

Communication に特化した洪水・避難シミュレータの構築

Development of flood and evacuation simulator for risk communication

熊本大学大学院自然科学研究科社会環境工学専攻 博士課程前期 2 年 竹下史朗

Key Words: *evacuation simulator, flood analysis, laser profiler data, multi agent model, risk communication*

1. 序 論

近年、計画規模以上かつ局所的な集中豪雨によって、都市部において河川の疎通能力を上回る規模の洪水が発生し、溢水・破堤に至って人的・物的被害が発生した事例が報告されている¹。このような状況のもと、国民の防災に対する関心が高まってきており、「自助・共助」と言われる言葉がよく使用されるようになってきた。このことは、災害を経験した住民の意識が行政によるハード対策のみに頼るのではなく、自分の身は自分で守るという意識に変化しているものと思われる。これまで行政主導型で重点的に行われ、かつ完成までに多大な費用と時間を要する治水施設の整備などのハード面の対策だけに頼るのではなく、地域住民の防災に対しての「自助・共助」の意識を高め、さらには行政と協調した「公助」を促すソフト面での整備を進め、地域防災力の向上と被害最小化を目指すことが重要である。

ソフト対策の代表例として、洪水ハザードマップの整備と公表が挙げられる。これまでに、豪雨災害時の住民避難の迅速化・円滑化や防災行政に対して洪水ハザードマップの有効性が示されているが、水害リスクに対する住民理解の面で問題点も指摘されている²。

このような水害対策の現状の中、水害を単に自然現象として捉えるのではなく、人間社会の中で発生する社会経済現象として捉え、水害リスクマネジメントとして防災・減災計画を取り扱う新たな手法が提案されている。実際に地域コミュニティの防災・減災計画に水害リスクマネジメントを反映させていくためには、地域住民の合意形成を図ることが重要となる。近年、その有効な手段としてワークショップ形式のリスクコミュニケーションの活用が注目されている。このリスクコミュニケーションにおいては、専門知識の乏しい住民に対して水害リスクを現実起こりうるものとして具体的にイメージさせることが鍵である。

本研究室では、濫解析結果とマルチエージェントモデルを用いた避難行動シミュレーションを重ね合わせた洪水・避難シミュレータを構築し、洪水からの避難という複雑な人間行動を再現した³。しかし、実際にワークショップ等で利用していくためには、汎用性の向上とさらなる表現機能の拡充が求められる。

本研究では、この洪水・避難シミュレータに対して、水害リスクコミュニケーションを支援していくツールとしてどうあるべきかという視点から分析を行い、基本的な要件を整理する。そしてその結果を踏まえ、シミュレータに必要な空間データの構築から、多様な利用目的に対応する表現機能まで一貫した運用に念頭を置いたシミュレータシステムを提案する。

2. 水害リスクコミュニケーション

2.1 水害リスクマネジメント

リスクマネジメントとは、広義的には、災害リスクそのものを減少させるリスクコントロールと、災害により生じた被害を社会全体に分散させるリスクファイナンスから構成される。災害対策に対する投資は、災害の生起確率や被害額を減少させるリスクコントロールとして位置づけられる。この概念を水害に対して適応させたものが、水害リスクマネジメントである。これまでのように水害を単なる自然現象として捉えるのではなく、人間社会の中で発生する社会リスク現象として捉え、防災・減災計画を取り扱う新たな手法が提案されている。

水害リスクマネジメントを地域コミュニティの防災・減災計画に反映してゆくためには、行政、専門家、市民の役割を明らかにし、そのための意識共有や強力関係づくりの方策として、各主体がともに水害リスクについて意見や情報を交換し、共有し合うリスクコミュニケーションが必要不可欠となってくる。しかし、行政や専門家が持つ水害リスクに関する情報は、水害の生起確率や氾濫形態や避難の可能性、人的・物的被災状況予測など、膨大なデータ量となり、これらの情報の伝達は必ずしも容易ではない。行政と住民と専門家の間で、水害リスクに関して相互にコミュニケーションを繰り返し行うための「場」、そして水害リスク情報を住民に伝えるための「ツール」が重要であると考えられる。

2.2 洪水ハザードマップ

従来の水害リスクコミュニケーションの代表例として、洪水ハザードマップの公表・活用が挙げられる。洪水ハザードマップは、洪水発生時に想定される被害や避難の情報を地図上にまとめたものであり、平成20年9月30日未現在、全国874市町村において作成・公表されている⁴⁾。これまでに、豪雨災害時の住民避難の迅速化・円滑化や防災行政に対して洪水ハザードマップの有効性が示されているが²⁾、水害リスクに対する住民理解の面で問題点も指摘されている⁵⁾。以下にその問題点を示す。

- ① 配布しても紛失してしまう住民が多い
- ② 示される情報が洪水災害のイメージを固定化してしまう
- ③ 水害リスクの評価指標が浸水深に限られてしまう

一般的な洪水ハザードマップは、紙の地図に予想浸水深がその区分に対応した色で表示されているだけで、地上の建物や微地形等の土地利用形態が十分に考慮されていないため、洪水氾濫状況（氾濫水の移動速度や移動方向等）を表示することは難しい（図-1）。静的で限られた情報しか提供できない洪水ハザードマップではどうしても上記の問題は拭えない。さらに、リスクコミュニケーションのツールとしての機能を満たしきれていない従来の洪水ハザードマップを配布しただけでは、住民との水害リスクコミュニケーションが成り立っているとは言い難い。

重要なことは、洪水ハザードマップは、単なる一つの被災シナリオに過ぎず、これを越える洪水氾濫が生じ得ることを理解し、そしてその事態において自分が被害に遭わないための方法を住民自らが考える態度を身につけるための多くの情報を与えることである。そのためにも、洪水ハザードマップは作成する過程から住民が参加して、洪水氾濫が発生したときに、どのような行動を取れば住民の命を守ることができるかを議論しながら行政・専門家と住民の水害リスクコミュニケーションを支援するためのツールとして活用されることが望まれる。

2.3 水害リスクコミュニケーションの実践とニーズ

山田らは、熊本市壺川校区を対象としてワークショップや想定浸水シナリオを用いた避難行動実験などを水害リスクコミュニケーションの一環として実施している⁶⁾。水害リスクコミュニケーションをマネジメントサイクルのひとつであるPDCAサイクルとして捉え、ケーススタディとして2006年から継続的に研究を進めている（表-1）。この研究を例として、ワークショップにおけるリスクコミュニケーションの目的とそのニーズについて分析する。

表-1 水害リスクコミュニケーションの内容と参加者数

回	実施時期 場所	検討内容	参加者			
			住民	行政	NPO	大学関係
1	2006年1月24日 壺川公民館	・白川洪水ハザードマップの見方 ・校区オリジナルの防災・避難経路マップの作成	33	1	1	14
2	2006年2月26日 壺川コミュニティセンター	・大学が実施した壺川校区内の詳細氾濫解析シミュレーション結果の説明 ・校区オリジナルの防災・避難経路マップの修正・追加	34	2	1	19
3	2006年6月4日 壺川コミュニティセンター	・想定氾濫シナリオを用いた災害图上避難訓練の実施（内水・洪水氾濫）	35	4	1	30

第1回のワークショップでは、図-1の白川洪水ハザードマップを用いて、見方を説明するとともに、地域が持つ水害リスクに関する基礎知識を深めて頂いた。また、居住区域別にグループ分けし、オリジナルの防災・避難経路マップを作成した。各々の住民の住居と現時点で考える避難場所と避難経路を記し、さらに普段住民が危険に感じている箇所を地図上に再現した。この段階では、広域な視点から地理的条件と水害の関係を示す情報を提供し、それらを踏まえて、居住地域の現状の確認と地域内住民間での危険箇所等の情報共有が目的となる。

第2回のワークショップにおいては、大学側で作成した氾濫シミュレーションを用いて、水害リスク情報を地域に落とし込む形をとった。近年の異常気象を鑑みて、既往降水量や基本高水流量を大きく超える条件で計算を行い、地域にとって起こり得る水害の可能性として認識して頂いた。そして氾濫水の挙動を確認した後、前回作成した防災・避難経路マップの再検討を行った。ここでは、氾濫解析結果では示すことのできない、地域の特徴的地形から現れる危険箇所が地元住民の指摘により判明した。洪水ハザードマップではカバーできない地域の実情を反映した詳細氾濫解析結果であることに加え、時間変化に伴う氾濫水の挙動を表現したことで、水害に対する具体的なイメージを持た

せたことが、議論を活発化し新たなリスクの発見をもたらしたといえる。

第3回のワークショップでは、壺川校区における氾濫想定シナリオを作成し、これまでのワークショップを通して作成した水害避難経路マップを使用した災害頭上訓練（DIG：Disaster Imagination Game）を実施した。ファイシリテーターが進行をつとめ、シナリオを読み上げながら、それに応じた住民の意見や行動パターンを記録した。参加者は刻々と変化する水害状況に対して、地図を囲んで議論し合いながら、住民各自の判断を加えた避難行動を仮想体験する。住民に与えられる想定シナリオは、氾濫水の空間的・時間的な変化だけではなく、降雨の状況から河川の水位、冠水地点の位置、さらに行政からの避難勧告等の、住民の判断を喚起する情報である。



図-2 ワークショップの様子

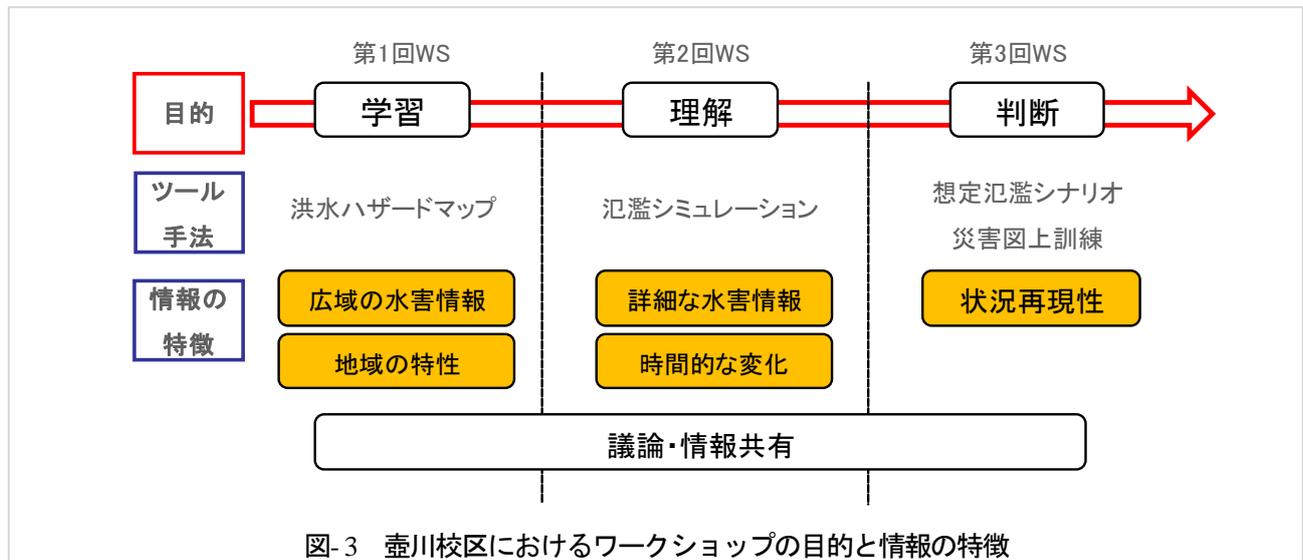


図-3 壺川校区におけるワークショップの目的と情報の特徴

2.4 リスクコミュニケーションツールとしての避難シミュレーション

水害リスクコミュニケーションには、住民と行政、NPOや大学等の複数の主体が関わっている。しかし水害リスクコミュニケーションを通して、実際に「行動」を起こし地域防災力の向上に関与していくのは、各住民と地域コミュニティ、行政の3者である。その「行動」とはすなわち自助（各住民）、共助（地域コミュニティ）、公助（行政）である。したがって、ワークショップという「場」においては、ひとつのテーマで議論が進むとしても、それぞれの視点で見ると、そこから起こすべき行動は異なってくる。このような状況において、リスクコミュニケーションに用いられるツールの役割が重要である。

筆者らは、氾濫解析結果とマルチエージェントモデルを用いた避難行動シミュレーションを重ね合わせた洪水・避難シミュレータを開発した。しかしリスクコミュニケーションツールとして利用するためには、汎用性と表現機能の向上が課題となっている³⁾。また利用方法に関する検討も必要である。

本節では、シミュレータがリスクコミュニケーションにおいて多目的な利用が可能なツールとなるために、避難シミュレーションに関する先行研究を併せて例に挙げまとめる。それぞれのユーザの視点に立ち、シミュレータに求められる要件を分析する。

① 共助（協力）

ワークショップとは、一方的な情報伝達の間ではなく、参加者が自ら体験し、問題に関して議論しあう場である。地域に潜む水害リスクに関する情報を共有し、協力体制を構築することが目的である。具体的には、避難計画の検討、避難所の配置検討、危険箇所の確認、要援護者の把握等が挙げられる。シミュレータに求められることは、これらの課題について考え、議論を活性化するための仮想体験であり、洪水避難における多様な状況の再現性が重要である。実際にこのようなワークショップで避難シミュレータを用いた研究例は少ない。

② 公助（改善）

ソフト対策による減災がキーワードとなっている昨今であるが、堤防の改修等のような大きなハード対策ではなく、

避難道路網の整備といった比較的小さな対策によって被害の軽減が見込める可能性もある。このようなハード対策を目的とした先行研究例として、野澤らが構築した津波避難シミュレーションがあるが、市街地における防災整備効果について、整備に関するケース設定を行った上で避難行動を予測している⁷⁾。一人一人の避難行動を把握するというより、道路の寸断や追加などネットワークに対する変化が、住民の避難完了時間や被害率等にどう影響するかということ定量的に評価することとなる。つまり、避難行動解析による結果が、インフラ整備の効果として示される。また、対象地の建築物の情報など、多面的な要素を含めた空間解析結果を外力要素として利用するなど、行政がもつ多様な情報の追加が考えられ、GIS のような解析機能に重点が置かれる。

③ 自助 (学習)

自助においては、「自分の身は自分で守る」という意識のもと、各人が水害リスクと向き合い、防災学習を進めることがその第一歩である。シミュレータが自助支援ツールとなる場合、そのユーザは各住民であり、より個人の視点から水害リスクと向き合うことになる。求められるのは、地域全体の住民の避難完了時間予測等ではなく、自宅からどのくらいで避難できるのか、どの経路で避難すれば被害にあわなくて済むのかといった、各人のための避難行動解析機能である。このような機能に特化させた先行研究の例として、畑山らの参加者個別ハザードマップ作成システムがある⁸⁾。これは避難行動の規範を一方向的に示すのではなく、住民が自ら初期位置や目的地、避難経路などを自由に設定し、様々なパターンの避難行動を試行することが可能である。

3. シミュレータシステムに関する提案

本章では、2章で行ったシミュレータの分析をふまえ、3次元地形情報を基盤とした洪水・避難シミュレータシステム (Flood and Evacuation Simulator System using 3D spatial data : 以下、FESS) を提案する。

3.1 概要

FESS は避難シミュレーションに必要となる空間モデルの構築から、実利用における多様な表現機能までトータルな運用を目指したシミュレータシステムである。FESS は以下の4つのブロックから構成される (エラー! 参照元が見つかりません。)

- ① **地形解析ブロック** : 解析の基盤となる3次元空間データを構築する。
- ② **氾濫解析ブロック** : 3次元空間データを用いて、氾濫解析のための解析モデルを構築する。
- ③ **避難解析ブロック** : マルチエージェントモデルを用いて、住民の避難行動をシミュレーションする。
- ④ **表現機能ブロック** : 避難解析のパラメータ設定や解析結果を可視化して表示する。

避難シミュレーションに必要となる対象地域の基礎的なデータ (人口分布、建築物情報等) は数値情報である。しかし、それらを空間モデルに反映させるには、位置情報と併せて表示したほうが分かりやすい。また市町村によっては、それらのデータはGIS データとして管理されていることも考えられる。本研究では、シミュレーションのインターフェースとして、GIS の利用も視野に入れているため、空間モデルの管理にはGIS と連携しやすいCAD データを採用する。したがって、CAD で構築した3次元空間データに、CAD のデータベース接続機能を用いて、浸水情報や住民の配置等に関するデータベースを連携させ、空間モデルを運用していく (図-4)。

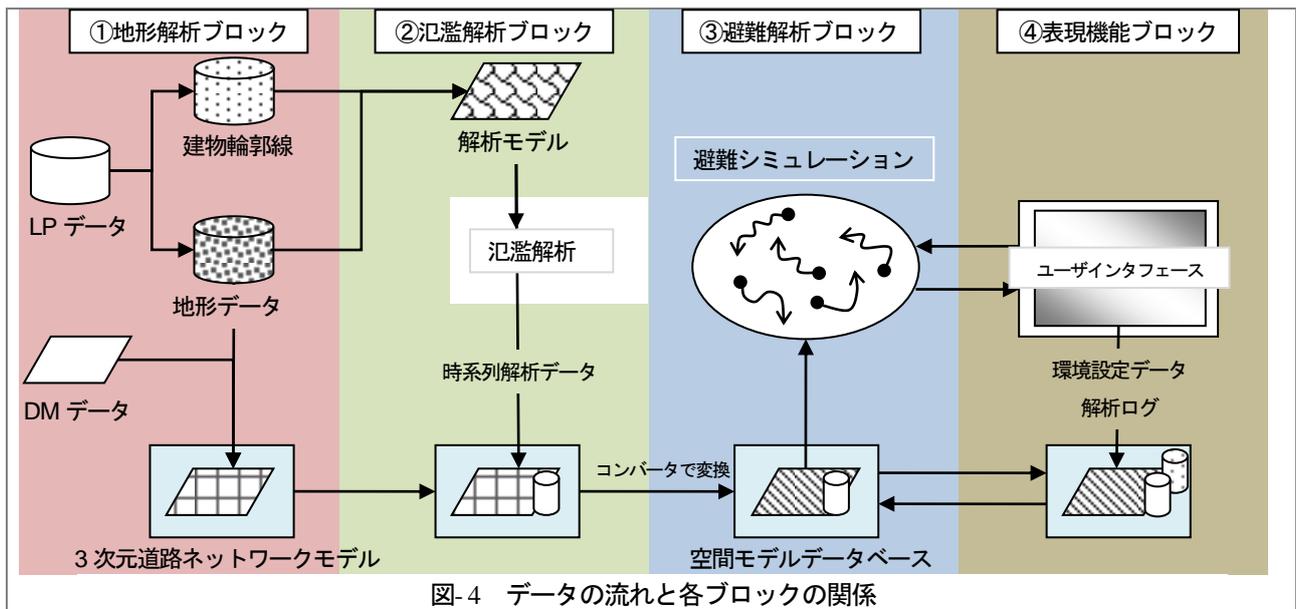


図-4 データの流れと各ブロックの関係

本研究の価値は、シミュレータを構築する側である行政または専門家に対するシミュレータ構築支援機能(①と②)と、実際に利用するユーザの利用目的に焦点を当てた表現機能を実装することによる多目的利用機能(④)を含めたトータルなシステムとして提案することにある。次節から、各ブロックについて機能の詳細を述べる。

3.2 地形解析ブロック

解析の基盤となる3次元空間モデルの構築にあたり、航空レーザ測量によって得られるデータ(以下、LPデータ)を採用する。LPデータから地形部のデータを自動抽出し、3D-CADを用いて3次元地形モデルを作成する。さらに道路網データを組み合わせて、避難シミュレーションに用いる空間モデルを構築する。

(1) 3次元道路ネットワークモデルの作成

本研究室では、LPデータの利活用を目的として、その加工技術に関する研究を進めており、自動属性判別法を提案した⁹⁾。この自動属性判別法により取得した地形データから、避難解析用のネットワークモデルを作成する。避難シミュレーションの空間モデルは、2次元格子モデルが一般的であるが、屋外における避難の場合、3次元的な空間を考慮することが重要であるため、ノード(点)とリンク(線)から構成されるネットワークモデルを採用する。

① 道路ネットワークの作成

今回、3次元道路ネットワーク作成には、土木用3次元CADであるAutodesk Map3D 2008(Autodesk社、以下Map3D)を用いた。採用理由として、3次元データが扱えること、CADオブジェクトとデータベースとの連携機能が充実していること、GISの基盤データのオーサリングツールとして実績があること等が挙げられる。

道路網作成に関して、筆者らは、LPデータから自動で道路中心線を抽出する研究も進めているが¹⁰⁾、今回は、国土地理院が発刊している数値地図2500を利用した場合の手法を述べる。数値地図2500から読み込んだ道路ネットワークデータは、単なる点と線のデータではなく、ノードとリンクが相互に接続情報などのデータを保持したトポロジデータに変換される。さらに、Map3Dは道路ネットワークデータの編集機能を備えているため、新たなノードやリンクの追加、削除等も容易に行うことができる。

② ノード標高の付与

前節で述べた自動属性判別法を用いてLPデータから抽出した地形データをMap3Dに読み込み、自動でTIN(Triangle Irregular Network)データを作成する。TINデータと道路ネットワークデータを重ね合わせ、ノードのX、Y座標に位置するTINデータの標高値をノードのZ値として格納する。この作業はMap3D上で作動するアプリケーションを構築して自動入力とした。地形データや道路ネットワークの変更があっても、更新作業が少なくなるよう配慮した。

③ 追加データの付与

Map3Dにはオブジェクトデータという機能があり、CADオブジェクトに対し属性(プロパティ)を任意に追加できる。Map3Dで数値地図2500を読み込んだ場合、ノードやリンクに関連する情報はオブジェクトデータとしてCAD図面に保存される。今回はこれに加えて、ノードに対して河川までの距離(m)、境界フラグ、避難所フラグをオブジェクトデータとして追加した。

④ シミュレータ用データへの変換

Map3Dのクエリー機能を用いて、道路ネットワークデータに関するデータをCSVデータとして出力する。さらに

この CSV データを、シミュレータ用の空間モデルデータへと変換するためのアプリケーションを構築した。変換されたデータは、データベースに登録され、シミュレータが実行される時に必要なデータを読み込んでいる (図-5)。

3.3 氾濫解析ブロック

LP データに対して自動属性判別法を用いることで、道路ネットワークデータだけでなく、氾濫解析の解析モデルとしても利用できる¹¹⁾。共通の 3 次元地形情報を用いることで、空間データの整合性も向上し、データ作成コストも軽減可能である。本システムでは、自動属性判別法によって抽出した地形データと建物輪郭線データから、Map3D の TIN データ作成機能を用いてメッシュを作成する。

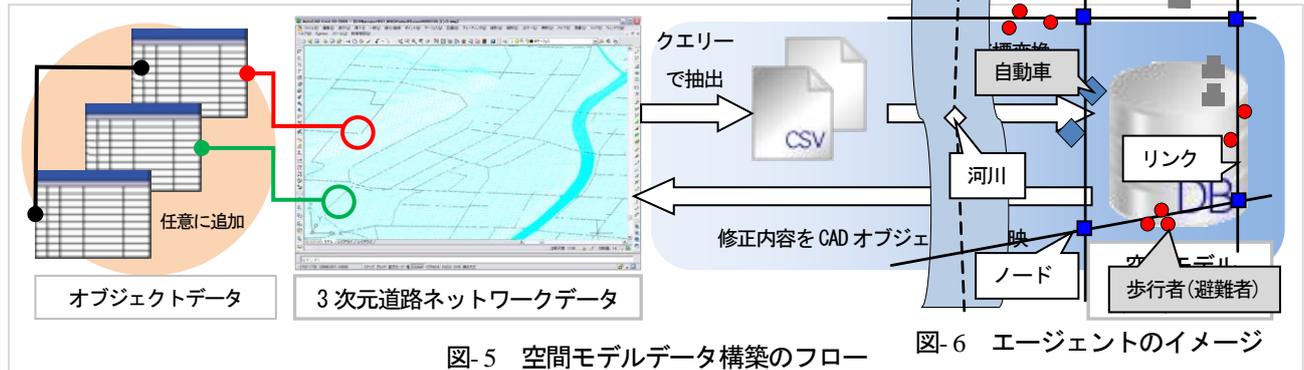


図-5 空間モデルデータ構築のフロー

表-2 エージェントの分類

静的エージェント	動のエージェント
ノード	歩行者
リンク	自動車
施設	
障害物	
河川	

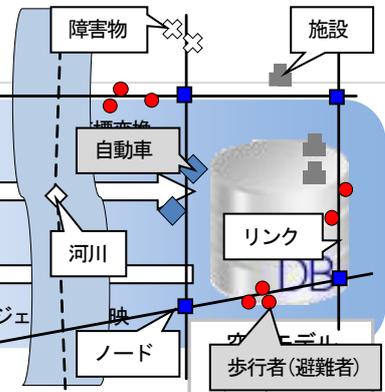


図-6 エージェントのイメージ

3.4 避難解析ブロック

避難解析ブロックでは、前節で述べた地形解析ブロックから得られた 3 次元道路ネットワークデータ、氾濫解析ブロックでの解析データを入力データとして、避難シミュレーションを行う。シミュレータエンジンとして、(株) 構造計画研究所のマルチエージェントシミュレータ (artisoc) を用いる。

また、対象地が広域で避難者が膨大になる都市部の場合、避難者数、道路ネットワークデータの数も比例してくる。artisoc の内部データベースにログを保存する機能が搭載されているが、道路ネットワークデータの検索やログの読み書き等を高速に行うためには、外部データベースに対応しておくことが重要である。本研究では、3.2 で述べたように、道路ネットワークデータや氾濫解析の時系列データ、シミュレーションのパラメータデータ等を外部データベースに保存し、実行時に必要なデータを読み込む方式をとった。

(1) マルチエージェントシミュレーション

エージェントとは「環境の状態を知覚し、行動を行うことによって環境に対して影響を与えることができる自律的主体」¹²⁾と定義される。そして、それぞれの内部属性に基づく行動決定の基準に従いシミュレーション上に存在するエージェントが、相互関係をもって集まった集合体を「マルチエージェント」という。また、ある与えられた環境の中でエージェントと呼ばれる主体が相互に関係しあって、全体として社会におけるような秩序を作り出すことをコンピュータの中で実行させようとしたものがマルチエージェントシミュレーション (以下、MAS) である。

MAS の特徴は、複雑な現象を複雑に再現しようとするものではなく、エージェントの行動する環境とエージェントがどのように行動するかについてのルールを設定することだけで、複雑な相互作用がコンピュータの中で創発的に展開し、その結果としてシステム全体の振る舞いが決定されていくというものである。さらに、この振る舞いは各エージェントの行動決定に影響を及ぼす。エージェントらはこのフィードバックから自らの行動を変化させていく。

また、MAS は従来のように確率的に個々がすべて同じ行動をとるものとし、ほかと異なる行動は誤差として捉える考え方に比べて、より簡単に、あるいはより実現象に近いシミュレーションを行うことができる。MAS の基本的な特性として以下の 4 項目が挙げられる。

- ① 自律性：エージェントは人間などの直接的介入なしに動作し、自身の行動や内部状態を制御できる。
- ② 社会性：何らかの言語を介して他のエージェントや人間と情報交換することができる。
- ③ 反応性：エージェントは自身が置かれた環境を認知し、その変化に対して適切に応答することができる。
- ④ 自発性：外部環境に対して単純な反応だけでなく、目標を持った自発的な行動を起こすことができる。

すなわち、MAS ではエージェント自身が環境を認知し、自律的に自分自身を環境に対応させるように変化し、加えて他のエージェントとも情報交換を行い、目標を達成するためによりよい行動を自分自身で計画し、実現することができるという特性を持っている。このように自律的に行動するエージェントは、人間の行動モデルとして用いることができるため、近年多くのシミュレーションで MAS が注目されている。

(2) 避難シミュレーションにおけるエージェントの整理

MAS を避難シミュレーションの手法として用いた場合のエージェントとして扱うべき対象の整理を行う。まず、対象範囲を移動する動的エージェントと、指定箇所に留まり、避難行動に影響を与える情報を発信する静的エージェントの2つに大別できる(表-2、図-6)。

① 動的エージェントの情報発信

既往研究では、動的エージェントとして住民、静的エージェントとしてノード(交差点)とリンク(道路)を採用した。住民エージェントは道路網の節であるノードから様々な情報を取得し、経路判断を繰り返していく。しかし、GPS 追跡結果との比較から、実際の避難経路の選択においては、住民同士の追従性が大きく影響を与えることが分かった。したがって、静的エージェントからの情報だけでなく、避難中の動的エージェント同士の情報交換も考慮する必要がある。

② 住民エージェントの分類

既往研究では、それぞれの住民エージェントには、年齢差による歩行速度の違いなどはランダムに与えたが、全体としては、同じ経路選択基準で避難する単一の住民エージェントである。例えば、都市部での利用を考えた場合、その地域に住んでいる住民であるのか、偶然その場に居合わせた市民(買い物客、観光客など)であるのかで避難行動は異なるを考える。したがって、住民エージェントに対し簡単な属性を与えることで、より複雑な状況を再現できる可能性がある。本研究では、避難中に変化し得る属性として、避難所認知の有無を取り入れる。さらに避難中に周囲の住民エージェントと情報交換を行い、任意の確率で自身の属性を変化させるアルゴリズムを構築する。

(3) 経路判断アルゴリズム

① 初期設定

避難者である住民エージェントは、シミュレーションが開始されると、図-7に示すアルゴリズムに従い行動する。避難所を認知している住民(以下、認知者)は、初期配置された位置から最短距離にある避難所を最終目的地として決定する。避難所を認知していない住民(以下、未認知者)に関しては、配置段階にはこの処理を行わず、避難中に認知した場合に再設定する。

避難開始時間になると、最も近いノードを最初の目標ノードとして選択し初期移動を開始する。初期移動により目標ノードに到着した住民エージェントは、経路選択を経て目標ノードを設定し移動を繰り返していく。

② 経路選択

目標ノードに到着した際、複数の経路から一つを選ぶ際の判断には、避難時の判断として最適とされる総合的判断の考えを用いた¹³⁾。以下に認知者エージェントの場合の判断項目を示す。

経路選択を行う際、各エージェントは各々の経路に対して以下の(i)~(iv)のチェックを行う。

- (i) 目的地に近づくか (+a)
- (ii) 川から遠ざかるか (+b)
- (iii) 標高が高くなるか (+c)
- (iv) 周囲 y (m) に避難者がいるか (+d)

条件を満たせば () 内のポイントを、以下の式を用いて加算する。

$$S_i = a + b + c + d \dots \quad (1) \quad i = 2, 3 \dots$$

全ての接続点について総合判断を行い、(1)式 S_i の値が最も高かった避難経路を、次に進む避難経路として選択していく。また、未認知者の場合、移動中に住民エージェントとコミュニケーションを図るアルゴリズムが加えられる。移動中に自身の周囲 A(m) に認知者がいた場合、伝達率 N(%) で、避難所の情報を取得し、認知者となるよう設定した。未認知者の場合は、(i) 以外の判断項目で評価するため、対象地の地形状況(標高差割合)、浸水状況、そして経路上に住民エージェントが存在するか、という項目で経路を選択することになる。住民同士の追従性を考え、未認知者の場合、追従性を認知者に比べ大きく設定した。このアルゴリズムの特徴は、総合判断式に用いる判断材料を容易に増減できることである。これにより、上記(i)~(iv)の他に、行き止まり情報などを付加することにより、エージェントの動きを操作することができる。また、ノード情報と住民エージェントの情報から経路選択を行うため、すべて内生的な判断で経路選択が決まることになる。したがって、他地域への応用が利き、「住民」エージェントの避難経路に関する意識もある程度が考慮できる。

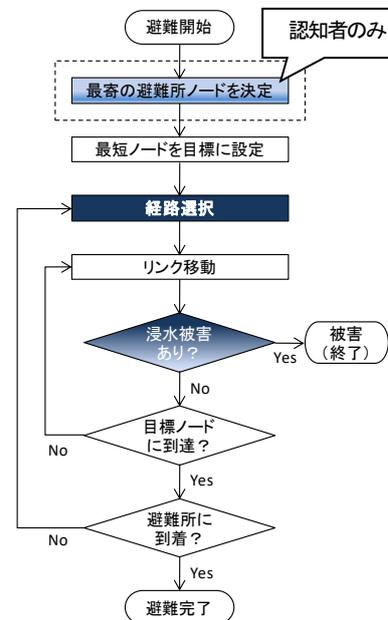


図-7 移動アルゴリズム

③ 浸水域の影響

避難中は、目標ノードが浸水しているかのチェックを行う。本研究では、浸水域からの影響として、2つのフェーズを設けた。フェーズ1は氾濫水の影響が生じ始める段階であり、そのノードを目標ノードとしている住民エージェントの歩行速度を減速させる。フェーズ2では、氾濫水により歩行が困難となる段階である。目標ノードがフェーズ2であると認識した時点で、その経路を通らないように目標ノードを変更する。現在ノードと目標ノードがフェーズ2であった場合、人的被害が発生したものとし、被害者としてカウントする。

3.5 表現機能ブロック

避難解析ブロックのシミュレータエンジンとして利用している *artisoc* は、シミュレーションのパラメータ設定を行うインターフェースのカスタマイズが容易に行える。*artisoc* をベースにして、水害リスクコミュニケーションにおける多様なニーズに応えるシミュレータとなるための表現機能の充実を図る。また、シミュレータ結果の二次利用、また Web 上での公開への展望を示す。図-8にシミュレーションのインターフェースを示す。

(1) パラメータ操作部の機能の詳細

パラメータ操作部から操作する機能は、シミュレーション実行前に行う①環境設定機能と、住民の避難行動自体に影響を与えるパラメータを変化させる②実行制御機能を設けた。

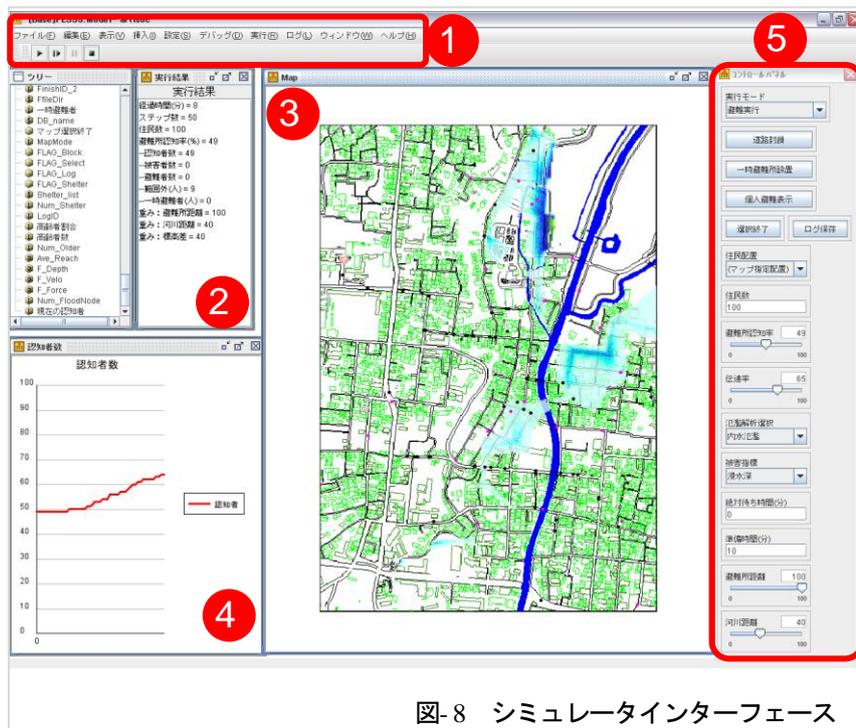


図-8 シミュレータインターフェース



図-9 一時避難所の選択

① 環境設定機能

a) 最短経路計算

道路ネットワークデータを読み込み、全ノード間の最短経路を算出し、データベースに保存する。算出手法には、道路長といった物理的距離だけでなく、時間距離やコスト等もファクターとして取り入れることができるダイクストラ法を用いている。本シミュレータでは、道路長のみ考慮し算出することとした。

b) 避難所配置

避難所の候補地がマップ上にアイコンとして表示され、その中から選択する避難所のアイコンをクリックすると、クリックした地点に最も近い一時避難所のIDがデータベースに保存される(図-9)。シミュレーション実行時に、一時避難所設置ボタンをオンにしておくと、各ノードに対して選択した一時避難所までの最短距離を格納する。本シミュレータでは、避難所の候補地となるノードIDを事前にデータベースに保存しておき、読み込むようにした。

c) 封鎖地点指定

道路ネットワークに対して、封鎖したい地点をクリックすると、その地点に最も近いノードのIDがデータベースに保存される(図-10)。その際、ダイアログが表示され、封鎖開始時間を指定することが可能である。指定した箇所にはアイコンを表示させ、封鎖した地点を確認しやすくなるよう配慮を加えた。シミュレーション実行時に、道路封鎖ボタンをオンにしておくと、ネットワークデータ読み込み時に、各ノードの接続ノードリストから、指定したノード

が削除される。

d) 住民配置

住民エージェントの初期配置について、準備された複数のパターンから選択する。道路ネットワークから判断する全ノード・端点ノード配置、ノードに付加された属性から判断する左岸・右岸配置、住民数のみ入力するランダム配置、任意地点をマップ上でクリックするマップ指定配置などのパターンを作成した。配置パターンを選択して実行すると、住民エージェントが生成、配置され、初期配置に関する情報がデータベースに保存される。またこの際、設定した避難所認知率が住民エージェントの属性として反映され、初期配置情報に追加される。

e) 避難経路選択

個人の初期位置と、経由地点、到達点を指定し避難経路を設定する。上記の機能と同様に、マップ上でクリックした地点のノード ID を取得して経路を設定する。最初にクリックした地点が初期位置となり、最後にクリックした地点が到達位置として保存され、その間は経由点が含まれる最短経路のノードが自動で選択される。シミュレーション実行時に、登録避難経路表示をオンにしておくと、d)で生成された住民エージェントと共に表示される (図- 11)。

② 実行制御機能

a) 氾濫解析情報選択

氾濫解析結果は、住民エージェントの経路判断に最も大きな影響を与える外力要素である。洪水ハザードマップの課題にも挙げられていたように、シミュレーション結果が災害イメージの固定化を招かないためにも、複数の氾濫シナリオを再現する機能は必須であろう。本研究では、氾濫シナリオや解析形態が異なる複数の氾濫解析結果を準備し、それぞれ浸水深、流速などを氾濫指標として選択し、外力要素を決定する。

b) 避難所認知率設定

住民配置時に住民エージェントに対して避難所認知の有無を属性として与えたが、スライダーの設定値を変化させ



図- 10 道路封鎖地点の指定



図- 11 避難経路の指定

ることで、シミュレーション前に属性を設定し直す機能を設けた。

c) 伝達率設定

住民エージェントは毎ステップ毎に周囲にいる別の住民エージェントと情報交換をする。伝達率とは、避難所認知者と未認知者が情報交換を行い、避難所に関する情報を未認知者が取得し認知者となる確率を意味する。情報を取得した住民エージェントは、避難所までの距離を経路判断に加えて避難を開始する。

d) 絶対待ち時間・準備時間設定

住民全員が自宅にいて、電話等の手段を用いて避難を指示するまでの時間を絶対待ち時間、そこから避難を開始するまでの時間を準備時間と定義する。絶対待ち時間は住民エージェントに一様に与え、準備時間は入力した時間までの乱数で与える。

e) 経路判断パラメータ設定

経路選択時の総合判断式の重みを 0 から 100 までの値で設定する。この値は、全ての住民エージェントに対し一様に与えられる。

(2) 3次元シミュレーション

artisoc には、シミュレーションのログを外部データベースに保存し、再生する機能が搭載されている。この機能を応用し、GoogleEarth 上でシミュレーション結果を再現する。GoogleEarth を利用する利点は、任意の視点から避難状況を 3 次元的に確認できるということである (図-12)。

データベースに保存された住民エージェントに関する情報(ステップ数、エージェント ID、X 座標、Y 座標、Z 座標、エージェント種別、属性)を読み込み、KML ファイルに変換する。この KML ファイルを GoogleEarth 上に公開しておくことで、シミュレーション結果を Web 上で再現することが可能である。また、GoogleEarth の衛星画像データは、適宜ローカル PC にキャッシュされるため、対象範囲のデータをキャッシュしておくことで、インターネットのない環境であっても利用できる。

(3) Web や GIS との連携

artisoc は Web サーバとして利用することもできる。Web ページ上に、図-8の⑤パラメータ操作部のようなフォームを配置し、ユーザが同じようにシミュレーションの実行設定を行い、それらの設定値を CGI (Common Gateway Interface) を用いて Web サーバである artisoc に渡してシミュレーション結果を Web 上に出力する。出力結果の表示はマップのキャプチャを任意のステップごとに自動作成し、その画像データを Web 上に動的に更新しながら表示する。ローカル PC 上で行っていたシミュレーションと同じように、Web 上で出力結果を見ることが可能となり、ワークショップに参加できない住民も利用することができる。

また、(3)のようにシミュレーションのログをデータベースから読み取り、空間上にアイコンとして表示するという方法もある。この場合、Web 上で作動する GIS (Web-GIS) を Web インターフェースとして想定し、GIS の空間解析によるパラメータの変化をエージェントや空間モデルに与えたり、シミュレーション結果から空間解析を行うことで高度な利用が可能となる。

しかし現段階では、出力速度に課題が残るため、実装には至っていない。しかし、Web 上での公開 (住民への周知)、他アプリケーションとの連携 (高度利用) は、リスクコミュニケーションを支援する重要な機能であるため、引き続き研究を進めていく。

4. 機能の検証

本章では、3 章で述べた FESS のプロトタイプを構築し、避難所認知率と住民エージェント同士の情報交換を考慮した追従性の検証、また一時避難所を設置した場合の避難所到着率の変化について検証を行う。

4.1 対象地とシミュレーション環境

本研究は、熊本県熊本市壺川校区を対象地とした。壺川校区は南北・東西方向ともに約 1km 四方程度の大きさであるが、地盤標高の高低差は最大で 30m 程度あり、洪水氾濫に対して安全な台地 (京町地区: 標高 30m~40mT.P) と危険性の高い低平地 (坪井・壺川・寺原地区: 標高 10mT.P 程度) が共存する特徴的な地形形状を呈している (図-13)。

内水氾濫については、レベル湛水法により算出された浸水深、外水氾濫については、二次元平面不等流モデルによって算出された浸水深、流速、そして流速と浸水深から算出される単位幅比力を用いる¹⁴⁾。なお、これらのデータは熊本大学応用海岸研究室から提供を受けた。シミュレーションの設定値の一覧を表-3 に示す。



図-12 GoogleEarth 上での 3 次元可視化

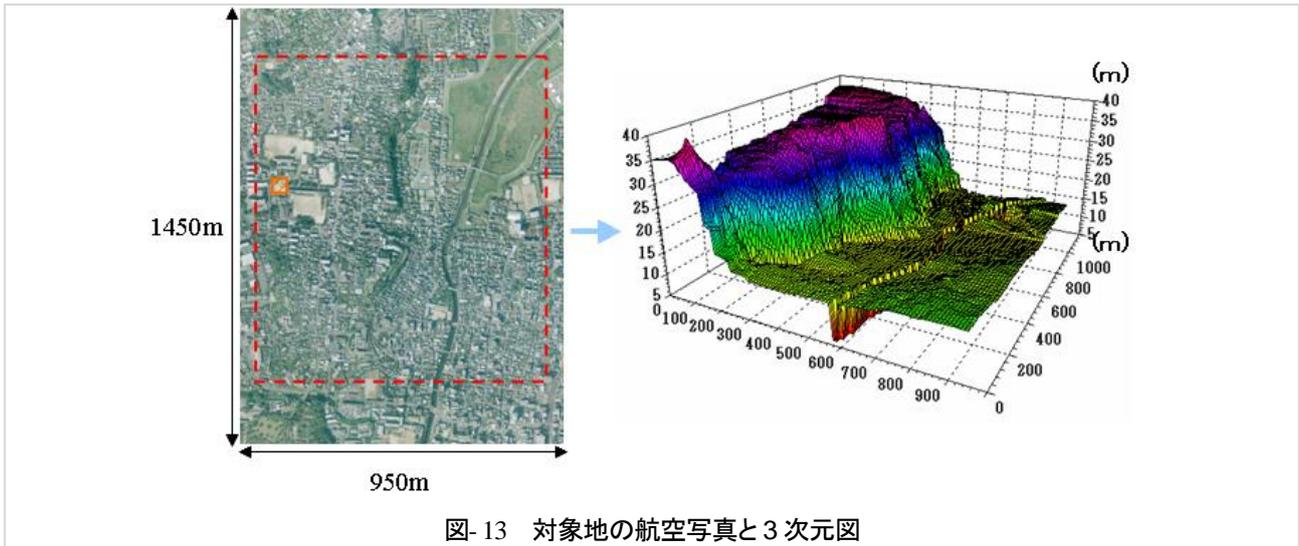


図-13 対象地の航空写真と3次元図

表-3 シミュレーション設定値

分類	項目	数量	参照情報	
空間モデルデータ	ノード数	577個	数値地図2500に追加・修正	
	リンク数	651個		
	標高値	9.50～41.73(m)		
外力データ (Max)	内水氾濫	浸水深	0.74(m)	レベル湛水法 2次元平面不等流モデル
		浸水深	1.387(m)	
	外水氾濫	流速	0.891(m/s)	
		単位幅比力	0.963(m ²)	
避難者データ	避難速度	1.272～2.184(m/s)	パラメータ解析より算出 水害避難行動に関する社会実験	
	避難開始までの時間	0～10分		

4.2 住民エージェントの追従性

(1) 住民エージェントの分類結果

既往研究において、住民同士の追従性が課題として挙げられた。これは地域住民が参加した社会実験で取得された避難経路のGPS結果が、提案された経路判断アルゴリズムでは再現できなかった理由のひとつとして考えられたものである。シミュレーション上では、ノードは、①避難所、河川までの距離と標高というシミュレーション実行時においては一定である固定的な情報と、②氾濫水の浸水深や流速などの時々刻々と変化する動的な情報、さらに③ノードの周囲にいる住民エージェントの数という不確定な情報を持ち、住民エージェントはそれらの情報を評価し、経路の拾捨選択を続けていく。住民エージェントはその位置において最善の経路選択を行っていくわけであるが、この経路判断項目において「住民の数」という情報が、住民にとって必ずしも安全な経路選択させる指標ではない。しかし現実的に人間は全員が様な判断基準をもつわけではなく、災害経験や土地感のない住民も当然存在し、地理的情報よりも「人がたくさんいる」という情報で、その経路が「最善」と判断してしまうことも十分考えられるであろう。したがって、主体である住民エージェントが、それぞれの判断基準をもっていることが、災害時の人間行動の再現性につながると思われる。「どこに逃げるべきか」という情報を持った住民と、「どこに逃げればいいのか分からない」という住民とでは、「住民の数」という情報の重みは異なり、そこから引き起こる追従行動が同一のものとは考えにくい。

本節では、住民エージェントに避難所の位置を認知しているかいないかの属性を与えた場合の影響を検証する。住民エージェントに避難所に対して認知しているかいないかの属性を与えた場合の影響を検証する。認知率20%から100%まで5段階で変化させてシミュレーションを行い、ステップ毎避難所到着率R(%)を算出する。認知率が100%ではない場合、避難所に向かわず、シミュレーション対象地外に避難する場合も多いため、避難所に到達した人数の割合を採用した。また、認知しているかどうかは1回ごとにランダムで与えた。外力は内水氾濫時の浸水深を選択し、絶対待ち時間を0分に設定した。住民エージェントはマップ上

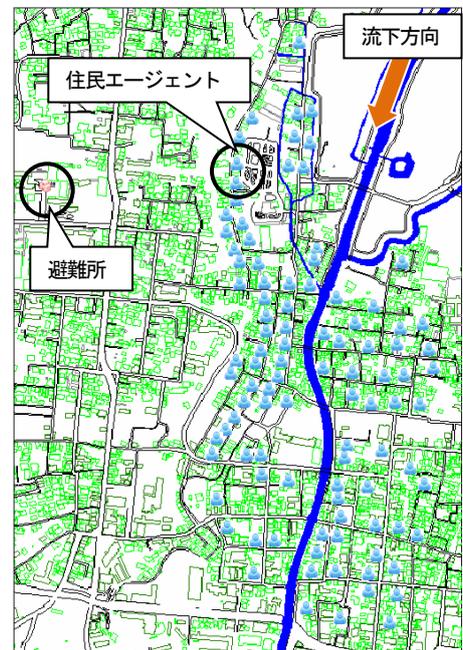


図-14 住民エージェントの配置図

で対象地の低地側に 100 名配置した (図- 14)。

各認知率の場合において、シミュレーションを 10 回ずつ行い算出した結果の平均値を図- 15に示す。この結果から、避難所認知率と避難所到着率には相関があることが分かる。経路判断式の各判断項目においては、避難所までの距離に対する重みを最大にしている。したがって、低地の右岸側に初期配置された住民エージェントは、認知に関わらず避難所のある高台方面を目指した。認知率が下がるにつれて、左岸に配置された未認知者が避難所に到達できる可能性が低くなる。経路判断項目を考えると、左岸に初期配置された住民エージェントは、避難所の情報なしに坪井川を横断して避難所へ向かう可能性は低い。認知者は避難所がある西側へ、未認知者は河川から離れる東側へ避難経路をとった。3 章の経路判断の項でも述べたが、未認知者の場合は、認知者よりも追従性が大きくなるように設定している。未認知者が認知者を追従して避難所に到達する場合もあったが、未認知者同士の追従行動により、不可解な経路判断を行ってしまい、避難所に到達できなかった場合が多く見られた。

(2) 情報交換による追従性の表現

避難時における追従性を再現するものとして、住民同士の情報交換を加えた場合の避難所到着率の変化を比較した。自身の周囲 10m 以内に他の住民エージェントが存在する場合に情報交換する確率である伝達率 N について、5%、10%、20%、30%、40% の 5 段階で変化させた。(a) 認知率 25%、(b) 認知率 50% の結果を図- 16に示す。

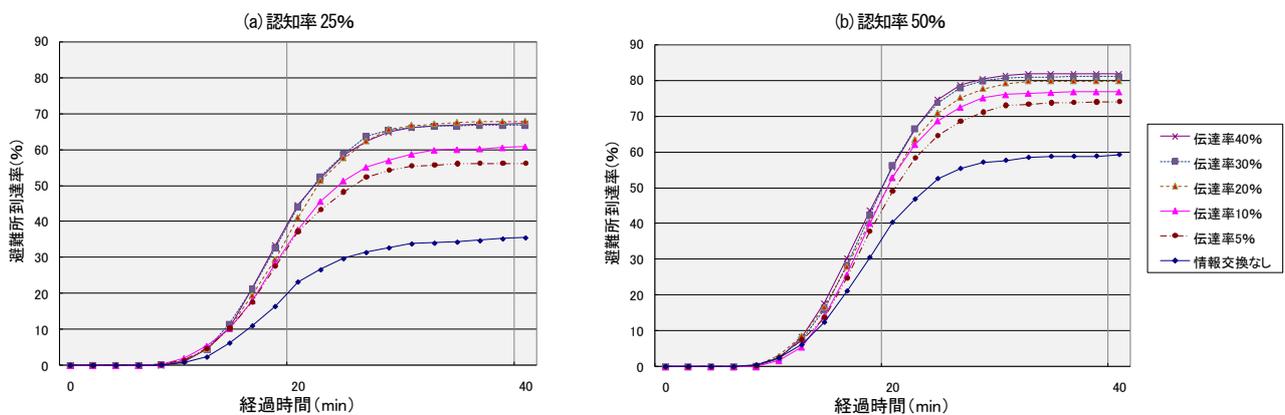


図- 16 避難所到着率と伝達率 N の関係

伝達率 0% と 5% を比較した場合、40 分後の避難所到着率は (a) では 157% の増加、(b) では 123% の増加という結果となった。認知者が少なくても、情報を取得する可能性さえあれば、避難所へ到達する割合は大幅に増加することがわかった。伝達率 5% 以上では、(a) においては伝達率の増加によって避難所到着率も増加傾向を示すが、伝達率 30% と 40% では大きな差は見られない。(b) においても、伝達率 20% 以上では同様の傾向を示している。認知者は目的地へ近づき、かつ安全と思われる経路へ避難するため、認知率が高いほど低地内に存在する認知者数の減少速度は早くなり、避難所の情報を取得する機会も減少する。

(3) 追従性に関する考察

この結果から、認知者が移動する経路上にいた未認知者は認知者から避難所の情報を取得し、目的地を設定し避難するという現象が表現できていることが分かる。ここで、伝達率の値の大きさが重要なのではなく、住民同士がコミュニケーションを行う可能性があつて、それをシミュレータとして反映させた場合、避難所の位置が分かった上での追従行動と、確たる目的地がないまま、ただ住民が存在する方向を優位として避難する二つの追従行動がシミュレーション空間で表現できていることが示される。

経路判断項目として挙げている「住民の数」というのは、経路判断時の接続先ノードに存在する住民の数である。つまり、非接触型の情報取得であり、ノード間の距離また周辺の建物状況によって、実際には視認できない場合が考えられる。また、住民エージェントが

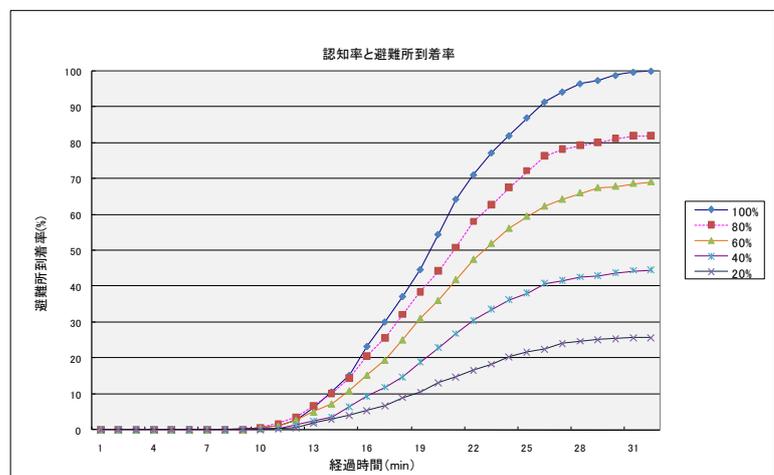


図- 15 避難所認知率と避難所到着率の関係

次の目的地として選択していたノードが、浸水により行き止まりとなってしまった場合には引き返すよう設定している。エージェントの多くが選択する経路である場合に、続々と住民エージェントが浸水地点まで進み、引き返して来ることになってしまう。危険回避の様子は示しているが、現実的な行動ではない。現モデルでは、「住民が存在するか」どうかを評価しているため、行き止まりから引き返す住民エージェントに対しても反応してしまう。

これらの問題に対する解決策として、接続先ノードを見るのではなく、住民エージェントに視認距離を設定し、その距離にいる住民エージェントを対象とし、その中で自身と同じ進行方向で移動している住民エージェントのみカウントするという方法が考えられる。これにより人の流れを察知するという追従行動が表現できると考える。

4.3 一時避難所設置検討への適用例

(1) 一時避難所設置の効果

本対象地では、現在避難所となっている施設は、高台に位置しているため、右岸の低地部と左岸にも新たな避難所の設置が望まれている。また、瀬戸坂は豪雨時には高台に降った雨が流れ降りてくるため危険個所と考えられている。氾濫解析の結果からは反映されない危険個所であり、瀬戸坂を迂回する避難経路が望まれる。したがって、本シミュレータの環境設定機能の避難所設置機能と封鎖地点指定機能を用いた豪雨時の一時避難所の設置検討への適用例を示す。以下にシミュレーション実行までの操作と配置図を示す(図-17)。

- ①一時避難所指定モードを実行し、マップ上の一時避難所候補地からアイコンをクリックして選択する。(複数可)
- ②封鎖地点指定モードを実行し、マップ上で封鎖したい地点をクリックする。(複数可)
- ③ダイアログが表示され、封鎖開始時刻を入力する。封鎖地点にはアイコンが表示される。(複数可)
- ④一時避難所設置ボタンと道路封鎖ボタンをオンにし、避難実行モードでシミュレーションを行う。

今回は、絶対待ち時間 10 分、準備時間 10 分に設定し、外力は内水氾濫の浸水深さを選択した。住民エージェントの配置は前節と同様である(右岸 55 名、左岸 45 名)。(1)避難所のみ、(2)左岸側に 1 か所、(2)左岸側と右岸側の 2 か所の計 3 パターンを 10 回ずつシミュレーションし、避難所到着率の平均値を算出した。例として、(2)の場合のシミュレーション経過を図-18に示し、算出結果のグラフを図-19に示す。

一時避難所を左岸に 1 か所設置した場合、避難所到着率が 90%になるまでの時間が避難所をみの場合と比べ 12 分ほど短縮されているのが分かる。左岸の住民が一時避難所へ早期の避難を行えた結果である。さらに右岸にもう 1 か所設置した場合、さらに 5 分ほど短縮されるという結果になった。

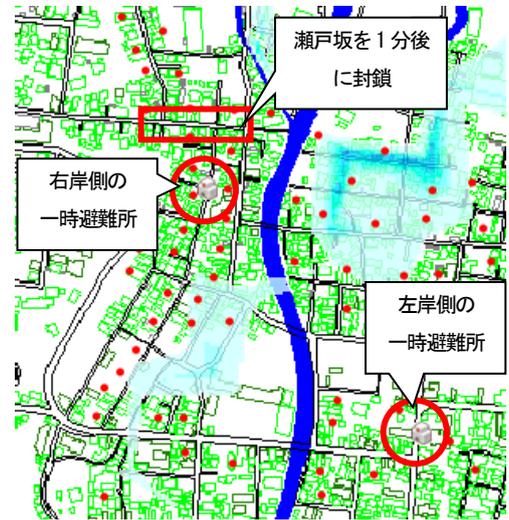
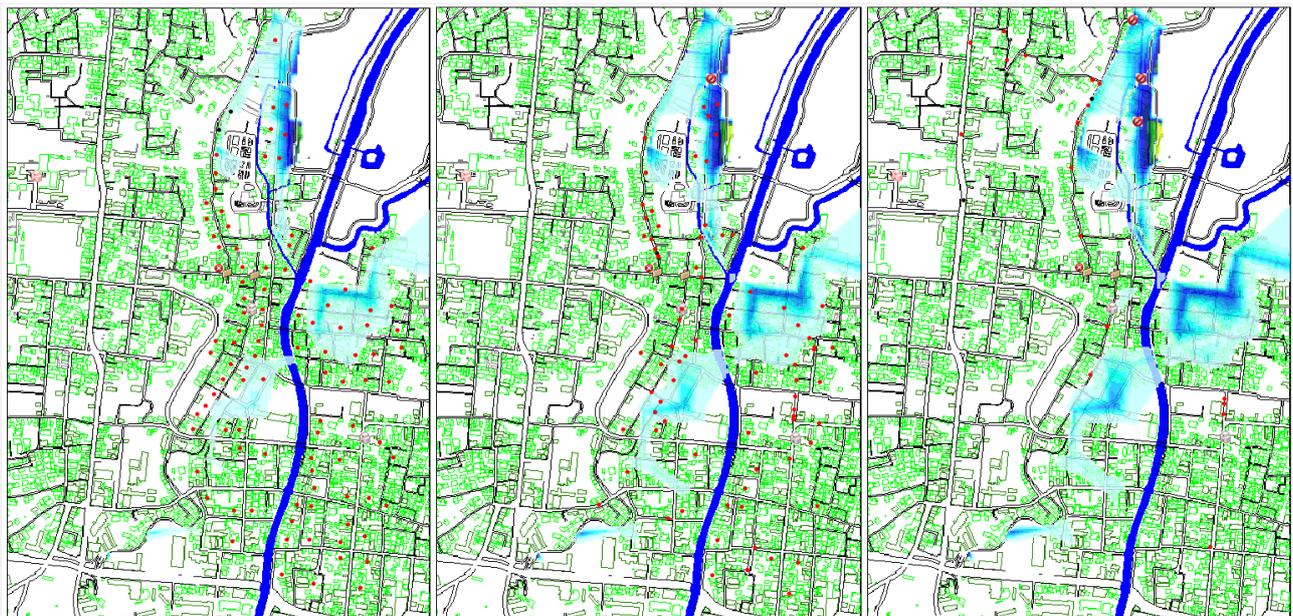


図-17 一時避難所と封鎖地点の位置

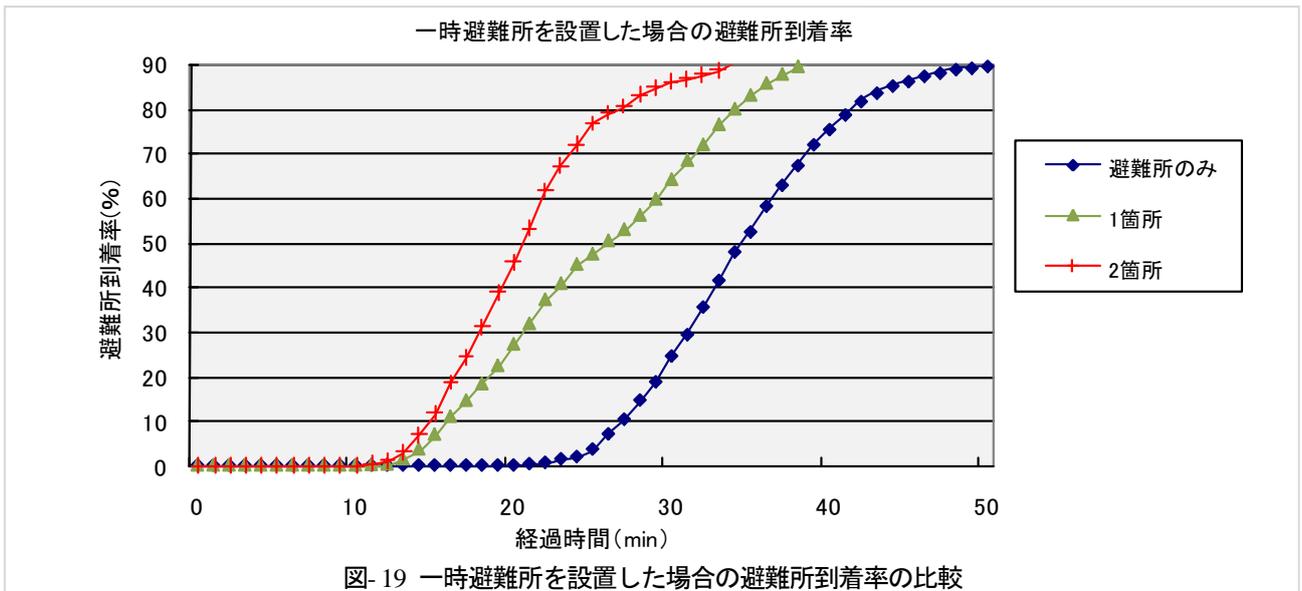


(a) 5 分後

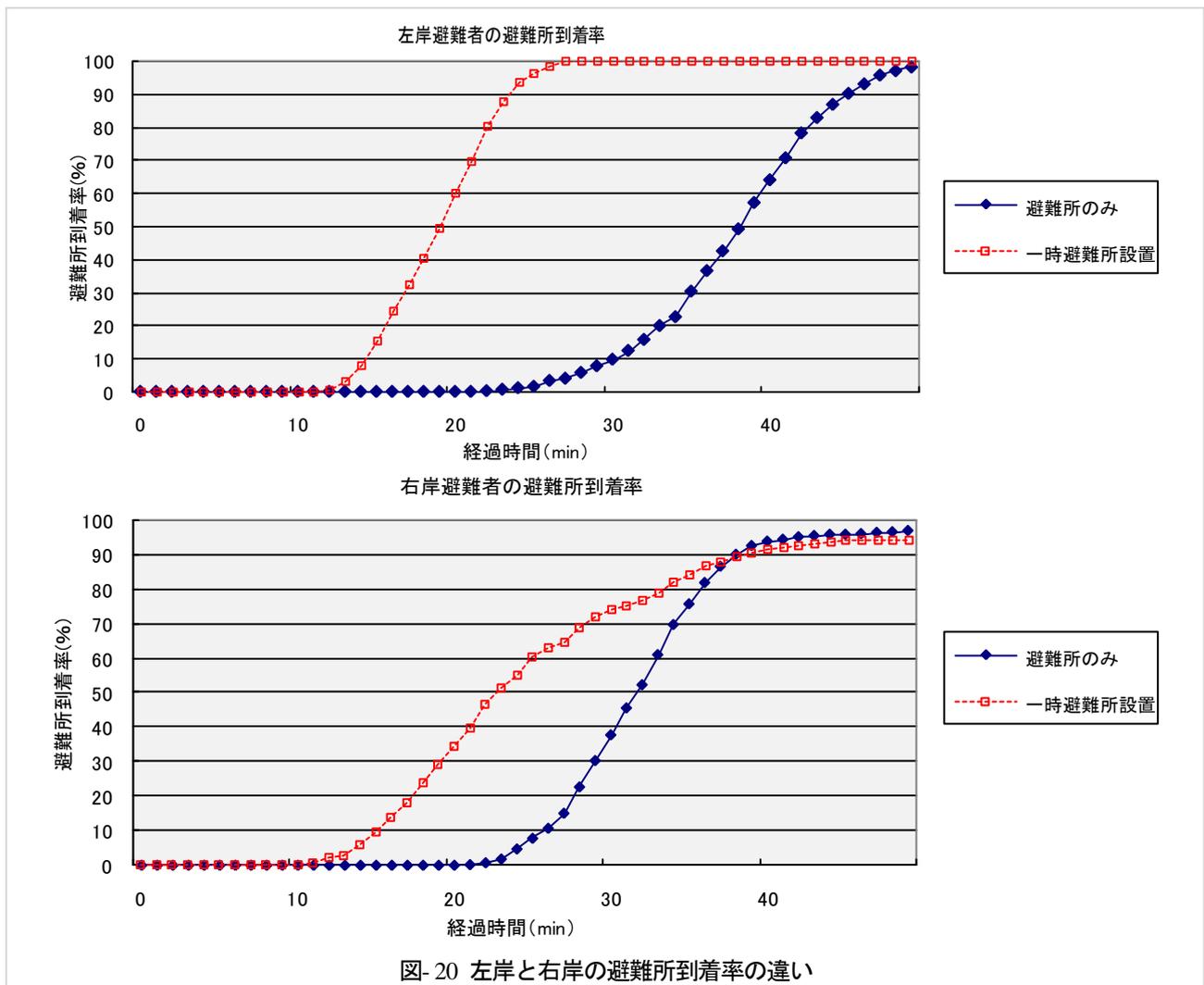
(b) 15 分後

(c) 25 分後

図-18 シミュレーション経過(一時避難所 2 箇所の例)



続いて、一時避難所設置の効果について示す。図- 20は、右岸と左岸の住民のそれぞれの避難所到着率である。上記したように、左岸の住民にとっては、避難開始から約 15 分後には一時避難所に到着している。しかし右岸の場合は、一時避難所を設置すると順調に避難所到着率は増加が、避難所到着率が 90% になった時間は一時避難所がない場合とほぼ同じである。これは、右岸の一時避難所より南側の住民は早期に避難が完了したが、北部の住民が瀬戸坂の封鎖の影響で一度引き返し、避難所へ向かう場合が多く見られたため、その時間のロスが影響している。一時避難所の位置は氾濫水だけでなく、そこに到達するまでの経路の安全が確保されていることが重要であることが示される。



(2) 表現の多様性に関する考察

本研究のシミュレータの目的は、最適な避難経路を算出することが主目的ではなく、行政と住民とのリスクコミュニケーションツールとして、水害時の状況をシミュレータ上で仮想体験させ、住民自身が水害リスクに関して考える機会を与えることである。したがって、実際に利用する場合には、避難完了率や被害者数などのシミュレーションの「結果」だけでなく、浸水している地点をどう回避したか、避難者が混雑する経路はどこであるかなど、シミュレーションの「過程」をどこまで表現できるかが重要である。

FESS では、表現機能の大きな特徴としてシミュレータ上でシミュレータ空間の環境設定を直感敵に行えることが挙げられる。以下の3つは、FESS に実装された代表的な環境設定機能である。

- ①避難所設置：指定ノードに「目的地」という属性を与える
- ②封鎖地点指定：動的に道路ネットワークを変化させる
- ③外力選択：ノードの危険度を変化させる

上記の3つの機能は住民エージェント自身ではなく、シミュレーション空間に変化を与えるものである。それぞれの機能を組み合わせることで、シミュレータはさらに多様な現象をアウトプットとして提供できる。シミュレータが多様な利用目的に対応するためには、シミュレータ空間の変異性が重要な意義をもつと考える。

5. 運用に関する考察

最後に、提案した FESS の特徴である 3 次元地情報を基盤としたシミュレータ構築の意義と、シミュレータインターフェースの重要性について考察をまとめる。

(1) 3次元地形情報を基盤に据えた意義

リスクコミュニケーションにおいて、災害リスクに関する情報を提供する際に重要なことは、その情報が地域の実

情を反映したものになっているかということに尽きる。旧来の洪水ハザードマップを例にとってみても、50m メッシュ相当の氾濫解析結果が用いられているなど、それらの示す情報は、地域の住民にとって避難行動の参考に到底できるものではなかった。浸水が予想されている地区に住む住民にとって、何 cm 浸水するという情報は避難行動の役に立たず、このような住民に提供すべき情報は、「いつ逃げるべきか」を判断する情報であるはずだ。氾濫解析の結果として想定浸水深を示すにしても、刻々と変化する浸水状況を時間経過とともに示すべきである。

そして避難シミュレーションの前に、そのシミュレータに構築された空間が、実空間を再現したものであるということが前提にあるだろう。住民に数値シミュレーションの結果が数値遊びだと思われたいためにも、そのシミュレーションの舞台が、この地区を詳細に再現したものであるということを認識させねばならない。

これまで、このような詳細な空間モデルを構築するためには多くの時間と労力を費やしていた。しかし LP データには地形表層部の全ての情報が含まれており、属性判別技術次第で多様な情報を取得できる。空間モデル構築の迅速化と高精度化は、シミュレータの汎用性に大きく影響し、この技術の進展なしには、シミュレータがリスクコミュニケーションツールとなりえることはない。

また、3次元地情報を基盤とした効果は、上記のようなシミュレータ構築支援だけでなく、シミュレーションのバリエーションを増やす際にも表れた。3次元道路ネットワークデータの構築の際に用いた手法と同様に、数値地図2500の建物ポリゴンデータと3次元地形モデルから、建物ポリゴンの重心座標の標高値を取得し、住民エージェントの初期配置座標としてデータベースに登録しておくことで、例えば標高20m以下に居住している住民のみ生成してシミュレーションを行うということも可能であった。また、壺川校区ではワークショップなどで一時避難所の検討が予定されており、実際の住民数でシミュレーションを行うことも考えられているため、この手法を用いれば、数分で住民配置データを完了させることができる。

(2) シミュレータインターフェースの重要性

本システムは、3D-CAD を用いて基盤となる空間モデルを構築した。3D-CAD の持つ作図機能と編集機能は道路網ネットワークや氾濫解析モデルの作成の際に多いに威力を発揮するものであった。また、オブジェクトに対して任意のパラメータを付与し、外部データベースと連携させる機能については、空間モデルを管理するにあたり非常に有用であった。修正が必要になった場合も、外部データベースのデータを更新すれば、CAD オブジェクトのデータも更新され、データ間の矛盾が生じることはなかった。

しかし、シミュレータ利用時において、CAD はコミュニケーションの機能を有していない。前章において、シミュレータにおける表現の多様性に寄与するものは、シミュレーション空間の可変性であると述べた。つまり、シミュレータを用いて議論・検討を繰り返す場合には、シミュレータインターフェースからシミュレーション空間に変化を与えられることが重要である。これについては、表現機能ブロックにおいて、シミュレータインターフェースからシミュレーション空間に変化を与えるマップクリック機能を実装したことで、よりユーザフレンドリーなシミュレータになったといえる。住民がユーザとなりうることを考えた場合、直感的な操作で利用できなければならない。

また、避難シミュレータ内部(artiso)のコーディングによるカスタマイズは比較的容易であるが、その反面、パラメータ操作部のインターフェースの自由度が低いため、実装できる表現機能が限られることは課題である。この課題に対しては、3章で提案している Web ブラウザや GIS との連携によって解決でき、利用方法も大幅に広がるはずである。また、現状では数値的なアウトプットとして、避難者数や被害者数などの情報は随時出力しているが、それ以外にもシミュレータ空間の変化による定量的な評価を行うためのアウトプット機能の充実も図っていく必要がある。

6. 結論

本研究では、避難シミュレータに対して水害リスクコミュニケーションを支援していくツールとしてどうあるべきかという視点から分析を行い、3次元地形情報を用いた空間モデルを基盤とした洪水・避難シミュレータシステムを提案した。リスクコミュニケーションツールとして求められる要件は、地域の実情を反映したモデルを迅速に構築できること(汎用性・拡張性・精緻性)と、住民が水害リスクに対して実際に起こりうるものとしてイメージするための情報を提供できること(現実性・多様性・即時性)である。シミュレータが解析ツールとしてではなく、地域住民と行政との合意形成を支援するツールとなり、地域防災力の向上に寄与できるものとなることを期待する。

謝辞

株式会社構造計画研究所の artiso 開発者の皆様には、本ツールの提供だけでなく、ツールの開発者という視点から御意見、御助言を頂き、心より御礼申し上げます。また、ワークショップや氾濫解析のデータ等を提供して頂いた熊本大学応用海岸研究室の山田文彦先生にも御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 佐藤照子：2000年東海豪雨災害における都市型水害の特徴について、防災科学研究所主要災害調査、Vol.38、pp.391-409、2002.
- 2) 片田敏孝、児玉真、浅田純作、及川康、荒畑元就：東海豪雨災害を事例にした避難に関わる意思決定の状況依存性に関わる研究、水工学論文集、Vol.46、pp.319-324、2002.
- 3) 竹下史朗、小林一郎、山田文彦、上野幹夫：マルチエージェントモデルを用いた洪水・避難シミュレータの開発、土木情報利用技術論文集、Vol.16、pp.203-212、2007.
- 4) 国土交通省河川局ホームページ：<http://www.mlit.go.jp/river/kasen/index.html>、2008/02 現在
- 5) 片田敏孝、児玉真、佐伯博人：洪水ハザードマップの住民参加とその促進策に関する研究、水工学論文集、Vol.48、pp.433-438、2004.
- 6) 山田文彦、柿本竜治、山本幸、迫大介、岡裕二、大本照憲：水害に対する地域防災力向上を目指したリスクコミュニケーションの実践的研究、自然災害科学、Vol.27、No1、pp.25-43、2008.
- 7) 野澤征司、渡辺公次郎、近藤光男：マルチエージェントシステムを用いた歴史的市街地における津波避難シミュレーションモデルの構築、土木計画学研究・講演集、Vol.32、CD-ROM(217)、2005.
- 8) 畑山満則、多納野裕一、川島健一、松本卓也：水害リスクコミュニケーションのための参加者個別ハザードマップ作成システムの開発、京都大学防災研究所年報、Vol.49、pp.19-129、2006.
- 9) 山本一浩、小林一郎、上野幹夫、橋本淳也：自動属性判別法によるレーザー計測データの有効活用について、土木情報技術論文集、Vol.14、pp.79-86、2005.
- 10) 上野幹夫、小林一郎、山本一浩、竹下史朗：レーザー計測データを活用した避難経路用の道路網作成、土木情報利用技術論文集 Vol.16、pp.195-202、2007.
- 11) 上野幹夫、小林一郎、山本一浩、安重晃、橋本淳也：レーザー計測データを用いた有限要素法による洪水氾濫解析、土木情報技術論文集、Vol.14、pp.1-6、2005.
- 12) 山影進、服部正太：コンピュータのなかの人工社会—マルチエージェントシミュレーションモデルと複雑系、共立出版株式会社、pp.2-20、2002.
- 13) 鈴木介、今村文彦：住民意識・行動を考慮した津波避難シミュレーションモデル、自然災害科学、Vol.23、No4 pp.521-538、2005.
- 14) 大西良純、石垣泰輔、馬場康之、戸田圭一：地下空間浸水時における避難困難度指標とその適用、水工学論文集、Vol.52、pp.841-846、2008.