

コンシューマ・システム論文

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,a)} 井上 朋哉² 明石 邦夫² 廣中 颯³ 菅野 洋信³ 湯村 翼² 宮地 利幸² 篠田 陽一³

受付日 2019年9月30日, 採録日 2020年2月14日

概要：水害時の人的被害は、氾濫水による直接的な被害や、道路の冠水や通信障害による避難の遅れや避難中の事故など、様々な要因が複雑に作用して発生する。しかし、氾濫、道路冠水、通信障害などの既存シミュレーションは独立に機能しており、水害被害に関連する事象について統合的な推定、予測が難しい。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。ARIA は、最適な情報提供タイミングの算出を目的として、水害の発生中に降水量、河川水位など観測データを取り入れながら、リアルタイムでの被害予測を行うシステムである。これまで独立であった、氾濫解析や避難行動、通信環境に関するシミュレーション・エミュレーションを、連携基盤 Smithsonian を利用して連携動作させ、水害被害にかかわる複数シミュレーション・エミュレーション間での相互のデータ交換と同期を実現する。本論文では、水害時の避難に関連するシミュレーションやエミュレーションの機能を組み込み、ARIA を設計するとともに、茨城県常総市の道路データ、標高データなどを利用して、プロトタイプを実装した。プロトタイプについて、リアルタイムでの被害予測が可能か処理時間の性能調査を行ったところ、移動者エージェントが4,000名であれば5分程度での予測が可能であること、移動者エージェントの数が少ない場合であっても被害量の割合に大きな変化がないことが分かり、提案した ARIA での即時的な被害予測が可能であることが確認できた。

キーワード：水害被害予測, シミュレーション・エミュレーション連携, 防災 IT システム

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

KEI HIROI^{1,a)} TOMOYA INOUE² KUNIO AKASHI² HAYATE HIRONAKA³ HIRONOBU KANNO³
TSUBASA YUMURA² TOSHIYUKI MIYACHI² YOICHI SHINODA³

Received: September 30, 2019, Accepted: February 14, 2020

Abstract: Human casualties of flooding is caused by various factors such as damage caused by flood water, delays in evacuation due to road flooding/communication network failures, or accidents during evacuation. However, conventional simulations (e.g., river flooding, road flooding, and communication failures) are developed as proprietary system, it is difficult to estimate and predict phenomenon or casualties simultaneously related to flood damage. This paper proposes an interactive urban flood damage prediction system “ARIA” that simulates urban flood, the sufferer, and network failure in an integrated manner. We aim to predict flood damages - the number of sufferers or the locations of flooded roads - and figures out the suitable timing of an evacuation advisory while incorporating actual measurement values like precipitation/river water level data observed during flood occurrence using data assimilation method. ARIA cooperates conventional proprietary simulators for flood/evacuation/network damage analysis using simulation and emulation federation platform “Smithsonian”. In this paper, we design ARIA by incorporating conventional simulation and emulation functions related to evacuation. Then we implement a prototype using road and elevation data of Joso City, Ibaraki Prefecture. We confirm that the prototype with 4,000 agents can predict flood damage in about 5 minutes and there was no significant difference of damage amount in the number of agents.

Keywords: flood damage prediction, simulation and emulation federation, crisis management IT system

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、それにとまな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かかわらず、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前直後に、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。

現在の水害の状況把握は、あらかじめ、ある一定の降水量に対する氾濫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事前計算に基づいた手順で実施される。しかし、実際の水害発生時には事前計算で予測できなかった規模で浸水が拡大することも少なくない。そのため、降雨や河川水位などの水害に関する様々なデータ収集や事前計算が行わ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、実データに基づいた判断が難しい。

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、通信エミュレータなどの複数シミュレーションを連携動作させ、被害量を算出するシステムである。降雨や河川水位など実際の観測データを取り入れつつ浸水拡大過程を予測し、浸水により被害を受けた道路や住民の避難行動をリアルタイムでシミュレーションする。さらに、浸水による通信障害をシステム上にエミュレートし、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。

シミュレータとエミュレータの連携により構成するのは、本システムでは最終的な予測結果を得るためのシステムの構成が現実の構成に可能な限り近いことを重視するからである。さらに、このような構成は、①シミュレーシ

ョン専用のプログラムを新たに記述せず、個別に開発された精度の優れたものを採用し、その部分の妥当性に関する議論を回避することができ、②システム構成に変更が生じた場合に、変更箇所の差し替えだけで対応可能であるとともに、③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組み込むことができるという利点を持つ。

本論文では、ARIA のプロトタイプを構築し、予測時間および出力結果について性能調査を行う。提案した ARIA について、避難シミュレータ上で移動する人数を変更し、目的とする即時計算が実施でき、またその予測結果について実際に発生しうる事象と照らし合わせ妥当な結果が出力されるか確認する。

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値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などの各種サービスを提供する。Dahmann

¹ 名古屋大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagoya University, Nagoya, Aichi 464-8603, Japan

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, Nomi, Ishikawa 923-1211, Japan

³ 北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology, Nomi, Ishikawa 923-1211, Japan

a) k.hiroi@ucl.nuee.nagoya-u.ac.jp

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ラ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 ブローカで、各種シミュレータ・エミュレータの同期連携を実現している [14]。

2.2 実時間で動作する被害予測における課題

上記で述べた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、被害想定や都市計画など様々な場において活用されている。しかし、我々の目的とする、水害発生時にリアルタイムで実観測データを利用しつつ、被害量を推定、予測するシステムの実現には以下にあげる 2 つの課題があると考えられる。

2.2.1 氾濫解析シミュレーションにおける計算時間

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、1 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。たとえば台風の場合、数十時間から数時間前に対象地域における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。リアルタイムでの被害予測を実現するためには、水害の発生が見込まれてから被害が発生するまでの猶予時間は、台風の場合で 1~3 日前、短時間強雨の場合で数十分前であり、少なくとも、この猶予時間の間に観測データ、予測データを取り込みながら、被害予測を実施する必要がある。

2.2.2 標準化形式に則ったシミュレータ・システムの利用

災害現象や建物被害、避難行動などに関する既存のシミュレータは、それぞれ独立に存在しており、出力を相互に鑑みる仕組みは提案されていない。シミュレーション連

携に関する研究はいずれも、データ形式の統一が必要であり、すでに導入、活用されている汎用的なシミュレータどうしの連携を目的としていない。水害被害にかかわる複数シミュレーションで出力データを流通させ、それぞれの計算過程にこれらの結果を相互に取り入れるためには、定められたデータ形式に準ずるシミュレーションやシステムの利用が必要となる。しかし、現実的な問題としてすでに利用されているシミュレーションやシステムの更改は、導入コストの点から困難である。そのため、自治体や企業などですでに利用している汎用的なシミュレーション・システムを利用し、被害予測システムを構築する必要がある。

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

実際の水害発生時に、河川水位や降水量などの実観測データ、予測データを利用した避難タイミングの参考となる根拠データ生成を目指している。本論文では、氾濫解析シミュレータ、避難シミュレータなど、水害の被害予測に用いる複数のシミュレーションおよび通信エミュレータを連携動作させ、水害の被害量を一元的に算出するシステムを提案する。

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模倣し、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ながら、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はエミュレータにより模倣し、これを連携利用することによって、より正確な被害量を見積もることを目的としている。また、当該情報サービスの災害時における精度や有用性などを評価するしくみとしての活用を見込むこともできる。

このようなシステムの実現には、2.2 節であげた課題を解決し、水害の被害予測算出にかかわる複数シミュレータ、エミュレータの実時間での連携が必要である。そこで、本論文では、以下の 3 点の手法により、2.2 節の課題解決を図るとともに、実運用を見据えた被害予測システム ARIA を構築する。

氾濫解析シミュレーションの高速化

本システムでは従来、計算時間がかかっていた氾濫解析シミュレーションをシナリオ化し、実観測データと比較することで最適なシナリオを選択する。氾濫解析シミュレーションにかかわる計算を事前に実施することで、計算時間を大幅に削減し、実観測データを利用したリアルタイムでの被害予測を実現する。また、事前計算では予測できなかった破堤地点からの洪水や内水氾濫の浸水拡大過程の算

出も行う。

シミュレーション・エミュレーション連携

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、複数シミュレータ、エミュレータ間での同期と相互に算出結果を取り入れた予測を実現する。利用した連携基盤は MQTT でデータを流通するため、MQTT でのデータ入力・出力を行うインターフェースを必要とするものの、データ形式の統一や新たな機能追加にともなう大幅なハードコーディングの書き換えの必要なく、汎用的なシミュレータ、エミュレータ、システムを連携できる。MQTT のトピックを指定することで、連携基盤で流通するデータを利用した計算が可能となる。

予測困難な事象のデータ入力

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。

3.2 システム構成

本節では、提案する ARIA のシステムについて述べる(図 1)。ARIA は水害の発生中に降水量、河川水位など観測データを取り入れながら、リアルタイムでの被害予測を行うシステムである。このリアルタイムでの被害予測は 3.1 節で述べた氾濫解析シミュレーションの高速化およびシミュレーション・エミュレーション連携により実現する。本論文では、後述の 4.2 節で述べる手法を用いて氾濫解析シミュレーションの高速化を行ったうえで、連携基盤 Smithsonian を利用して、図 2 に示す、土木研究所の解析ソフト NILIM2.0 [15] (既存の氾濫解析シミュレータ)、観測システム (降水・河川)、観測データ収集システム、氾濫解析シミュレータ、避難シミュレータ、スマートフォンエミュレータ、避難経路提示システム (道路冠水シミュレータ、道路情報管理 DB、経路計算サーバで構成)、スマートフォン画面表示システム、被害予測結果表示システム、入力インターフェース、可視化システムを連携させることでリアルタイムでの被害予測が可能なシステムを開発した。連携基盤 Smithsonian は、NICT の開発したシミュレーション・エミュレーション連携基盤であり、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]。

3.3 ARIA における各シミュレータ/エミュレータ/システムなどの役割

連携するシミュレータ/エミュレータ/システムなどの

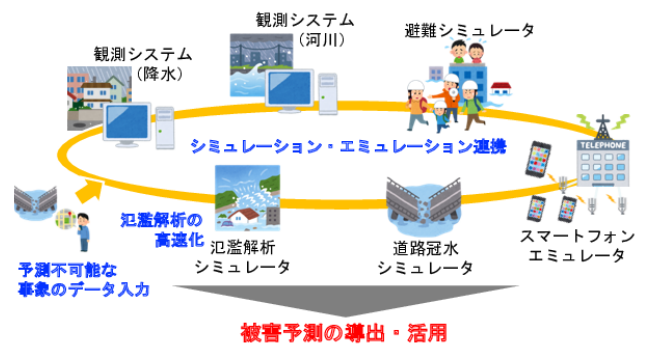


図 1 システムの概要

Fig. 1 System overview.

役割を表 1 に示す。また、代表的なシミュレータの概要について以下に述べる。氾濫解析シミュレーションでは、NILIM2.0 を用いて複数通りの降雨パターンにおける浸水水位の時系列データを算出し、複数の水害シナリオを作成した。作成した水害シナリオと河川水位、降水量の観測データを比較し、最も観測データと最も類似する水害シナリオを選択する。選択された水害シナリオでの浸水値は Smithsonian に送信される。

道路冠水シミュレータは、氾濫解析シミュレータから算出される浸水状況に応じて、通行不可能となった道路を逐次計算する。計算結果は Smithsonian を介して道路管理 DB に送信され、通行不可能な道路など道路情報を更新する。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、このデータは対象地域の避難経路算出に用いられる。

避難シミュレータは、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 [16] を使用する。artisoc では、対象地域の住民を移動者エージェントとし、氾濫解析シミュレータから算出される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。

スマートフォンエミュレータは、地域住民がもつスマートフォンの通信網および機能を模したエミュレータであり、避難情報の受信や避難経路の検索などのサービスを避難シミュレータ内のエージェントに提供する。避難経路の検索には、経路計算サーバが用いられる。浸水値に応じて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し、スマートフォン上に提示する機能を持つ。

3.4 ARIA での被害予測の流れ

提案システムの氾濫解析シミュレータは、NILIM2.0 で算出した複数の水害シナリオと降水量、河川水位を比較し、最適なシナリオを浸水域の拡大過程として選定する。この氾濫解析シミュレータで計算される浸水域の拡大にし

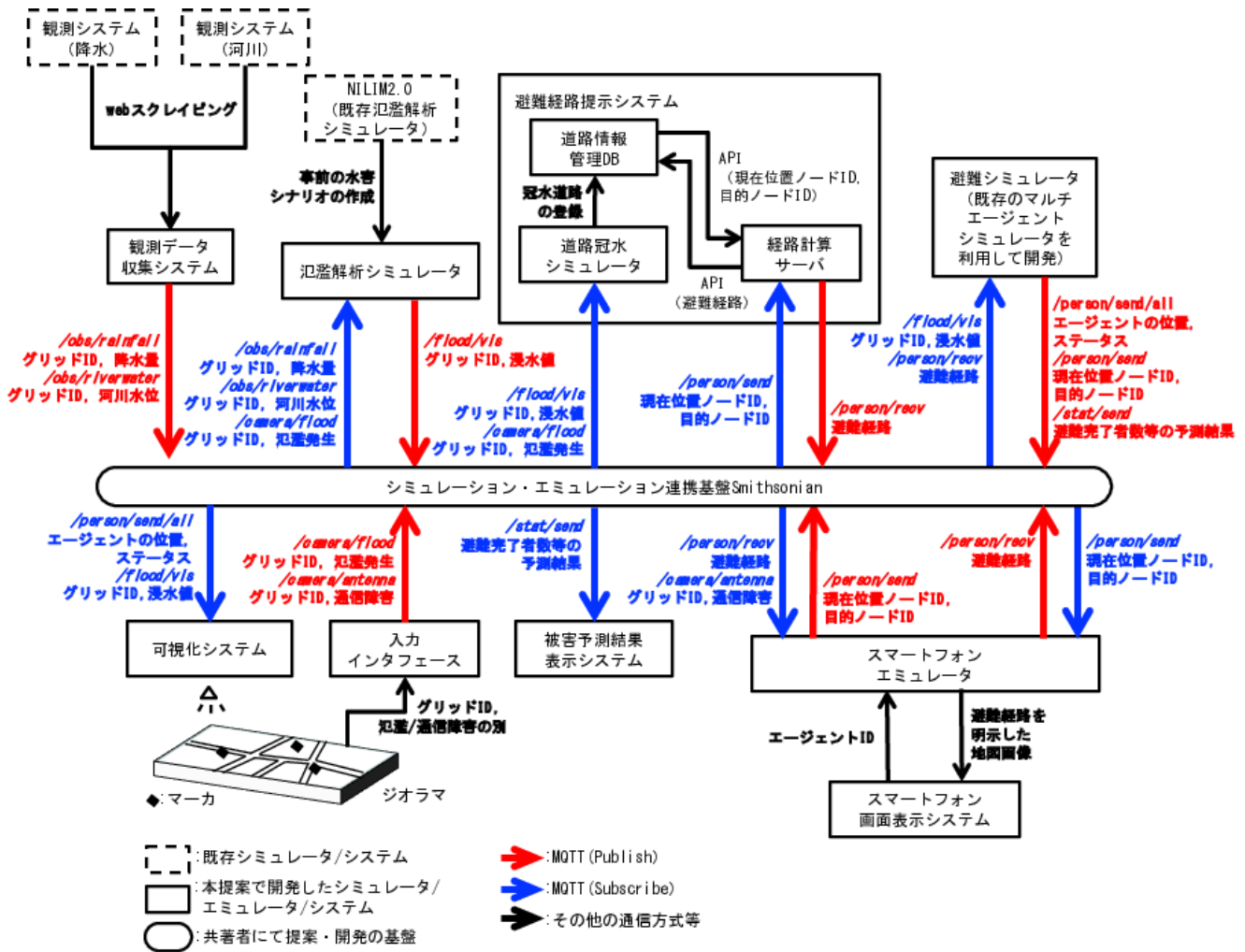


図 2 システム構成

Fig. 2 System configuration.

たがって、地域住民の行動エリアは制限を受ける。道路冠水シミュレータにて浸水域となるエリアに含まれる道路が算出され、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異なる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すで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し、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氾濫解析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

表 1 開発した各シミュレータ/エミュレータ/システムなどの ARIA での役割
Table 1 Role of each simulator/emulator/system in ARIA.

名称	役割
観測データ収集システム	自治体, 防災にかかわる機関などの観測システム (降水・河川水位) から観測データを収集する.
氾濫解析シミュレータ	既存の氾濫解析シミュレーションで算出した複数の水害シナリオと降水量, 河川水位を比較し, 最適なシナリオを浸水域の拡大過程として選定する.
避難シミュレータ	対象地域の住民を移動者エージェントとし, 氾濫解析シミュレータから算出される周囲の浸水状況に応じた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	地域住民がもつスマートフォンの通信網および機能を模したエミュレータであり, 避難シミュレータ内のエージェントはこのスマートフォンエミュレータを介して避難情報の受信や避難経路の検索などのサービスを利用する.
避難経路提示システム	道路冠水シミュレータ, 道路情報管理 DB, 経路計算サーバの 3 つから構成される. 道路冠水シミュレータにて, 氾濫解析シミュレータから算出される浸水状況に応じて, 通行不可能となった道路を逐次計算する. 対象地域の道路の通行可否は道路情報管理 DB にて管理・更新される. 経路計算サーバは, 道路上の浸水値を考慮したうえで, 地域住民の避難所までの経路を計算し, スマートフォンに提示する.
スマートフォン画面表示システム	エージェントの ID を指定することで該当エージェントのスマートフォン画面を表示する. スマートフォン画面として, 避難経路提示システムから提供される避難経路を示した地図データが表示される.
被害予測結果表示システム	避難シミュレーションが保持する, 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), および氾濫解析シミュレーションで算出される各グリッドの浸水値をもとに, 避難完了数, 被害者数, 最大浸水値, 浸水面積といった被害量に関するデータをグラフ化, 表示する.
入力インタフェース	氾濫解析シミュレータでは予測できなかった河川洪水や内水氾濫の発生, および停電などの通信障害の発生について, ジオラマとマークを利用して ARIA に内挿する.
可視化システム	各移動者エージェントの位置およびステータス, および各グリッドの浸水値をもとに, 地図上に表示する. 表示は, 各シミュレータ/エミュレータのステップごとに実施される.

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.

たとえば, 水害発生時に新たに河川堤防の破堤が発生した場合, マークをジオラマの該当箇所に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. 被害基地局のマークは, 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・マーク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. 既往水害のデータを利用したプロトタイプの開発

本論文では, 図 2 のシステム構成に基づいて, 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨で被害を受けた茨城県常総市の一部地域に対して, プロトタイプを開発した. プロトタイプの外観を図 3 に示す. 氾濫解析シミュレータおよび避難シミュレータの結果をジオラマ上に表示するとともに, 被害



図 3 ARIA の外観
Fig. 3 The ARIA system.

量の予測結果, 各エージェントの持つスマートフォンの画面表示をディスプレイに表示している.

4.1 対象地域のマップ設定

本論文で構築するシステム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 メートルごとの 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 $s_i \in D$ 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 OpenStreetMap [17] から対象地域

の地図データをダウンロードし、作成する。ダウンロードした地図データに設定されているノード（分岐点を含む道路を構成する点に相当）に対し、POIを示すタグが設定されているノード、1つの道路に複数の重複する道路を構成するノードを削除した。さらに、残ったノードに対し、ノードどうしをつなぐ道路上の線をリンク（ノードどうしをつなぐ線に相当）として設定した。ここで、道路ネットワークは、 p 個のノードおよび q 個のリンクから構成される。対象地域の道路ネットワークについて、PostGIS [18] を用いて p 個のノードおよび q 個のリンクの表を作成する。

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 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 s_i ($N_p \in s_i$) 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 s_i の持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、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 4 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 4 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。

4.2 氾濫解析シミュレータ

本システムでは高速化のため、事前計算で様々な降雨パターンに応じて氾濫解析のシナリオを複数作成、実観測データと比較することで最適なシナリオを選択することとした。シナリオの作成にあたっては、NILIM2.0を用いた。比較は、各シナリオの降水量、河川水位の時系列データと、降水量、河川水位の実観測データについてそれぞれ動的時間伸縮法の最短距離を算出し、最短距離の合計値が最も小さいものを最も類似したシナリオとして選択する。

さらに、事前計算では予測できなかった氾濫の発生について、後述する入力インターフェースを用いて、河川洪水や内水氾濫の発生が通報された箇所からの氾濫流を算出し、ARIA に内挿する。河川洪水と内水氾濫の氾濫流は、確率密度関数を用いて定義し、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。

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 [20] 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 5 青線部)。河川洪水が発生した時点 t_1 での流出量を

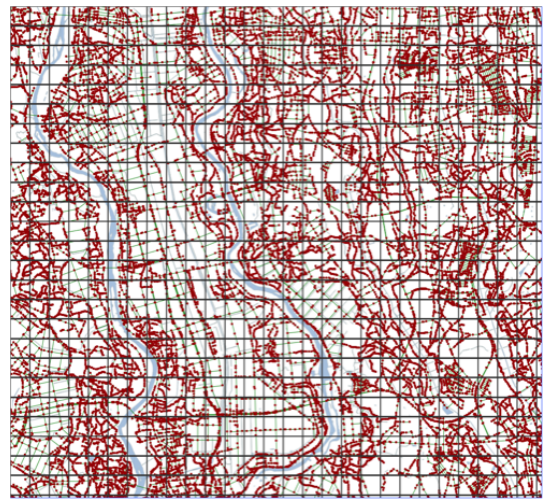


図 4 対象地域のマップ

Fig. 4 Map configuration of target area.

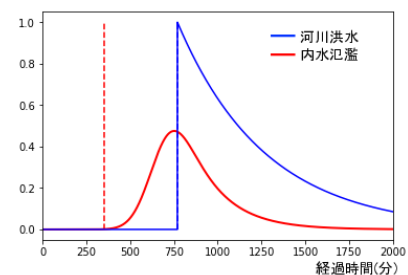


図 5 河川洪水と内水氾濫の氾濫流量に関する確率密度関数

Fig. 5 Probability density function for river flood and internal flood.

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。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、内水氾濫の確率密度関数 $F_2(t)$ を定義した (式 (2), 図 5 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 [20] とほぼ一致する。

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

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^{*1} 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 s_i に対して標高データを付与したのち、標高に基づき隣接グリッドとの数値勾配 Z_x , Z_y を算出する。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

*1 国土地理院標高 API, <https://maps.gsi.go.jp/development/api.html>

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 を生成する。時刻 $t = t_1$ にグリッド s_k 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、 s_k の浸水値 $v_{t,k}$ は、 $v_{t1,k} \times F_n(t)$ ($n = 1, 2, 3, \dots, n$) にしたがって更新される。 G_S の他ノードは、時刻 $t = t_1 + 1$ では、 s_k の浸水値をもとにグラフ G_S の重みにしたがって、隣接グリッドの浸水値 $v_{t,i}$ 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。さらに、事前に算出、選択した水害シナリオの各グリッドと浸水値を比較し、値が大きい方を該当グリッドの浸水値として設定する。

氾濫解析シミュレータは、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で避難シミュレータや道路冠水シミュレータに浸水が発生したグリッドのIDおよび浸水値を送信する。

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レーションの処理の流れの例を、図6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 *artisoc* 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6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7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。

スマートフォンシミュレータから、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。たとえば、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ト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持つ浸水値 $v_{t,k}$ 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合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。

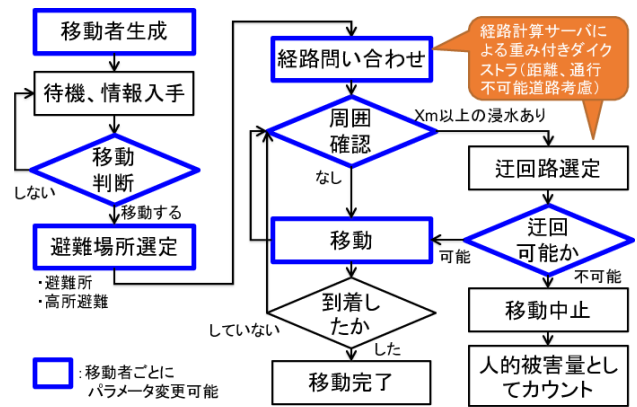


図6 避難シミュレーションの流れ

Fig. 6 Procedure of evacuation simulation.

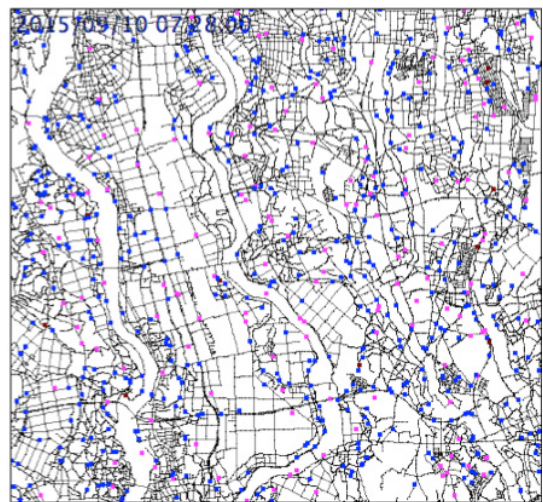


図7 避難シミュレータ (N = 1,000)

Fig. 7 Evacuation simulation (N = 1,000).

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）、各グリッドの浸水値、避難完了数、被害者数、最大浸水値、浸水面積の被害量に関するデータを送信する。可視化システムはこれらのうち、各移動者エージェントの位置およびステータス、各グリッドの浸水値のデータを受け取り、地図上への表示を行う。さらに被害予測結果表示システムは、避難完了数、被害者数、最大浸水値、浸水面積を受け取り、避難完了数、被害者数、最大浸水値、浸水面積を算出したうえで、被害量に関する情報として、リアルタイムでグラフ化し、図8のように提示する。

4.4 避難情報の受信/避難経路の検索サービスを提供するスマートフォンシミュレータ

避難シミュレータ上の移動者エージェントはスマートフォンを保持しており、このスマートフォンを通じて避難情報の受信および避難経路の検索が可能である。避難シミュレータ上に自治体機能として避難情報の発表を行う

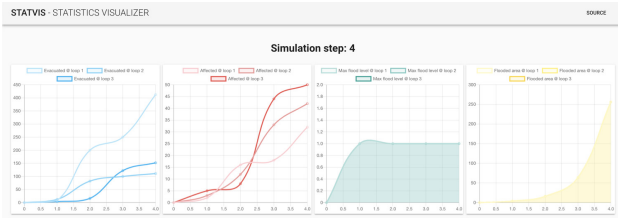


図 8 被害量の推定結果 (左から避難完了者数, 被害者数, 最大浸水値, 浸水面積を示す)

Fig. 8 Damage prediction result (the number of agent who can arrive shelter, the number of human casualties who can not evacuate, maximum flood value, and flood area).

エージェントが存在しており, 洪水発生や降水量などあらかじめ定めたパラメータに応じたタイミングで避難情報を発表する. 避難情報が発表されると, 通信可能エリアにいるエージェントは避難情報を受け取り, 最近傍の避難所まで移動を開始する.

各移動者エージェントは移動開始にあたって, スマートフォンを使って最近傍の避難所までの最も安全な避難経路を検索する. 避難経路の検索には, 図 2 に示す避難経路提示システムを利用する. 避難経路提示システムは, 道路冠水シミュレータ, 道路情報管理 DB, 経路計算サーバから構成される. エージェントが避難経路を検索すると, 経路計算サーバは, エージェントの現在位置と最近傍の避難所の位置に応じて, 道路冠水シミュレータで算出された通行不可能な道路を除外し, 算出する. 移動者エージェントの位置と目的ノード 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 を送信する. スマートフォンエミュレータ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 9 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 9 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

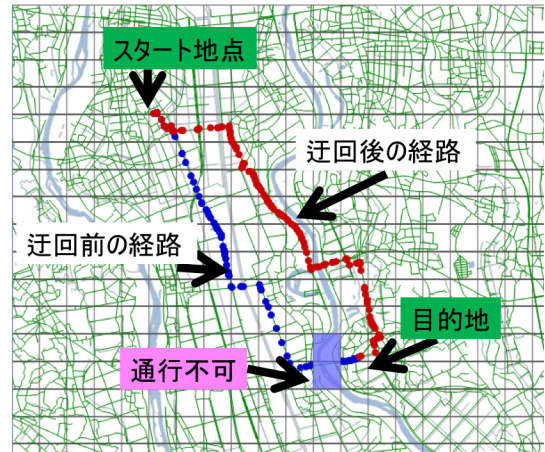


図 9 経路計算結果

Fig. 9 Route calculation result.



図 10 スマートフォンでの経路検索結果 (左: 経路検索に成功した例, 右: 通信障害の発生で経路検索が行えなかった例)

Fig. 10 Smartphone screen (left: search result, right: under communication failure).

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 9 中の赤色の点に示される迂回ルートを返す.

図 10 左に移動者エージェントの保持するスマートフォンに表示される避難経路の例を示す. 避難シミュレーション上に存在するエージェントが避難経路の検索を行うごとに, 経路計算が実施され, 各エージェントのスマートフォンに避難経路が提示される. 移動者エージェントの現在位置が, 停電発生など通信障害が発生しているエリアであった場合, 該当エージェントのスマートフォンからは経路検索が実行できず, 図 10 右のような画面が表示される. この場合, 移動者エージェントは浸水の発生した道路を知ることができず, 最短経路で避難所まで移動しようとする.

4.5 予測困難な事象の入力

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

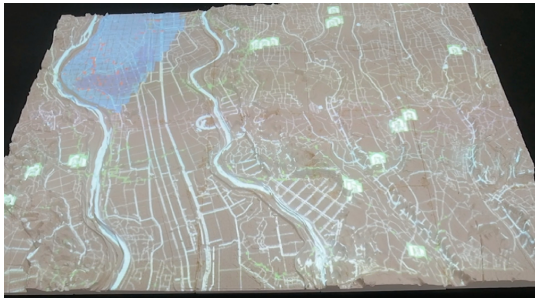


図 11 ジオラマ上への表示
Fig. 11 Visualization of ARIA result.

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、その被害に鑑み、最適な避難タイミングを算出できるよう、システム内に被害データを入力する機能を構築した。入力するデータは、通報や水防団、自治体による見廻りなどで判明する情報を前提としている。

入力インターフェースとして、マークを利用した入力と PC を利用したデータ入力の 2 種類を構築した。マークを利用した入力は、自治体での利用を考慮し、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、ジオラマ上へ表示し、そのジオラマの被害発生箇所にマークを置くことで被害データを入力できる機能である。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 11 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。移動エージェントや浸水グリッド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。

さらに、QR コードで作成したマークを作成し、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別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。本プロトタイプでは、被害データとして、内水氾濫、停電を設定した。図 12 は、ジオラマ上に設置したマーク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、マークが設置された位置を検出する。たとえば、マークが通信途絶を示す場合、マークを設置した位置を含む、周囲のグリッド ID が、スマートフォンエミュレータに送信される。該当のグリッドは、通信不可となった基地局のカバーエリアを示し

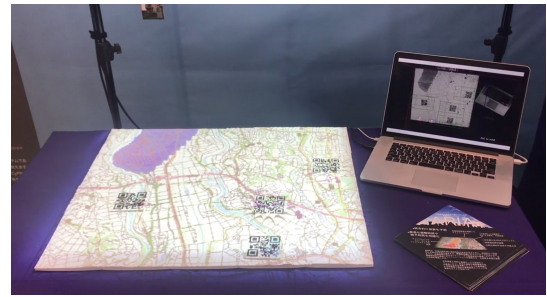


図 12 マークを用いたデータ入力
Fig. 12 Data input using QR marker.

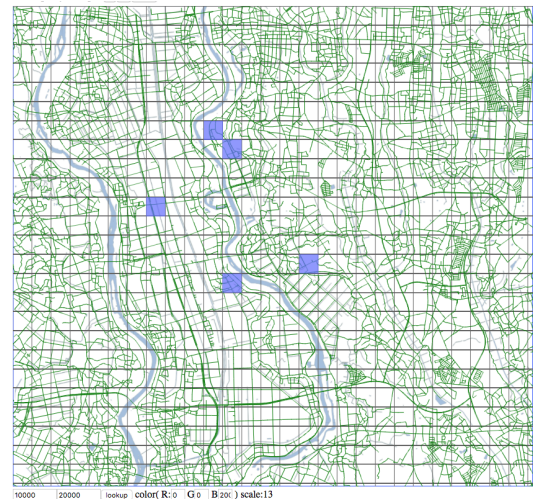


図 13 PC を用いたデータ入力
Fig. 13 Data input using PC.

ている。スマートフォンエミュレータはこの範囲内にいる移動者エージェントに対して、通信を不可とする。該当のエージェントは避難情報の受信および避難経路の検索を行うことができない。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。

また、PC を用いた入力インターフェースは、図 13 に示すように、ブラウザ上に地図を表示し、被害発生箇所をクリックすることで、システム内に内水氾濫、停電の情報を入力する機能である。

5. プロトタイプの性能調査

作成したプロトタイプについて、性能調査として予測時間および出力結果の調査を行う。開発したプロトタイプで利用した常総市について、平成 27 年 9 月関東・東北豪雨当時の人の移動や浸水の時系列データは一部を除いて観測されていないため、プロトタイプで算出される被害量の精度や正確性についての評価は難しい。そこで本論文では、提案した ARIA について、目的とする即時計算が実施でき、またその予測結果について現実に発生しうる事象と照らし合わせ妥当な結果が出力されるか確認することとした。性

能調査は以下の4項目について行った。

(1) 氾濫解析シミュレーションの高速化

ARIAでは、従来計算時間がかかっていた氾濫解析シミュレーションをシナリオ化し、実観測データと比較することで最適なシナリオを選定することで、氾濫解析の高速化を図っている。(1)では既存の氾濫解析シミュレータの結果と比較し、本手法による高速化の効果を確認する。また、計算時間はシナリオの数や観測データの数に依存すると考えられるため、これらの値を増加させた際の計算時間についても考察を行う。ただし、他のシミュレータの動作時間の影響を除外するため、比較は既存氾濫解析シミュレータと、本システムのシナリオ選定の機能を単体で動作させた際の計算時間とする。

(2) 移動者エージェント数と予測時間

ARIAは水害の発生が予測されてから、実観測データや予測データを利用した、リアルタイムでの被害予測を前提としている。また、被害予測は、避難情報発表タイミングなどのパラメータを変更して数回実施するため、できるだけ短時間での実行が望ましい。そのため、(2)では開発したプロトタイプを用いてリアルタイムでの被害予測が可能であるか、避難シミュレータ内の移動者エージェント数と被害予測時間を調べる。

(3) 避難情報提供による被害量削減

ARIAでは、連携基盤で出力結果を相互に利用することにより、避難シミュレータ内の移動者エージェントが避難情報の受信/避難経路の検索サービスを提供するスマートフォンエミュレータを利用する。(3)では、この機能を利用して避難情報の発表タイミングを変更し、被害量との関係を調べる。実際の水害時には、避難情報が早期に発表され、避難開始が早いほど、被害に遭遇する確率は低くなると考えられ、ARIAでも避難情報の発表タイミングが早期であれば、避難困難となる移動者エージェント数が減少するか、確認する。

(4) 通信障害と被害量の増加

ARIAのスマートフォンエミュレータは、移動者エージェントが避難経路を検索する際、道路冠水シミュレータの結果を取り入れ、最もコストの小さい経路を選択し安全な避難経路として提示する。一方で、通信障害の発生したエリアにいる移動者エージェントは、スマートフォンから避難経路を検索することができず、最短経路での避難所までの移動を行う。氾濫発生後には通信障害により、安全な避難経路を検索できない移動者エージェントが多いほど被害量は大きくなると考えられ、(4)では、この通信障害による影響を鑑みた被害予測が実施できているか確認する。

5.1 (1) 氾濫解析シミュレーションの高速化

はじめに、既存の氾濫解析シミュレータとしてNILIM2.0を用いて、対象地域の2015年9月10日00:00から20:00

表2 (1) 既存の氾濫解析シミュレータとの比較

Table 2 (1) Processing time of flood analysis simulator.

	計算時間 (秒)
従来	358,182.64
提案手法	105.60

までの氾濫解析を実施し、その計算時間を計測する。解析は対象地域を10メートル格子のグリッドに分割し、10分ごとの各グリッドへの氾濫流の流入、流出および水位を算出することで行った。次に、NILIM2.0を用いて降水量を変化させた際のシナリオを100通り作成し、降水量および河川水位の観測データと比較してシナリオを1つ選定する際の計算時間を計測した。比較には1カ所の降水量の観測地点、3カ所の河川水位の観測地点の合計4カ所の観測データを利用し、2015年9月10日00:00からシミュレーション上の時間において10分ごとに合計120回実施することとした。

算出した計算時間結果を表2に示す。既存の氾濫解析シミュレータでは算出までに358,182.64秒を要したが、本システムの手法では105.60秒ですべての計算が完了し、大幅な時間短縮を確認することができた。これは本システムでは、従来の氾濫解析シミュレータで計算時間を増大させる理由であった連続方程式、運動方程式の計算の処理を行わないことによる。

さらに、計算時間はシナリオの数や観測データの数に依存すると考えられるため、一方の数を固定し、これらの値を増加させた際の計算時間を算出したところ、シナリオ、観測点ともに数が増えるほど計算時間は線形増加した。計算時間が15分以内となったシナリオ数、観測点数を確認したところ、それぞれ850個(計算時間894.50秒)、40個(計算時間878.86秒)だった。シナリオについては、多様であるほど、選択肢が増え、実際に見合った氾濫解析結果を選定できる可能性が高いと考えられるが、15分以内に1回の予測を終えるためには、850通り程度のシナリオ数にすることが望ましいことが分かった。

また、観測点の数についても同様に、数が多いほど実際の氾濫結果と氾濫解析結果の値が近くなる地点が増えると考えられる。将来的に観測点が増加した場合であっても、40地点までのデータの利用で15分以内での予測に十分対応できる計算時間となることが分かった。

5.2 (2) 移動者エージェント数と予測時間

ARIAのプロトタイプを利用して、避難シミュレータ内の移動者エージェント数を500, 1,000, 2,000, 3,000, 4,000, 5,000, 6,000, 7,000, 8,000名の9通りに変更し、それぞれの移動者エージェント数における被害予測を実行した。被害予測はそれぞれ10回ずつ行い、予測完了までの時間、避難を完了した移動者エージェント数(避難完了

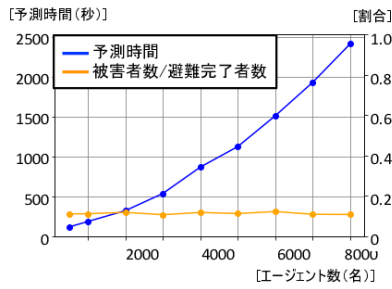


図 14 (2) 移動者エージェント数と予測時間

Fig. 14 (2) The number of evacuee agent and processing time.

数), 避難困難となった移動者エージェント数 (被害者数) を出力した. 被害予測は洪水が発生した 12:50 から 5 分を 1 ステップとして, 150 ステップまで実行し, 氾濫発生から 20 分後に避難情報が発表される設定とした.

それぞれの移動者エージェント数における予測時間の平均値を図 14 に示す. 移動者エージェント数が 4,000 名であるとき, 1 回の予測にかかる時間は 15 分程度であり, 実観測データを利用したりリアルタイムでの予測が可能であることが分かった. 予測時間は移動者エージェントが増加するほど多くなり, エージェント数が 8,000 名になると 1 回の予測に 40 分以上かかることが分かった. 短時間強雨などの発生が予見されてから ARIA で被害予測を行うためには, 多くとも数十分の猶予時間しかないため, エージェント数が多い場合, パラメータを変更して被害予測を複数回実行することは難しいことが分かる. そのため, ARIA での移動者エージェント数は 4,000 名程度であれば, 目的とする被害予測が行えることが分かった.

移動者エージェント数と予測時間の関係は ARIA に連携する避難シミュレータの性能およびシミュレータを動作させるサーバの処理性能に依存する. 本論文では, 汎用的なシミュレータを用いて避難シミュレータを開発したが, 避難シミュレーションを高速化することで, 即時処理が可能な移動者エージェント数が増加し, より広範囲な地域や人口密集地での被害予測が可能になると考えている. また, ARIA は自治体や企業での活用を考慮とし, 汎用的なサーバの使用を前提としているため, 導入コストを考慮し, 処理に使用する機器を選定する必要がある.

一方で, 避難を完了した移動者エージェント数, 避難困難となった移動者エージェント数の割合は, 移動者エージェント数が増加してもあまり変化がみられなかった. そのため, 猶予時間が少ない水害の場合は, 人口分布に応じて移動者エージェント数を実際の対象地域の人口よりも少なく設定することで, 猶予時間内に目的とする被害予測を実行できる可能性がある.

5.3 (3) 避難情報提供による被害量削減

次に, 避難情報の提供タイミングを氾濫発生 10 分前, 氾

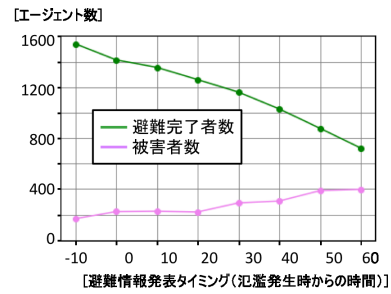


図 15 (3) 避難情報提供による被害量削減

Fig. 15 (3) Damage amount according to evacuation advisory timing.

濫発生直後, 氾濫発生 10 分後, 20 分後, 30 分後, 40 分後, 50 分後, 60 分後の 8 通りに変更し, 被害予測を実行した. 被害予測は (1) と同様にそれぞれ 10 回ずつ行い, 避難を完了した移動者エージェント数, 避難困難となった移動者エージェント数を出力した. 移動者エージェント数は 2,000 名として設定している.

それぞれの避難情報提供タイミングにおける避難を完了した移動者エージェント数, 避難困難となった移動者エージェント数の平均値を図 15 に示す. 避難を完了した移動者エージェント数は発表時間が遅いほど減り, 避難困難となった移動者エージェント数は発表時間が早いほど増える. 実際の水害時の事象として, 早期に避難所への移動を行うことで, 道路での冠水発生が少なく, 避難困難となる可能性の低いことが考えられ, 図 15 の結果はこの事象に見合った結果であったと考えられる. そのため, 提案した ARIA での予測結果は, 現実起こりうる事象と同様の結果となったことが確認できた.

5.4 (4) 通信障害と被害量の増加

さらに, 通信障害の発生したエリアの面積を 0, 20, 40, 60 km², 避難情報の提供タイミングを氾濫発生直後, 30 分後, 60 分後とした場合の 12 通りに変更し, 被害予測を実行した. それぞれ 10 回ずつの予測を行い, (3) と同様に避難を完了した移動者エージェント数, 避難困難となった移動者エージェント数を出力した. 移動者エージェント数は 2,000 名として氾濫発生から 20 分後に避難情報が発表される設定とした.

それぞれの通信障害面積における避難を完了した移動者エージェント数, 避難困難となった移動者エージェント数の平均値を図 16 に示す. 氾濫発生直後の避難情報発表である図 16(a) では, 避難完了数, 被害者数ともに停電面積での違いはほとんどみられなかった. これは, 道路の冠水が拡大する前に, 避難経路を移動して避難所に移動できるためと考えられる. 氾濫発生 30 分後に避難情報が発表された図 16(b) では, 図 16(a) と比較して避難完了者数は減り, 被害者数が増加している. また, 停電面積が広くな

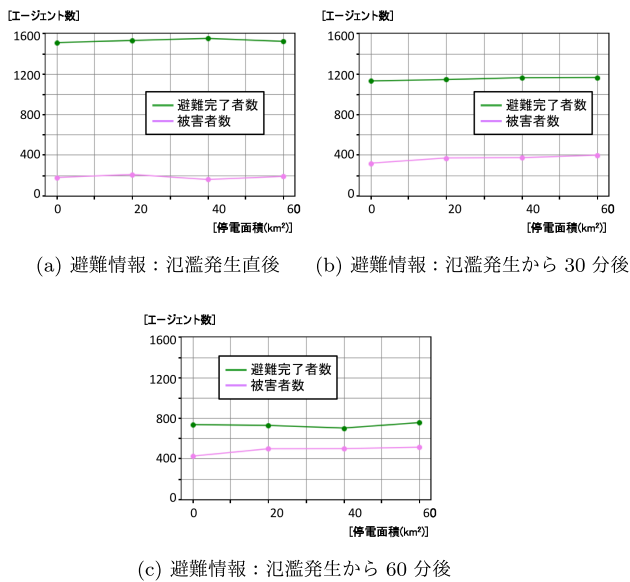


図 16 (4) 通信障害と被害量の増加

Fig. 16 (4) The relationship of advisory timing and damage amount.

るほど、被害者数が増加していることが分かる。さらに、氾濫発生 60 分後に避難情報が発表された図 16 (c) では、図 16 (a), 図 16 (b) と比較して、被害者数が増加し、避難完了者数が大きく減少している。これは、停電発生エリアの面積増加とともに、スマートフォンを使用できない移動者エージェント数が増え、避難情報の受信や安全な避難経路の検索ができず、氾濫が拡大したなかでの移動を行ったことによる。

実際に内水氾濫の発生事例では、市街地に氾濫が広がったのちに避難情報が発表され、避難困難となることがあり、こうした事例を ARIA で再現することができたと考えられる。以上から、通信障害の発生時においても、停電エリアの拡大とともに被害量が増加するという現実の水害時に起こりうる事象に鑑みた予測結果となったことが確認できた。

6. 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。氾濫解析や避難行動、通信環境に関する既存のシミュレーション・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、各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が難しい。提案する被害予測 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、通信エミュレータなどを連携動作させるとともに、既存の氾濫解析シミュレータの出力結果を用いて事前計算に

よる水害シナリオを選択することで、シミュレーションの実行時間を削減し、実時間で被害量を算出する。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。

連携基盤を用いてシミュレータ、エミュレータ間で出力データを相互利用を実現するシステム設計を行い、茨城県常総市を対象としたプロトタイプを構築した。構築したプロトタイプについて、予測時間および出力結果に関する性能調査を行った。避難シミュレータ上で移動する人数を変更し、予測時間を計測したところ、移動者エージェント 4,000 名までであれば 5 分程度での予測が実施でき、水害の発生が予見されてから猶予時間内に複数回の予測が実施可能であることが分かった。また、避難情報の受信の遅れや停電など被害に直結する事象を発生させたところ、事象の発生規模に応じて被害量が増加することが分かり、現実起こりうる被害を再現できる可能性があることが分かった。

氾濫解析シミュレータの高速化に関して、本論文では既存の氾濫解析シミュレータを利用し、水害シナリオを作成、選択するという手法にて高速化を図った。そのため、比較に用いた観測点の周囲においては従来の単一の氾濫解析結果より、精度が向上する可能性が高いが、観測点が増加した際の精度や観測点から離れた地域での水位変化の精度については検証する必要がある。また、予測時間については、避難完了数と被害者数の割合は移動者エージェント数に寄らないことも分かったものの、移動者エージェント数が多ければ多いほど、想定困難な被害を予測できる可能性があると考えられ、より多くの移動者エージェントを処理できる避難シミュレーションの開発が必要である。

既往水害の浸水時系列データや被災者の移動に関するデータは一部しか存在しないため、ARIA で出力される浸水結果や被害者数、避難完了数の正確性については評価が難しい。今後、これらのデータを収集し、氾濫解析シミュレーションや道路冠水シミュレーションなど個々のシミュレータの精度についても評価、改善していく必要がある。

また、本論文では特定の地域におけるプロトタイプを作成した。今後、本システムを多様な自治体、企業への展開していくためには、各自治体や企業が共通で使える機能と、自治体、企業ごとに設計、開発しなければならない機能を検討する必要がある。特に地図データの作成や観測データの収集など事前処理が必要な項目に対しては、簡易に実施できるしくみの開発やデータの一元化システムの活用などを考慮していく。

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. and 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. and 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. and 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. and 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. and 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. and 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. and 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*, Vol.6, No.4, pp.244 (2015).

[10] Dahmann J.S. and Morse K.L.: High Level Architecture for Simulation: An Update, *Proc. 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, *Proc. 38th Conference on Winter Simulation Winter Simulation Conference*, pp.486-492, IEEE (2006).

[12] Hwang, S., Starbuck, R., Lee, S., Choi, M., Lee, S. and Park, M.: High Level Architecture (HLA) Compliant Distributed Simulation Platform for Disaster Preparedness and Response in Facility Management, *Proc. 2016 Winter Simulation Conference*, pp.3365-3374, IEEE (2016).

[13] McLean, J.S.: A Framework for Modeling and Simulation for Emergency Response, *Proc. 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] 国土交通省国土技術政策総合研究所: NILIM 2.0, 入手先

(<http://www.nilim.go.jp/lab/rcg/newhp/seika.files/nilim/index.html>) (参照 2019-12-25).

[16] 構造計画研究所: artisoc, 入手先 (<http://mas.kke.co.jp/>) (参照 2019-12-25).

[17] OpenStreetMap, available from (<https://www.openstreetmap.org>) (accessed 2019-12-25)

[18] PostGIS, available from (<http://postgis.refractor.net/>) (accessed 2019-12-25)

[19] 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).

[20] 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, *ながれ*, Vol.37, pp.19-25 (2018).



廣井 慧 (正会員)

2004 年東北大学工学部電子工学専攻卒業。同年東日本電信電話株式会社入社。2011 年慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科修士課程修了。2014 年慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科博士 (メディアデザイン学)。同年名古屋大学未来社会創造機構特任助教を経て、2018 年より同大学工学研究科助教。災害情報通信、センサネットワークの研究に従事。



井上 朋哉

2003 年石川工業高等専門学校専攻科電子機械工学専攻修了。同年株式会社 PFU に入社。2006 年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。2009 年株式会社 Clwit 勤務。2012 年同研究科博士後期課程修了。高信頼ネットワークイノベーションセンター研究員 2016 年より情報通信研究機構に勤務。分散ネットワークソフトウェアに関する研究開発に従事。博士 (情報科学)。



明石 邦夫

2008 年大阪電気通信大学通信工学科修了。2010 年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。2017 年同大学院情報科学研究科博士後期課程修了。博士 (情報科学)。2017 年より情報通信研究機構有期研究員。ネットワークテストベッドの研究に従事。



廣中 颯

2018年国立徳山工業高等専門学校専攻科情報電子工学専攻修了。2020年北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科博士前期課程修了見込み。ネットワーク障害解決支援ツールの研究に従事。



菅野 洋信

2018年筑波大学理工学群物理学類卒業。同年北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科先端科学技術専攻博士前期課程に在学。学士(理学)。現在はコンテナ型仮想化技術の活用方法について研究。



湯村 翼 (正会員)

2006年北海道大学理学部卒業。2008年東京大学大学院理学系研究科修士課程修了。株式会社東芝、クウジツ株式会社、明治大学での勤務を経て2015年情報通信研究機構有期技術員。2016年同機構研究員。2017年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士課程単位取得満期退学。博士(情報科学)。ユビキタスコンピューティングシステムの研究に従事。ACM, 電子情報通信学会各会員。



宮地 利幸

2007年北陸先端科学技術大学院大学博士後期課程修了。2007年情報通信研究機構北陸リサーチセンター研究員。2013年情報通信研究機構テストベッド研究開発運用室副室長。ネットワーク技術の検証、特にStarBEDを用いた実証環境の構築、ネットワーク実験のモデリング、シミュレータとエミュレータの連携に関する研究に従事。博士(情報科学)。



篠田 陽一

1988年東京工業大学助手。北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授を経て、同大学院大学教授として現在に至る。2006年情報通信研究機構情報通信セキュリティ研究センター長(兼務)。2007年より内閣官房情報セキュリティセンター補佐官(兼務)。博士(工学)。情報環境、ネットワーク分散情報システム、ソフトウェア開発環境に従事。