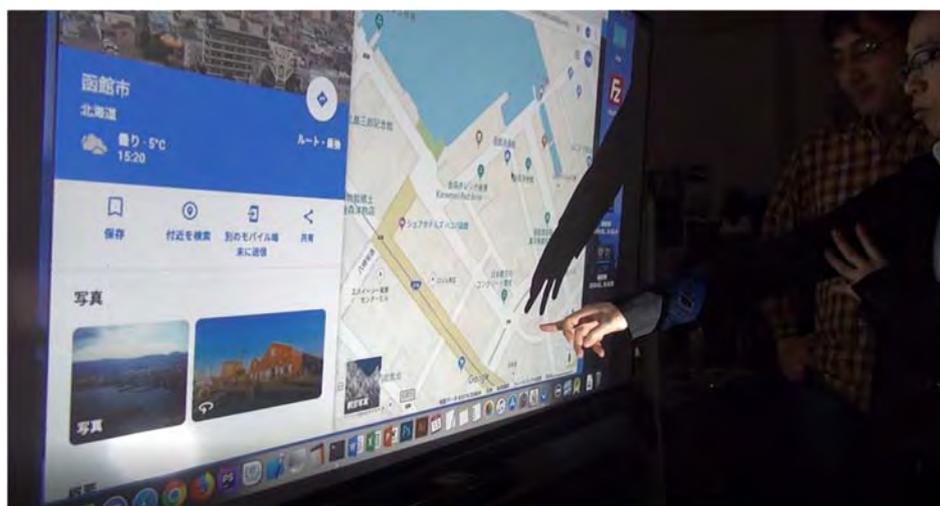


図 11 疑似避難訓練結果フィードバックの様子 (2019 年 3 月 18 日著者撮影)

VII. おわりに

本研究は、ICT 及び Web 技術を用いることにより津波防災教育システムを開発し、実験を通してシステムの効果及び課題を検証することを目的とした。そのために災害関連情報を収集・格納し、避難訓練結果と合わせて表示できる避難訓練可視化システムと、VR を

用いて避難行動を再現できる疑似避難訓練システムという 2 つのシステムを開発した。

避難訓練可視化システムを運用した結果は概ね良好であった。端末アプリによる位置情報収集の精度に対して懸念があったが、端末毎に位置情報測位が安定するまでの時間にタイムラグはあったものの、安定した後は非常に精度の高い位置情報が収集できた。位置情報の補正無しでも、可視化した際に自分の行動と照らし合わせるのに十分な結果が得られた。

端末とサーバーサイドがリアルタイムで連携することにより、訓練終了直後に担当者が結果を確認できる点も評価できた。これにより、訓練後すぐに訓練結果を参加者にフィードバックする上で、ただ結果を見せるだけでなく、訓練時の問題点を見出すことも可能になったと考えられる。過去の位置情報収集及び分析を目的とした実験では、GPS 端末や専用アプリを利用していただけ、収集から結果を公表するまでに時間がかかった。この時間が長くなればなるほど、参加者が持つ記憶やその時に感じたことが薄らいでいくことも考えられる。そのため、速報として訓練後フィードバックを行うことで参加者に振り返りと自身の行動の評価を行わせ、詳細な分析結果は改めて周知するというような訓練フローも考えられた。そしてフィードバック学習では **Cesium** と地理院地図を用いて津波浸水の時間発展と合わせて訓練結果を可視化することにより、訓練時に感じられないような災害に対する危機感や警戒意識を改めて知る契機になることが期待できた。今後の課題としては、レコード単位の津波浸水データの可視化に関して、負荷の低減を行い、広域で利用できる体制を整えることが挙げられる。

疑似避難訓練システムに関しては **A-Frame** を利用することによって、**Web** アプリベースでのシステム開発を行うことができた。また疑似避難訓練に必要な最小限な機能は本システムでも実装できたと考えられる。**GoogleStreetView** を利用することにより、共通基盤を用いて全国各地域の **VR** 空間を再現することが可能となった。また **360** 度カメラによって撮影された画像を併用することによって、夜間や積雪期における **VR** 空間上での避難訓練を可能とした。

疑似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。積雪期夜間の疑似避難訓練では、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。こうした課題を疑似避難訓練後の参加者に対してフィードバックすることによって、自身の行動を客観的に評価できる場を提供することができた。続けて他者の疑似避難訓練の様子を確認することによって、自己評価及び他者の評価を行える能力を身につける効果が期待された。

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(図 12)。今後はこの機能も併用しつつ、より自由度の高い訓練の中で、参加者の行動を評価する予定である。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

画や防災教育に援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。

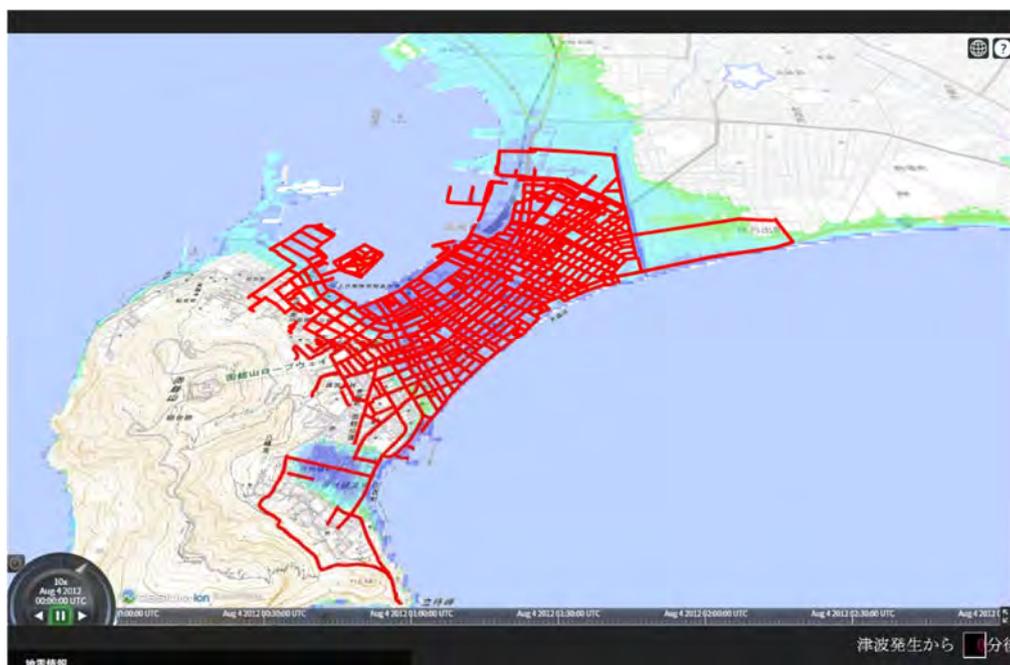


図 12 GoogleStreetView を利用した疑似避難訓練可能エリア整備状況

またシステムの改修を進めるとともに、本システムの利活用法を検討していく。例えば学校教育の現場において、本システムを利用した防災教育カリキュラムを策定している。教育の現場では近年急速な ICT 化が進められており、電子黒板や iPad などの多機能端末を導入する学校が増えてきた。また新学習指導要領で新設された情報教育や高校地理必修化の中でも、そのスキルを防災等に役立てることが期待されている。まずは情報や地理、総合的な学習の時間などを利用した防災教育に、本システムを活かせないか検討していく。教育の現場に限らず、自治体の避難訓練や町内会のような自主防災組織での防災教育の中でも本システムは活用できると考えられるので、今後は社会実装も視野に入れたシステムの運用を目指す。

参考文献

- 1) 生富直孝, 浅田拓海, Chawis Boonmee, 有村幹治: 避難訓練プローブデータを用いた地域防災教育支援ツールの構築. 土木学会北海道支部論文報告集, 2016, 52, p. 265-270.
- 2) 大越匡, 米澤拓郎, 山本慎一郎, 中島円, 神武直彦, 栗田治, 中澤仁, 徳田英幸. EverCuate: ユーザ非同期参加型津波避難訓練システム. 情報処理学会論文誌, 2016, vo.57, No10, p.2143-2161.
- 3) 奥野祐介, 塩崎大輔, 橋本雄一.: GNSS を用いた津波集団避難実験と移動軌跡データ分析. 地理情報システム学会講演論文集, 2015, 24.
- 4) 奥野祐介, 橋本雄一: 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), p. 11-20 (2015)
- 5) 塩崎大輔, 橋本雄一: オープンソースライブラリによる津波浸水に関する時間発展の可視化と利活用. 情報処理学会研究報告情報システムと社会環境 (IS), 2017-IS-141(10),1-6, 2017
- 6) 孫英英, 矢守克也, 鈴木進吾, 李葉昕, 杉山高志, 千々和詩織, 西野隆博, 卜部兼慎: スマホ・アプリで津波避難の促進対策を考える: 「逃げトレ」の開発と実装の試み. 情報処理学会論文誌, 2017, vol. 58, no. 1, p. 205-214.
- 7) 大和ハウス工業: “今年の「防災の日」は、おうちで防災訓練しよう “.
<https://www.daiwahouse.co.jp/column/technology/bousai/>, (参照 2019-3).
- 8) 内閣府: “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) ”.
http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/pdf/20130528_honbun.pdf, (参照 2019-3).
- 9) 函館市: “函館市防災ハザードマップ Web版“.
<https://www.city.hakodate.hokkaido.jp/docs/2017092500033/>, (参照 2019-3).
- 10) 橋本雄一 (編): 二訂版 QGIS の基本と防災活用. 古今書院, 2017.
- 11) 畑山満則, 中居楓子, 矢守克也: 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, vol. 55, no. 5, pp. 1498-1608, 2014
- 12) 林良嗣, 鈴木康弘 (編): レジリエンスと地域創生. 明石書店, 2015.
- 13) 深田秀実, 橋本雄一, 赤渕明寛, 沖観行, 奥野祐介: タブレット PC を用いた津波避難支援システムの提案. 情報処理学会, マルチメディア・分散・協調とモバイル (DICOMO2013) シンポジウム論文集, 2013, p.1938-1944.
- 14) Aditya Riadi Gusman, Yuichiro Tanioka: Effectiveness of Real-Time Near-Field Tsunami Inundation Forecasts for Tsunami Evacuation in Kushiro City, Hokkaido, Japan. V. Santiago-Fandiño et al, Post-Tsunami Hazard, springer, 2014, p.157-177.