

ARIA: シミュレーション・エミュレーション連携基盤を利用したインタラクティブな都市型水害の被害予測システム

廣井 慧¹ 井上 朋哉² 明石 邦夫² 湯村 翼² 廣中 颯³ 菅野 洋信³ 宮地 利幸² 篠田 陽一³

概要: 本論文では、都市型水害の浸水拡大過程、人的被害、情報通信環境への被害を一元的にシミュレーションする、インタラクティブな都市型水害の被害予測システム ARIA を提案する。近年、高精度な気象レーダや河川水位の予測技術が開発され、災害対応に活用されているものの、被災地住民の避難行動には大きな課題が残っている。水害に起因する豪雨の発生や通信障害による情報途絶が判明した時点もしくは直後に、その被害影響範囲を特定し、人的被害を軽減するための情報提示を行うことは、被害軽減の観点から重要である。しかし、(1) 氾濫解析や避難行動、通信環境に関する汎用的なシミュレーション・エミュレーションは、それぞれ独立で存在しており、それぞれの被害の影響を相互に鑑みる仕組みがないこと、(2) それぞれのシミュレーションの実行時間が異なり、特に氾濫解析においては、計算時間に複数日を要することから実時間での結果算出は難しく、水害の拡大状況に合わせた被害想定が困難である。そこで、本論文ではシミュレーション・エミュレーション連携基盤 Smithsonian を利用して、データ流通と同期を図り、被害状況の一元的な定量化を図る被害予測システム ARIA を設計・実装する。

ARIA: Interactive Damage Prediction System for Urban Flood using Simulation and Emulation Federation Platform

KEI HIROI¹ TOMOYA INOUE² KUNIO AKASHI² TSUBASA YUMURA² HAYATE HIRONAKA³
HIRONOBU KANNO³ TOSHIYUKI MIYACHI² YOICHI SHINODA³

1. はじめに

地球温暖化の影響により我が国における豪雨の発生および、それに伴う洪水や台風など水害の発生頻度は増加傾向にある。近年、高精度な気象レーダや河川水位の予測技術が開発され、災害対応に活用されているものの、被災地住民の避難行動には大きな課題が残っている。平成 30 年西日本豪雨では、岡山県倉敷市で大河川の洪水が発生し、事前に避難情報が発表されたにも関わらず、52 名の死者を出した。水害に起因する豪雨の発生や通信障害による情報途絶が判明した時点もしくは直後に、その被害影響範囲を特定し、人的被害を軽減するための情報提示を行うことは、

被害軽減の観点から重要である。しかし、降雨や河川水位などの水害に関する様々なデータが収集されているにもかかわらず、実際の水害時にどこでどの程度の浸水が発生し、地域住民に対しどの時点で避難を促せばよいのか、判断に利用することが難しい。

本論文では、実際の水害時に避難タイミングの参考となる根拠データ生成を目的に、被害状況の一元的な定量化を図る被害予測システム ARIA を提案する。ARIA はシミュレーション・エミュレーション連携基盤 Smithsonian を利用して、氾濫解析シミュレータ、避難シミュレータ、通信エミュレータ等を連携動作させ、被害量を算出するシステムである。水害シナリオとして既往水害での浸水拡大過程を模倣し、浸水により被害を受けた道路や住民の避難行動を再現する。さらに、モデルを利用して対象地域の通信途絶を表現することで、人的被害軽減のための情報提供タイミングやそれに応じた被害量を算出する。

現在の水害の状況把握は、あらかじめ、ある一定の降水

¹ 名古屋大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Nagoya University

² 情報通信研究機構北陸 StarBED 技術センター

Hokuriku StarBED Technology Center, National Institute of Information and Communications Technology

³ 北陸先端科学技術大学院大学

Japan Advanced Institute of Science and Technology

量に対する氾濫流の数値解析シミュレーションを行い、算出結果をもとにし住民に危険が及ぶ河川水位の閾値を定め、観測データから氾濫の発生を検知、避難情報発表を行うという手順で実施され、これをもとに、避難情報発表が行われている。しかし、日本で発生する水害の9割は内水氾濫であるが、内水氾濫は河川沿いだけでなく市街地の各所で発生するため、その発生の把握や予測が難しい。この内水氾濫の発生により、停電や道路の冠水が発生し、避難困難や通信障害などの事象が起きる。これらの被害発生は、地域住民からの通報により判明するため、自治体の災害対策担当者は通報による被害を把握しつつ、状況に応じた避難情報発表を行なっている。このようなシミュレーション上で予測できない被害をデータとして取り込み、現在の被害状況を鑑みたうえで、避難情報の発表タイミングを検討できるシミュレーションを構築する。

災害時の人間行動は地域住民がどのような情報を入手しているかに大きく左右される。そのためARIAでは災害現象と同時に情報サービス技術をエミュレートし、情報提供タイミングだけでなく、安全な避難に必要な技術や情報内容を、安全な道路や通信障害の発生範囲の変化を考慮し、そのうえで人間行動のシミュレーションを行う。シミュレーションモデルに反映させることが難しいコンピュータやネットワークなどの情報サービスの動作を実際の機能をつかって模擬し、連携利用することによって、真に災害減少による被害量を見積もることを目的としている。実用的な被害量を算出できるほか、情報サービスの災害時における精度や有用性など評価する仕組みとして活用する。

2. 災害事象および人間行動の模倣技術

2.1 関連研究

2.1.1 災害時のシミュレーション事例

災害時に利用されるシミュレーションに関し、これまでに数多くの研究が行われており、高精度での災害事象の再現を実現している。水害時には、水害の氾濫発生やその拡大過程を推定する氾濫解析シミュレータが利用されている。これは、降水量や土地利用状況、建物の建ぺい率、下水道管路、人孔などを入力データとして、数値解析計算により、数メートル格子単位で浸水深を導出するシミュレータであり、多くの市町村の被害想定に実際に利用されている。このほか、津波 [1] や火災 [2] など、災害現象を正確に再現するためのシミュレーションが数多く開発されている。

こうした災害現象のシミュレーションに対し、被害軽減のため効率的な避難施策を検討するための取り組みとして避難シミュレーションがある。避難シミュレーションは、移動者が取りうる行動をモデリングし、災害事象の発生時など様々な状況における避難行動を再現する。その行動モデリングには、経験的アプローチ、エージェントベースアプローチなど、いくつかの手法がとられる [3]。目的地を動

的に選択する避難モデル [4] や避難者同士の衝突を考慮した屋内での避難モデル [5]、近くの移動者に避難行動を考慮した避難モデル [6]、群衆避難 [7] など数多くのモデルが開発されてきた。Nguyen ら [8] は、災害現象を考慮した避難シミュレーションとして、火災時の煙の拡散が移動者エージェントに与える行動を考慮し、効率的な避難計画の策定への活用を論じている。

2.1.2 シミュレーション連携の取り組み

災害時のような複数のシミュレータの連携動作が必要な環境において、シミュレーション連携を実現するための取り組みとして High Level Architecture (HLA) がある [9]。HLA は米国防省の主導により標準化された分散シミュレーションのための規格であり、ミドルウェアを通してデータ配信や時刻同期等の各種サービスを提供する。Dahmann ら [10] は、HLA を利用してシミュレーションに共通の技術アーキテクチャの仕様を検討することで、各種シミュレーションの相互運用を可能にした。このアーキテクチャは地震災害において、避難、情報提供システム、緊急オペレーションを含む複数のシミュレータを相互運用するプロトタイプとして実装された [11]。また、地震火災における避難シミュレーションについて分散シミュレーションプラットフォームが構築されている [12]。

HLA は、標準化によりシミュレーションの統合を実現するが、統合フレームワークを用いたシミュレーション連携の研究も行われている。Integrated Emergency Response Framework (iERF) [13] は、シミュレーションやビジュアルイゼーションツールなど緊急時に利用される各種ツールを統合するフレームワークを提案した。シミュレーション・エミュレーション連携基盤の Smithsonian は、エミュレータとシミュレータの時刻同期などの実験の進行管理を担う連携マネージャと、Publish-Subscribe メッセージ交換を行う MQTT ブロカで、各種シミュレーションの同期連携を実現している [14]。

2.1.3 課題

災害シミュレーション、避難シミュレーションそのものの計算精度を向上するための研究や、シミュレーション連携に関する研究は、数多く行われており、実際の水害対応の場においても、既存の手法は適用できると考えられる。しかし、以下の点から、水害時に発生する様々な被害を考慮し、最適な対応策立案に役立てるシミュレーションを構築するため、以下の課題に対し要件を定義する。

既存研究の災害シミュレーションや避難シミュレーションは、災害対応策立案や避難計画などに活用されている。しかし、実際の災害時は、発生する災害現象の時点、発生箇所は様々である。災害時の状況把握や意思決定にこれらのシミュレーションを役立てるためには、実際の災害現象を正確に再現した上で、建物や道路、情報通信網などを考慮し、これらの被害が避難にどのような影響を及ぼすか、

発生する災害事象に応じて検討することが必要となる。しかし、災害現象や避難行動、通信環境に関する汎用的なシミュレーションは、それぞれ独立で存在しており、それぞれの被害の影響を相互に鑑みる仕組みは提案されていない。

また、上述したシミュレーション連携に関する研究はいずれも、各種シミュレータから算出されるデータを同期するための取り組みである。そのため、実際の災害対応現場において、次々と発生する状況を取り入れながら、氾濫解析のような、計算時間に複数日を要するシミュレーションを含めた連携を行うことは難しい。

2.2 アプローチ

本論文では自治体の災害対応担当者が、水害発生時に扱わなければならない膨大な数のデータを集約し、それらのデータに基づいて、市街地の状況を推定し、自動的に被害量を導出するシチュエーションディスプレイ「被害予測ダッシュボード」の実現を目指す。

- 本論文では、独立で存在する既存シミュレーションについて、シミュレーション・エミュレーション連携基盤 Smithsonian を利用して、連携動作させ、即時的に被害状況の一元的な定量化を行う。はじめに氾濫解析シミュレーションを用いて、災害現象を予測し、その災害現象に応じた道路被害、通信被害を推定、さらにその被害量が人間行動に及ぼす影響を推定する。連携基盤を用いてシミュレーション同士のデータ流通、同期を実現することで、実際に発生している被害をリアルタイムに取り込みつつ、即時的に被害量を算出する「災害現場で利用できるシミュレーション」を構築する。さらにその被害予測に合わせて、避難情報を発表するタイミングを変更することで、被害量がどの程度軽減できるか、定量的に把握することが本システム ARIA の構築目的となる。ARIA では、避難開始タイミングをパラメータとして変化させ、シミュレーション結果を出力させる。想定する使用方法としては、対象とする地域の人口、年齢分布、道路構成において、避難情報をいつ発表し、いつ避難が開始すれば人的被害が最も少なくなるか、降雨や浸水の程度に応じた結果を「被害予測ダッシュボード」として出力させ、最適な移動開始時間や猶予時間を数値化、明確化させることを目的としている。
- 水害被害を数値的に算出する既存手法には、数値解析シミュレーションによる氾濫解析、避難シミュレーションがあるが、特に、氾濫解析においては、計算時間に数時間から数日を要する。例えば台風の場合、数十時間から数時間前に対象地域に降るであろう降水量が予測できるが、この予測結果を取り入れ新たに氾濫解析、避難シミュレーションを行うことは難しい。そのため、災害対応現場では、被害想定や既往水害の経験

を考慮しつつ、柔軟に被害を予測することが求められる。このような同期連携が困難なシミュレータに関しても、既存の解析手法を取り込んだ被害予測を行うために、本論文では、解析結果を利用して降水量に応じたデータ同化を行い、浸水推定値を出力することで実時間での解析を可能にする。具体的には、氾濫解析シミュレータとして、土木研究所の解析ソフト NILIM2.0 から得られる浸水位の時系列データをもとに、観測値を内挿したデータ同化を行い、実際の値に近い浸水拡大過程を算出する。

以下、これらの要件を満たすべく提案する、インタラクティブな都市型水害に関する被害予測システム ARIA について述べる。

3. インタラクティブな都市型水害の被害予測システム ARIA の提案

3.1 概要

本論文では、前章にて挙げた要件を満たす、シミュレーション・エミュレーションの連携およびインタラクティブな情報入力を可能とする都市型水害に関する被害予測システム ARIA を提案する。ARIA では、上述の課題を解決するために、シミュレーション・エミュレーション連携基盤 Smithsonian を利用して、氾濫解析シミュレータ、避難シミュレータ、通信エミュレータ等を連携動作させ、即時的に被害状況の一元的な定量化を行う。

氾濫解析シミュレータとして、土木研究所の解析ソフト NILIM2.0 から得られる浸水位の時系列データをもとに、観測値を内挿したデータ同化を行い、実際の値に近い浸水拡大過程を算出する。さらに構造計画研究所製のマルチエージェントシミュレータ artisoc^{*1}を使用し、対象地域の住民を移動者エージェントとし、周囲の浸水状況に応じた行動をシミュレーションする。移動者エージェントはその位置や速度、入手情報などをもとに、行動を決定する。これにより避難の遅れや被害などを定量的に算出する。

さらに、水害時の人の流れや浸水範囲を把握するためジオラマ上にシミュレーション結果を表示する。シミュレータ、エミュレータ上では予測できなかった被害データを利用したシミュレーションを行うために、カメラを利用してジオラマ上に表示された被害データをインタラクティブにシミュレーションに入力し、被害データに基づいたシミュレーションを実行する。本章では、ARIA のシステム構成および、各種シミュレータ・エミュレータの動作と連携機構、被害データのインタラクティブな利用手法、被害量の定量的推定手法について述べる。なお、ARIA では降水量や河川水位、人流など実際の観測データを利用し、実際の水害状況を模倣することで、被害量の予測精度向上を目指

^{*1} artisoc: <http://mas.kke.co.jp/>

しているが、本論文では、シミュレーションの基本動作のみを対象とし、観測データの収集については扱わないこととする。

3.2 システム構成

本節では、提案する ARIA のシステム構成について述べる。ARIA は浸水シミュレータ、避難シミュレータ、スマートフォンエミュレータの3つのシミュレータ・エミュレータを連携基盤によって連携動作させるシステムである。連携基盤は、エミュレータとシミュレータの時刻同期などの実験の進行管理を担う連携マネージャと、Publish-Subscribe メッセージ交換を行う MQTT ブローカ (Mosquitto を使用) で構成される [14]。また、シミュレータ・エミュレータは経路計算機能、インタラクティブ被害データ入力機能、可視化機能の3つの機能で構成される (図1)。浸水シミュレータは、対象地域の浸水拡大過程を推定し、浸水の発生箇所的位置情報を連携基盤に送信する。道路情報管理 DB は避難所の位置情報や対象地域の道路データを保持しており、浸水シミュレータから Smithsonian を介して、通行不可能な道路など道路情報を更新する。経路計算サーバは、更新された道路情報に基づいて、重み付きダイクストラにより、地域住民の避難所までの経路を計算する。避難シミュレータは、地域住民 (シミュレータ上では移動者エージェントとして生成する) の避難行動をシミュレーションする。スマートフォンエミュレータを介して経路計算サーバから避難情報や避難経路の情報を受け取り、地域住民の避難行動の決定および被害量の算出を行う。次節で ARIA の動作の流れについて詳述する。

3.3 ARIA の流れ

浸水シミュレータは、河川洪水の発生地点、内水氾濫の発生地点を指定することにより、発生地点からの氾濫流量を想定し、市街地の標高データをもとに浸水域の拡大過程をシミュレーションする。浸水シミュレータで計算される浸水域の拡大にしたがって、地域住民の行動エリアは制限を受ける。浸水域となるエリアに含まれる道路は、通行不可能になると経路計算サーバがもつ道路情報管理 DB に送られ、通行不可能となった道路を避けた経路計算結果が移動者エージェントに送られる。

避難シミュレータは、対象地域の人口分布に基づき、移動者エージェントを生成し、定められた避難所までの避難行動をシミュレーションする。移動者エージェントの避難開始のきっかけとなる避難情報の発表時間は避難シミュレータ上で指定できる。避難情報の発表により、移動者エージェントはスマートフォンエミュレータを経由して、経路計算サーバから避難所までの避難経路を取得し、避難を検討する。それぞれの移動者エージェントは避難行動特性をもっており、行動特性の高いエージェントは避難情報

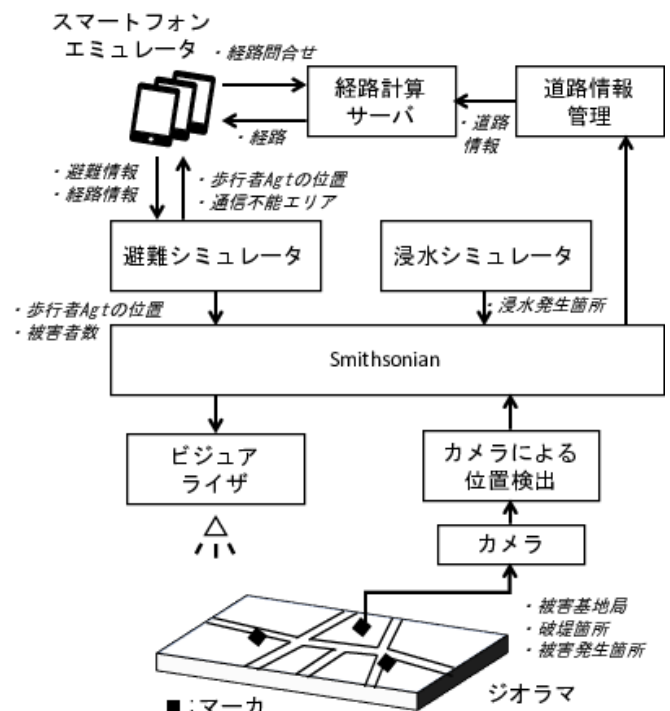


図1: システム構成

の発表直後に避難を開始するが、低いエージェントは避難開始までに一定時間を要す。また、周囲のエージェントが避難行動を開始したことをきっかけに、避難を開始する行動特性も設定される。避難開始の際に、移動者エージェントの周囲が既に浸水していた場合は、移動者エージェントは避難することができない。

ARIA では、浸水が通信環境に及ぼす影響を考慮している。浸水が進み、停電や基地局の故障が発生すると該当のエリアではスマートフォンエミュレータから、避難情報や避難経路の情報を受け取ることができなくなる。これは、移動者エージェントの避難開始や移動に影響する。避難中に浸水に遭遇した移動者エージェントや避難困難となった移動者エージェントは被害者数としてカウントする。この被害者数は、避難情報を発表したタイミングにより、変化する。発表タイミングを変更して ARIA によるシミュレーションを繰り返すことで、最小の被害量となる発表タイミングを見積もることができる。

上述の移動者エージェントの移動および浸水シミュレーションで推定された浸水域は、ビジュアライザによりマップ上に表示される。このマップは、プロジェクションマッピングで対象地域の地形図をもとに作成したジオラマ上に投影する。ジオラマ上に、マーカーを置くことで、カメラを介して ARIA に被害データの入力を行うことができる。マーカーは、河川の破堤箇所、内水氾濫の発生箇所、被害のあった基地局、人的被害の発生箇所などの被害データを設定できる。

例えば、水害発生時に新たに河川堤防の破堤が発生した

場合、マーカをジオラマの該当箇所置くことで破堤箇所の位置情報が連携基盤を介して、浸水シミュレータに送られ、浸水シミュレータは破堤箇所を起点とした氾濫流量と拡大過程を推定し、ARIA に反映させる。被害基地局のマーカは、その位置情報を避難シミュレータおよびスマートフォンエミュレータへ送り、基地局が担う通信エリアに存在する移動者エージェントに対して、避難情報や経路情報のやりとりを行えなくする。そのため、該当の移動者エージェントは情報に基づいた避難行動が行えなくなる。

以上のように ARIA では、水害発生時に発生しうる状況をシミュレータ・エミュレータ・マーカとカメラによる入力によって再現し、発生しうる被害量を定量的に示すことで、被害が最小限となる災害対応施策およびそのタイミングを把握する。

4. ARIA の実装

4.1 対象地域のマップ設定

本論文で構築するシミュレーションは大都市やその近郊の 1 市町村を対象範囲とする。対象とする地域に対応する二次元空間を D と定義し、 D を d メートル毎の n 個のグリッドに分割する。ここで、各グリッドの位置座標を $si \in D$ とする。はじめに、シミュレーション上に対象地域の、道路ネットワーク、時間帯別人口分布、避難場所の位置情報を設定する。道路ネットワークは open street map から対象地域の地図データをダウンロードし、PostGIS を用いて道路上の p 個のノードおよび q 個のノード同士のリンクの表を作成する。ノードは分岐点を含む道路を構成する点に相当する。

対象地域の測位系を平面直角座標とし、ノードの表はノード N_p の id N_p および、 x_{plain} 、 y_{plain} 、分岐点 N_p の存在するグリッドの id $si(N_p \in si)$ が含まれる。リンクの表には、リンクの id L_q およびリンクするノード N_p 、ノード N_{p+k} (k は任意の値) が含まれる。人口データは総務省国勢調査データの昼夜別世帯数をもとに、250 メートルメッシュごとの人口分布を生成する。人口分布をもとに、グリッド si のもつ人口数を割り当てる。さらに、避難所の位置に最も近いノードを避難所 N_e として設定する ($e = 1, 2, \dots, n$)。

本論文では、対象地域を 2015 年鬼怒川豪雨の発生した常総市の一部を $10\text{km} \times 10\text{km}$ の範囲で切り出し、マップ設定を行った。設定したマップを図 2 に示す。赤点はノード N_p 、緑線はリンク L_q を示している。同地域において、道路上のノード数は $p = 33,430$ 、リンク数 $q = 36,744$ であり、各種シミュレーションに用いるグリッドの大きさは $d = 10$ メートルとした (図 2 では、400 メートル格子を表示)。合計道路長は 21,112 メートルとなる。

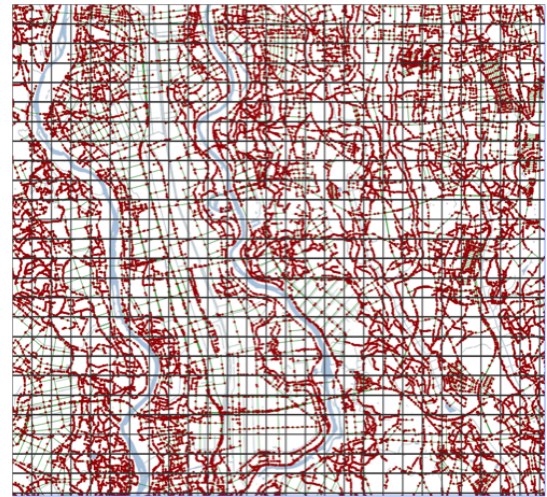


図 2: 対象地域のマップ

4.2 浸水シミュレータ

浸水シミュレータは、グリッドごと、単位時間ごとの浸水水位を予測する氾濫解析と連携基盤への結果の送信の 2 つの処理で行う。既存の氾濫解析シミュレータは、河川からの氾濫流を一次元不定流方程式で推定した後、各グリッドに流入、流出する氾濫流を二次元不定流方程式で解く手法が一般的である。しかし、既存手法は各グリッドについて、運動方程式と連続方程式を解く必要があるため、一市町村を対象とする場合、その計算には数時間から数日が必要となる。そのため、本論文では、既存の氾濫解析シミュレータであらかじめ計算した最大浸水深および氾濫流出量をもとに、河川洪水と内水氾濫の氾濫流の時間推移を推定する、確率密度関数を定義し、標高データに基づいて、各グリッドへの流入、流出量を推定することとした。

はじめに、河川洪水と内水氾濫の氾濫流の時間推移を推定する確率密度関数を定義する。河川洪水は堤防の破堤や溢水によって、堤防から一気に市街地へ氾濫流が流出する現象である。既往水害の調査結果から判明した氾濫流の時間変化 [16] をもとに、河川洪水の氾濫流の確率密度関数 $F_1(t)$ を式 (1) のように定義した (図 3 青線部)。河川洪水が発生した時点 t_1 での流出量を初期値として与え、確率密度関数にかけることで、河川から流出する単位時間あたりの氾濫流を算出する。

$$F_1(t) = \begin{cases} \lambda \exp(-\lambda t) & (t \geq t_1) \\ 0 & (t < t_1) \end{cases} \quad (1)$$

内水氾濫は、排水能力を超える豪雨によって、水路や市街地の各所で溢水する現象である。市街地の各所で発生するため、現在の観測網では内水氾濫の発生箇所を検知することは難しいが、地域住民からの通報によって、発生箇所を特定することができる。本論文では、溢水の水位上昇確率は時間的に等しいと仮定し、指数関数を用いて、内水氾

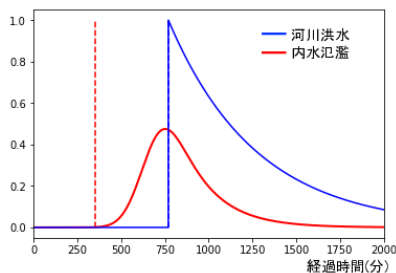


図 3: 河川洪水と内水氾濫の氾濫流量に関する確率密度関数

氾濫の確率密度関数 $F_2(t)$ を定義した (式 (2)、図 3 赤線部)。これは既往水害の内水氾濫に関する氾濫流の時間変化 [16] とほぼ一致する。後述するカメラによるインタラクティブなインターフェースを用いて、内水氾濫の発生が通報された箇所にマーカーを設置することで、降水量に見合った氾濫流が単位時間あたりの値として算出され、ARIA に内挿される。

$$F_2(t) = \lambda \exp(-\lambda(t - t_2)) \quad (2)$$

次に、標高データに基づいて、各グリッドへの流入、流出量を推定する。国土地理院の標高 API^{*2} から、対象地域の 10m 格子の標高データを取得する。各グリッド si に対して標高データを付与したのち、標高に基づき各グリッドの数値勾配 Z_x, Z_y を算出する。対象地域の一部に対して処理した、数値勾配 Z_x, Z_y を図 4 に示す。

河川洪水、内水氾濫の発生地点を指定すると、発生地点を含むグリッドを頂点としたグラフを生成する。グリッドの集合 $S(si \in S)$ から、隣接するグリッド対の集合 S_{next} を生成し、数値勾配の比率を重みとした重み付き無向グラフ $G_S = (S, S_{next})$ を生成する。各グリッド si には初期値として浸水深 $v_{t,i} = 0$ が設定されている。時刻 $t = t_1$ にグリッド sk で氾濫流 v_0 の河川洪水、もしくは内水氾濫が発生すると、 sk の浸水深 $v_{t,k}$ は、 $v_{t_1,k} \times F_n(t) (n = 1, 2, 3, \dots, n)$ にしたがって更新される。さらに、 G_S の他ノードは、時刻 $t = t_1 + 1$ では、 sk の浸水深をもとにグラフ G_S の重みにしたがって、隣接グリッドの浸水深 $v_{t,i}$ が更新される。この処理を繰り返すことで対象地域への氾濫の拡大過程を表現する。

浸水シミュレーションは、以上の処理を用いて、浸水の拡大過程を算出し連携基盤を介して、MQTT で避難シミュレーションや道路情報管理 DB に浸水が発生したグリッドの id および浸水深を送信する。

4.3 避難シミュレータと被害量の定量化

地域住民の移動と被害量を算出するための避難シミュ

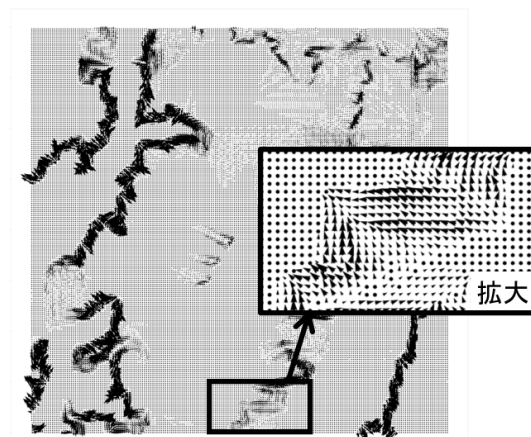


図 4: 標高データを利用した氾濫流の流れ方向の推定

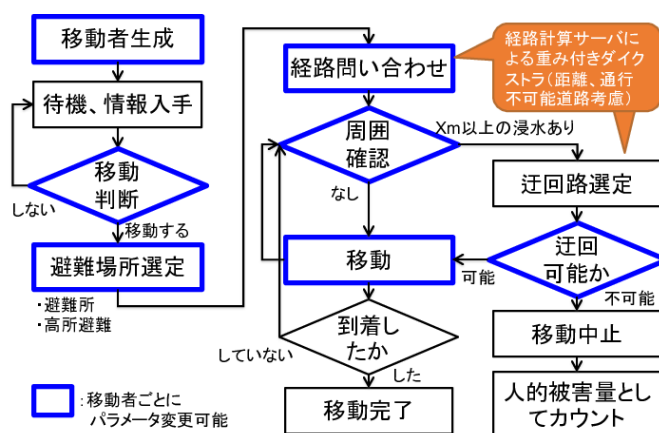


図 5: 避難シミュレーションの流れ

レーションの処理の流れの例を、図 5 に示す。避難シミュレーションは構造計画研究所の開発したマルチエージェントシミュレータ *artiso* を利用して作成した。避難シミュレーションははじめに、マップに設定された人口分布に従い、移動者エージェントを生成する。図 5 中に青枠で示す、移動の判断については移動者の避難行動特性として、移動者ごとにパラメータを設定できるものとした。つまり、対象地域の年齢分布や被災経験の有無、情報に対するアクセス性などに応じてその避難行動特性を設定することができる。また、移動者が目指す避難場所については、移動者ごとに初期値として設定されている。移動者エージェントの総数は、避難シミュレータ上で設定可能とした。図 6 は、移動者エージェント数を 1,000 人としたときの避難シミュレータを示す。

スマートフォンエミュレータから、避難情報が送信されると移動者エージェントは、それぞれの避難行動特性にしたがって移動判断を行う。例えば、避難行動特性に優れたエージェントは、避難情報の受信後すぐに避難所への移動を開始する。そのほか、避難情報を受信して一定時間経過した後、移動を開始するエージェントや周囲のエージェン

*2 国土地理院 標高 API: <https://maps.gsi.go.jp/development/api.html> の移動もしくは周囲での浸水発生をきっかけに移動を開

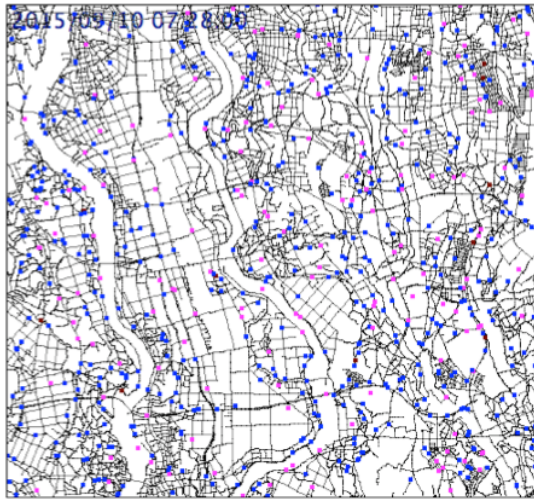


図 6: 避難シミュレータ (N=1,000)

始するエージェントなど数通りの避難行動特性を設定した。

移動者エージェントは、経路計算サーバから避難経路を受け取ると、避難所への移動を開始する。グリッドを移動するごとに周囲のグリッドがもつ浸水深 $v_{t,k}$ を確認し、 $v_{t,k} = 0$ の場合は、次のグリッドへ進む。 $v_{t,k}$ が閾値を超える場合は、移動ができなくなったものとして、移動者エージェントの現在地のノードを起点とし、経路計算サーバへ経路の問い合わせを行うこととした。この閾値は、移動者ごとに通行不可となる浸水の閾値を設定する。

移動者の現在位置のノードと目的の避難所のあるノードが一致した時点で、避難完了とし、その移動者数を避難完了数としてカウントする。また、移動途中で浸水が拡大し、避難所までの経路がなくなった移動者エージェントや、現在位置のノードのもつ浸水深 $v_{t,k}$ が一定の値を超えたエージェントは移動を中止し被害者数としてカウントする。避難シミュレータは、連携基盤を介し MQTT を用いて、各移動者エージェントの位置およびステータス (移動開始前、移動中、移動中止、移動完了)、避難完了数、被害者数、最大浸水深、浸水面積の被害量に関する情報をビジュアライザへ送信する。

4.4 経路計算サーバとスマートフォンエミュレータ

経路計算サーバは、避難シミュレータ上の移動者エージェントの経路を算出する機能をもつ。移動者エージェントの位置と目的ノードの id を入力することで、重み付きダイクストラ法により、距離、コストを考慮して、経路を決定し、経路上のノードのリストを返す。避難シミュレーションは、連携基盤を介して MQTT で移動者エージェントの位置と目的ノードの id が送信する。スマートフォンエージェントは位置およびノード id を受け取ると、REST API で経路計算サーバからノードのリストを受け取り、MQTT で避難シミュレーションにリストを渡す。

経路計算サーバは、ARIA の起動時に、ノード間の距離

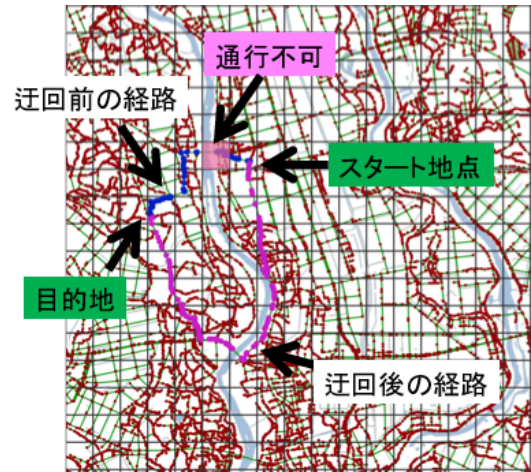


図 7: 経路計算結果

を重みとした重み付き無向グラフ $G_N = (N, N_{next})$ を生成する。このとき、ノードの集合 N_{next} は、ノードの集合 N と連結するリンクの表から選択される。グラフ G_N のコストの初期値はノード間の距離が設定されるが、浸水の拡大によって通行不可能となったノード、リンクの id は道路情報管理 DB を介して、グラフ G_N に反映される。

図 7 は洪水によって河川にかかる橋が通行不可能となった場合の経路計算結果の例を示す。青線はグラフ G_N のコストとして、初期値の距離が設定されている際の経路計算結果を示す。図中のスタート地点から目的地の避難所まで、最短経路での経路が返される。河川洪水の発生後、橋の含まれる格子 (図 7 のピンク部分) が通行不可能となる。格子に含まれるノード id とリンク id は道路管理 DB に送信され、グラフ G_N の該当箇所のコストが更新される。コストが更新されたのち、移動者エージェントからスマートフォンエミュレータを介して、避難経路の問い合わせがあると、経路計算サーバは図 7 ピンク線に示される迂回ルートを返す。

4.5 ビジュアライザによるジオラマ上へのプロジェクションマッピング

ビジュアライザは連携基盤から、各種シミュレーションで計算した移動エージェントの位置や浸水したグリッドのデータを受け取り、ジオラマ上へ表示する機能をもつ。また、被害量のデータをグラフ化し提示する (図 8)。

ジオラマ上へ表示することにより、自治体の災害対応の現場において、対象地域で発生している被害と地域住民の動きを一元的に観測し、かつ事前に想定できなかった被害を ARIA に取り入れることができる。対象地域のジオラマを図 9 に示す。対象地域の標高データを国土地理院からダウンロードし、1m × 1m に縮尺したうえで、25 個に分割し 3D プリンタで印刷した。

さらに、ARIA からシミュレーションの 1step ごとに出力

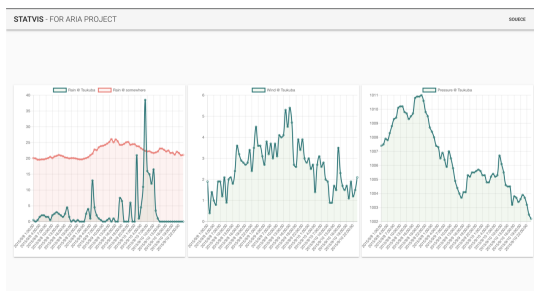


図 8: 被害量の推定結果



図 11: カメラによるマーカの位置とデータ取得

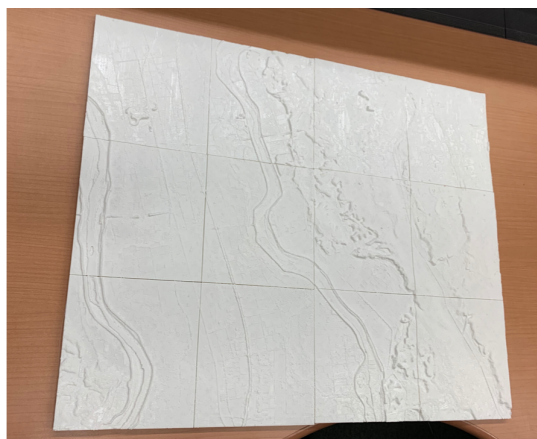


図 9: ジオラマ

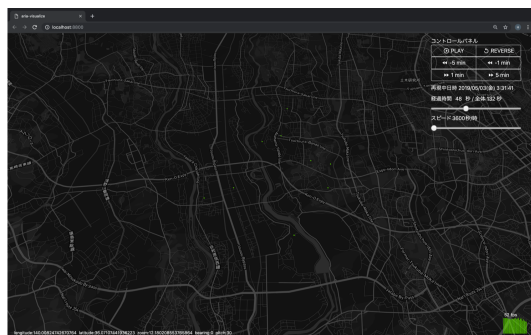


図 10: シミュレーション結果の可視化の様子

される移動エージェントの位置や浸水したグリッド id を、連携基盤を介して受け取り、可視化ライブラリ Harmoware-VIS^{*3}で可視化する(図 10)。Harmoware-VIS は、Uber社の 3次元可視化ライブラリ Deck.GL をベースにした、JavaScript の可視化基盤であり、複数のモビリティデータを簡単にマッピングすることができる。Harmoware-VIS で可視化した対象地域のマップを、プロジェクションマッピングでジオラマ上へ表示することで、対象地域全体の被害状況について一元的な観測を可能にした。

*3 Harmoware-VIS: <https://github.com/Harmoware/Harmoware-VIS>

4.6 マーカによる被害データ取得とシミュレーションへの反映

ARIA では、浸水シミュレーションで想定できない被害についても内挿し、被害量の推定に用いる。河川洪水や内水氾濫の発生箇所は、事前に行われる被害想定で、その発生可能性が高い箇所が推定されるものの、実際には、これらの災害事象が発生する地点やタイミングは、降水量やその分布によって様々である。また、これらの災害事象により発生する通信途絶についても、事前に予測することは難しい。そのため、どの地点でこれらの災害事象が発生しても、その被害を鑑み、最適な避難タイミングを算出できるよう、インタラクティブにシミュレーションに被害データを内挿する機能を構築した。

内挿には、QR コードで作成したマーカを作成し、ジオラマ上の該当位置に設置することで、その位置と被害の種類をカメラによって判定し、連携基盤を介して ARIA に送信する。被害データは河川洪水、内水氾濫、通信途絶を設定した。図 11 は、ジオラマ上に設置したマーカとカメラによる位置検出の様子を示す。カメラによる位置検出では、ジオラマの北東部を原点として、マーカが設置された位置を検出する。例えば、マーカが通信途絶を示す場合、マーカを設置した位置の基地局のカバーエリアにいる移動者エージェントを対象に、スマートフォンエミュレータとのデータ送受信を行えなくする。これは、実際の水害時に停電などで地域住民がスマートフォンによる情報の取得ができなくなった状況を再現するものである。

5. まとめ

本論文は、実際の水害時に避難タイミングの参考となる根拠データ生成を目的に、被害状況の一元的な定量化を図る被害予測システム ARIA を提案した。(1) 氾濫解析や避難行動、通信環境に関する汎用的なシミュレーション・エミュレーションは、それぞれ独立で存在しており、それぞれの被害の影響を相互に鑑みる仕組みがないこと、(2) それぞれのシミュレーションの実行時間が異なり、特に氾濫解析においては、計算時間に複数日を要することから実際の水害時に実時間で結果算出は難しく、水害の拡大状況に

合わせた被害想定が困難である課題に対し、ARIA は、水害発生時に実時間で被害量を算出するシステムである。水害シナリオとして既往水害での浸水拡大過程を模倣し、浸水により被害を受けた道路や住民の避難行動を再現する。さらに、模型を利用して対象地域の通信途絶を表現することで、人的被害軽減のための情報提供タイミングやそれに応じた被害量を算出する。

ARIA では、シミュレーション・エミュレーション連携基盤 Smithsonian を利用することで、氾濫解析シミュレータ、避難シミュレータ、通信エミュレータ等を連携動作させるとともに、既往手法である氾濫解析シミュレータの出力結果を用いて浸水位の時系列データをもとに、観測値を内挿したデータ同化を行い、実際の値に近い浸水拡大過程を実時間で算出した。さらに、氾濫解析シミュレーション、避難シミュレーション、経路計算システム、スマートフォンシミュレータを連携基盤を用いて連携させるとともに、カメラを利用したデータ入力や地図上への統合的な可視化機能を構築した。ARIA を用いることで、被害量がどの程度軽減できるか、定量的な被害予測把握を目的として、被害予測に合わせて、被害予測が最小限となる避難情報発表タイミングの根拠データの算出を可能にした。

謝辞 本研究開発は総務省 SCOPE(受付番号 172106102)の委託および JSPS 科研費 JP19K20414 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Makinoshima, F., Imamura, I., Abe, Y., Enhancing a Tsunami Evacuation Simulation for a Multi-scenario Analysis using Parallel Computing, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol.83, pp.36–50, 2018.
- [2] Beloglazov, A., Almashor, M., Abebe, E., Richter, J., and Charles, B. S. K., Simulation of Wildfire Evacuation with Dynamic Factors and Model Composition, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol.60, pp.144–159, 2016.
- [3] Ouyang, M., Review on Modeling and Simulation of Interdependent Critical Infrastructure Systems, *Reliability engineering & System safety*, Vol.121, pp.43–60, Elsevier, 2014.
- [4] Pel, A. J., Bliemer, M. C.J., Hoogendoorn, S. P., A Review on Travel Behaviour Modelling in Dynamic Traffic Simulation Models for Evacuations, *Transportation*, Vol.39, No.1, pp.97–123, Springer, 2012.
- [5] Chen, L., Tang, T.Q., Huang, H.J., Wu, J.J., Song, Z., Modeling Pedestrian Flow Accounting for Collision Avoidance during Evacuation, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol.82, pp.1–11, 2018.
- [6] Li, W., Li, Y., Yu. P., Gong, J., Shen, S., The Trace Model: A Model for Simulation of the Tracing Process during Evacuations in Complex Route Environments, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol.60, pp.108–121, 2016.
- [7] Shendarkar, A., Vasudevan, K., Lee, S., Son, Y.J., Crowd Simulation for Emergency Response using BDI Agents based on Immersive Virtual Reality, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol.16, No.9, pp.1415–1429, Elsevier, 2008.
- [8] Nguyen, M. H., Ho, T. V., Zucker, J.D., Integration of Smoke Effect and Blind Evacuation Strategy (SEBES) within Fire Evacuation Simulation, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol.36, pp.44–59, Elsevier, 2013.
- [9] Kirov, G., Zlateva, P., Velev, D., Software Architecture for Rapid Development of HLA-Integrated Simulations for Critical Infrastructure Elements under Natural Disasters, *International Journal of Innovation, Management and Technology*, 6.4, 244, 2015.
- [10] Dahmann J. S., Morse K. L., High Level Architecture for Simulation: An Update, In *Proceedings of 2nd International Workshop on Distributed Interactive Simulation and Real-Time Applications*, pp.32-40, 1998.
- [11] Fiedrich, F., An HLA-based Multiagent System for Optimized Resource Allocation after Strong Earthquakes, In *Proceedings of the 38th conference on Winter simulation Winter Simulation Conference*, pp.486–492, IEEE, 2006.
- [12] Hwang, S., Starbuck, R., Lee, S., Choi, M., Lee, S., Park, M., High Level Architecture (HLA) Compliant Distributed Simulation Platform for Disaster Preparedness and Response in Facility Management, In *Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference*, pp.3365–3374, IEEE, 2016.
- [13] Jain S., McLean, A Framework for Modeling and Simulation for Emergency Response, In *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, Vol.1, pp.1068–1076, 2003.
- [14] 湯村翼, 榎本真俊, 押川侑樹, 井上朋哉, 宮地利幸, Jonathan: テストベッドにおいてマルチエージェントシミュレータと通信エミュレータを連携する基盤の開発, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2017(JAWS2017), 2017.
- [15] 廣井慧, 都市型水害におけるリアルタイム避難シミュレーションの提案, 日本災害情報学会第 19 回学会大会, C5-1, 2018.
- [16] 二瓶 泰雄, 大槻 順朗, 2015 年関東・東北豪雨における鬼怒川洪水氾濫状況, なかれ, Vol.37, pp.19–25, 2018