

- 23 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

Evacuation simulator from flooding using multi-agent model

竹下史朗¹・小林一郎²・山田文彦³・上野幹夫⁴

Takeshita Shiro, Kobayashi Ichiro, Yamada Fumihiko, and Ueno Mikio

抄録:マルチエージェントモデルを用いた、洪水・避難シミュレータを開発し、地域の水害に対する減災力向上のために適用した。ケーススタディとして熊本市壺川校区を対象として計算を行った。3次元地形データはレーザー計測データを使用した。熊本市壺川校区で実施した内水氾濫に伴う避難行動実験結果を本シミュレータで再現し、GPS による参加住民の避難行動をよく再現できることがわかった。

Abstract: An evacuation simulator from flooding due to a heavy rain using a multi-agent model is developed and implemented to enhance the capability of community flood risk mitigation. As for the case study, the numerical simulations are performed at Kosen town-community in Kumamoto City. A 3-dimensional geometric data was constructed using the laser profiling data (LP data). The numerical results are compared with the evacuation drill results for virtual flood scenario. It is found that the evacuation simulator reproduces well the residents' evacuation behavior using Global Positioning System (GPS).

キーワード: マルチエージェントモデル、避難シミュレーション、洪水ハザードマップ
GPS、レーザー計測データ

Key Words: multi-agent model, evacuation simulation, river flooding hazard map, Global Positioning System (GPS), laser profiling data

1. 序論

我が国では、台風の経路上にあることや、梅雨前線の影響を受けやすいことなどにより、毎年のように水害が発生している¹⁾。近年の災害の特徴として、2004年に起きた新潟・福島豪雨や福井豪雨、また、台風0423号など、計画規模を上回る豪雨が多発していることが挙げられる。特に都市部において、河川の通水能力を上回る規模の洪水が発生し、越水・破堤に至り、人的・物的被害が発生した事例²⁾が報告されている。このような状況の中、国民の防災・減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、自分の身は自分または地域で守るという意識に変化しているものと思われる。住民の防災・減災に対しての「自助・共助」の意識を高め、さらには行政の「公助」を促すソフト面での整備を進め、全体として水害による被害の軽減を目指すことが重要である。

このような状況下、国土交通省ではソフト面における治水対策として、平成6年から洪水ハザードマップの作成・公表を市町村に指導・支援してきた。さらに、平成13年の水防法の改正に基づき「浸水想定区域図」を作成・提供し、市町村の洪水ハザードマップの作成支援を強化している。これら洪水ハザードマップは、1998年の東日本豪雨災害や2000年東海豪雨災害時の住民避難の迅速化などでその有効性が示されている³⁾。しかし、その一方で、洪水ハザードマップに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、また洪水ハザードマップ作成の各種条件(累積降雨量、堤防の破堤箇所など)が住民には十分には知らされていないこと、さらに地上の建物や、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(移動速度や移動方向など)が不明であり、災害時の避難経路を選択が困難であるなど、多くの問題点も指摘されている。

そこで、本研究では、以上のような現状の洪水ハザードマップの問題点を解決すべく、洪水・避難シミュレータ(動

1 : 学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科(〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39番1号)
(〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39番1号, Tel: 096-342-3536, E-mail: 071d8828@st.kumamoto-u.ac.jp)
2 : 正会員 工博 熊本大学大学院 教授 自然科学研究科(〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39番1号)
3 : 正会員 博(工) 熊本大学大学院 准教授 自然科学研究科(〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39番1号)
4 : 正会員 (株)構造計画研究所 事業開発部(〒164-0011 東京都中野区中央4丁目5番3号)

的な避難行動マップ)の提案を行う。このシミュレータでは、内水・外水氾濫解析によって得られた氾濫水の進行状況に応じた、市民一人一人の避難行動を表現するために、マルチエージェントモデルを採用した。視覚的に理解しやすくするために、双方の計算結果を重ね合わせ、アニメーション化を行った。また、計算に使用する地形標高データとして、航空機によるレーザー計測データ(Laser Profiling data、以下 LP データ)を用い、より詳細な 3 次元地形を再現し、シミュレーション精度の向上と作業の効率化を図った。さらに、浸水実績を考慮した仮想シナリオに対する避難行動実験を行い、その行動を本システムにより再現し、両者の結果を比較することで、水害リスクコミュニケーションツールとしての本シミュレータの有効性を検証する。

2. 洪水ハザードマップ

洪水ハザードマップとは、自然災害による被害を予測し、その被害範囲を地図化したものである⁴⁾。予測される災害の発生地点、被害の拡大範囲および被害程度、さらには避難経路、避難場所などの情報が既存の地図上に図示されている。洪水ハザードマップを利用することにより、災害発生時に住民などは迅速かつ確実に避難を行うことができ、さらに二次災害発生予想箇所を避けることができるため、災害による被害の低減のためには非常に有効である。

(1) 洪水ハザードマップの必要性

洪水ハザードマップはその作成が始まって日は浅いが、既にいくつかの洪水時において実際に活用されその効果が確認されている。初めて効果が確認されたのは、1998 年東日本豪雨災害時の郡山市においてである。群馬大学片田らの調査によると³⁾、阿武隈川の中流に位置する郡山市では、この洪水が発生する前に洪水ハザードマップを作成して住民に配布していた。洪水後に行われた洪水ハザードマップの活用状況調査では、避難率はピーク時で約 50%に及び、住民の多くは避難に際して洪水ハザードマップに示される避難場所を確認するなど、実際の避難に役立っていた。また、洪水ハザードマップを見た人の避難率は、見なかった人に比べて約 10%高く、避難開始のタイミングも約 1 時間早かった。極めて緊迫した状態での約 1 時間の早い避難、そして約 10%の避難率の相違は大きな効果であり、洪水ハザードマップが住民避難に効果をもたらすことが実証された。郡山市の洪水ハザードマップは、その公表効果として住民避難に効果をもたらすだけでなく、郡山市当局の洪水危機管理にも効果をもたらした。郡山市の河川管理担当者は、洪水ハザードマップを作成する過程で示された浸水想定区域が、市街地を含め広範囲に及び、要避難人口が多いことを改めて認識した。そして、避難所の配置や避難経路の検討、避難勧告のタ

イミングを決めるなど、綿密な避難計画を立てることの必要性を痛感し、実行した。この避難計画は 1998 年の洪水の際、住民避難を円滑に誘導することに大きな役割を果たすことになった。これは洪水ハザードマップの危機管理効果とも言える効果である。

(2) 洪水ハザードマップの課題

現在の洪水ハザードマップは紙媒体などの静的なハザードマップが主なこともあり、洪水ハザードマップに対する住民理解にもいくつかの問題点が確認されている⁵⁾。これらの問題点を解決することは、効果的な洪水ハザードマップを作成するための重要なポイントである。

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ので、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。

静的で限られた情報しか表現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。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当然のこととして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。

3. 洪水・避難シミュレータの提案

(1) 洪水・避難シミュレータの概要

本研究では、開発ツールとして(株)構造計画研究所のマルチエージェントシミュレータ(KK-MAS)を用い、特に洪水及び内水氾濫に焦点を当て、シミュレータ(以下、本システム)を構築する。

マルチエージェントシミュレーションには、エージェントに様々な変数を持たせることができ、さらに同一空間上に性質の異なる複数のエージェントを配置できるという特徴がある。本システムでは、避難者である「住民」と道路網の節である「ノード」をエージェントと定義し、初期位置や避難開始時刻、移動速度などの情報を与え、避難所へ移動するための経路選択のルールを設定する。「住民」エージェントが移動する道路網はネットワーク型、つまり交差点をノード、道路をリンクとして表現する。原則として、道路ネットワークを離れての移動はできないものとする。「ノード」エージェントには、避難所までの距離、河川からの距離、標高、道路の接続状況、事前に計算された各点での浸水深

の時系列変化といった時空間情報を変数として持たせる。シミュレーションに用いるパラメータの設定に応じ、洪水発生後、避難を開始した「住民」エージェントは、このリンク上を移動し、経路選択を繰り返しながら避難所を目指していく。「住民」エージェントが避難する空間の基盤背景には氾濫解析結果の時系列アニメーションを用い、浸水データは事前に計算された氾濫解析結果を蓄積したデータベースを作成しておき、シミュレーション内の時刻に合わせてデータベースから読み込んだ情報を反映する方法を採用した。これにより、時々刻々と変化していく状況を視覚的に再現することが可能となっている。なお、本システムでは、住民は全て徒歩で避難するものと仮定し、車での避難は考慮しない。

(2) 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」⁶⁾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。本研究では、MAS を避難モデルに用いて、人間の行動をシミュレーションする。

MAS は、全体の結果がある部分の結果の総和にはならないような個々の要素が、相互に影響を及ぼしあって行動しているようなシステムや社会を理解するために用いられる。MAS は多数の主体間が相互作用する社会モデルの一つであり、主体間の相互作用については主体自身に任せているのが特徴である。

MAS 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。エージェントたち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論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。

図-1に情報伝達の場合の従来のシミュレーションとMASのシミュレーションの違いを示す。従来のシミュレーションの場合、情報(information)を発信すると全体に一律に伝わる。つまり、全体系が一瞬で均衡な状態になる。しかし、MASの場合、発信する情報は局所的かつ不均一

である。つまり、情報の伝播のような現象(ネットワーク的現象)を表現することが可能となり、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。

次に、MASの基本的な特性を説明する。MASの基本的な特性として、以下の4項目があげられる。

- 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することができる。
- 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、近年では多くのシミュレーションでMASが注目されている。

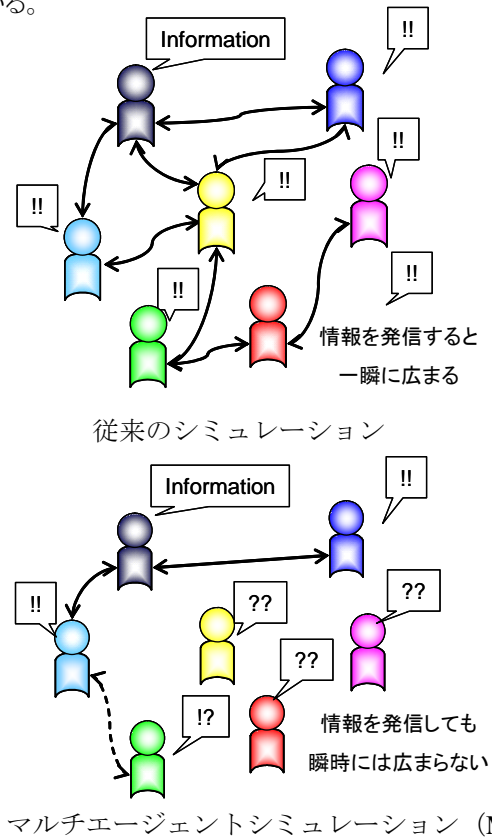


図-1 従来型とMASとの比較

(3) 空間のモデル化

シミュレーションを行うにあたり、対象とする空間をモデル化する必要がある。従来のMASの空間モデルは、図-2の左図のようなX、Y座標のみしか考慮していない2次元格子モデルがほとんどである⁷⁸⁾。この場合、エージェン

トは時系列に従いマス上を移動していく。しかし、この2次元格子モデルでは実際の3次元地形 X、Y、Z 空間を考慮した空間モデルを構築することができないこと、また屋外において道路を使つての避難の場合にはノード・リンクによるネットワークモデルを構築した方が有利であることから適切ではないと考える。

これに対し、本研究では空間モデルを構築するにあたり、Z座標である標高と複雑に入り組んだ道路のネットワークを考慮するために、LPデータを用いて、リンクとノードのつながりによる3次元ネットワーク空間モデルを構築した(図-2、右図)。

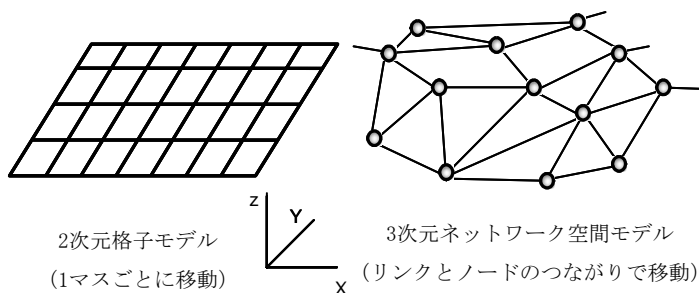


図-2 2次元格子モデルと3次元ネットワーク空間モデル

筆者らは、これまでにLPデータの有効利用を目的に研究を行ってきており、LPデータの有効性について検証してきた⁹⁾。それにより、LPデータを地形データと建物データに自動加工し、高精度な基盤データを取得することができた。以下にLPデータを本研究に用いた理由を述べる。

- ① 1次データがデジタルデータのため2次利用しやすい
- ② 誤差が小さく、位置精度が高い

標準偏差(X,Y,Z) = (0.30,0.39,0.15) [m]

- ③ 全国の河川においてLPデータの整備が進んでいる

3次元ネットワーク空間モデル作成には市販ソフトの Autodesk Civil 3D 2007(Autodesk社、以下Civil 3D)を用いた。以下に、3次元ネットワーク空間モデルのノードデータ作成方法を述べる。

- ① Civil 3D を用いて対象範囲の LP データを読み込む
- ② 読み込んだデータから自動で TIN(Triangle Irregular Network)データを作成
- ③ 作成した TIN に航空写真などを重ねて位置合わせした図面上に道路中心線を描画
- ④ ②、③のデータからソフトの機能であるトポロジ解析より道路交差点データ(以下、ノードデータ)を抽出

上記より得られたノードデータの X、Y 軸の最大値・最小値の差を空間の大きさと定義し、その空間上にすべてのノードデータを配置し、3次元ネットワーク空間モデルを構築する。

(4) エージェントの移動アルゴリズム

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-3に示すアルゴリズムに従い行動する。

まず「住民」エージェントは、移動開始時の初期状態において初期座標領域に配置される。ノード情報を取得後、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。ここで、経路選択について説明する。目標ノードに到着した際、複数の経路から一つを選ぶための際の判断には、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¹⁰⁾。以下にその説明を示す。

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①～④のチェックを行う。

- ① 避難所に近づくか (+ a)
- ② 川から遠ざかるか (+ b)
- ③ 標高が高くなるか (+ c)
- ④ 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(1)式を用いて加算する。S_iは経路ごとのポイント合計値である。

$$S_i = a + b + c + d \quad (1)$$

i = 2,3... (i の値は交差点の接続点数によって変化)

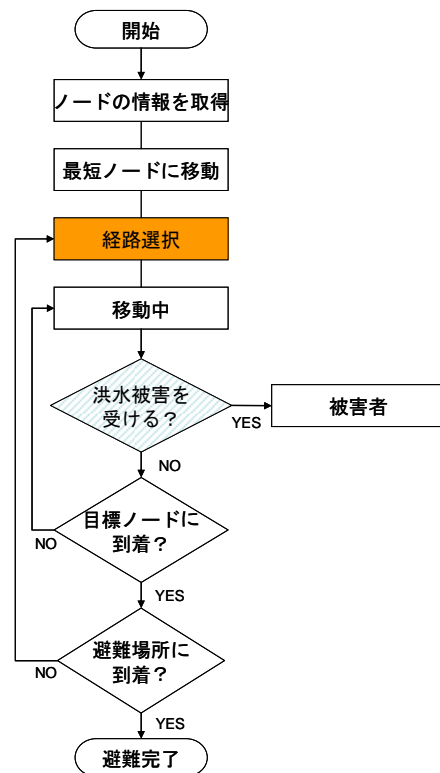


図-3 移動アルゴリズム

全ての接続点について総合判断を行い、(1)式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。

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①～④の他に、例えば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。従って、他地域への応用が利き、また「住民」エージェントの避難経路に関する意識もある程度考慮できることである。

また、「住民」エージェントは、洪水被害を受けた場合は、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。本計算では、須賀らの実験結果¹¹⁾を参考にして、1mを超える浸水被害を受けた場合を人的被害者と見なし、避難モデルに適用するものとする。

(5) システムインターフェース

図-4に洪水・避難シミュレータのシステムインターフェースを示す。以下では、図中の番号に従って説明する。

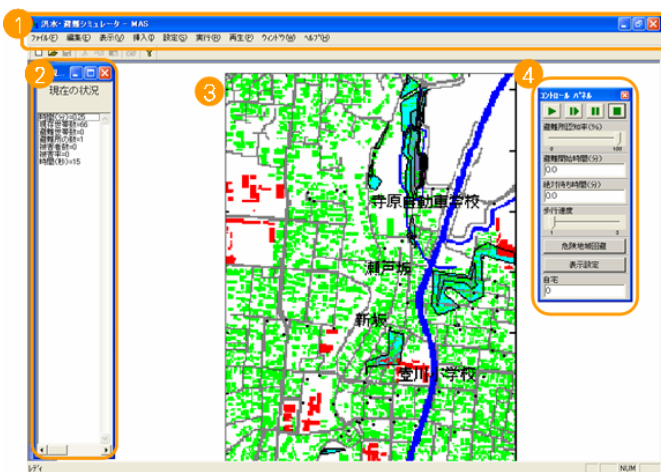


図-4 システムインターフェース

①はシミュレータ基本機能部であり、シミュレーションのファイル読み込みや、シミュレーション画面出力部の表示方法の設定、各種設定の変更、シミュレーション実行環境変更などシミュレーションを実行する上での基本的な機能を有する部分である。

②のシミュレーション文字情報部は、実行中の各種情報を文字情報としてリアルタイムに表示する部分である。表示する文字情報としては、対象地域の世帯数、避難世帯数、避難所数、被害者数、被害率、シミュレーション実行時間などである。これらの情報は、①のシミュレータ基本機能の設定によって定義される。そのため、状況に応じて任意に情報を増減可能である。

③がアニメーション出力部であり、背景地図に別ソフトで作成した氾濫解析結果の時系列アニメーションを表示し、その背景地図上を黒い丸で表現されているエージェントが避難していく様子を表示する。背景地図で表示できる画像形式は、BMP、JPEG、GIF形式の画像であれば用いることができるため、汎用的なシステムを作成可能である。

④は計算に用いるパラメータの操作部であり、上部に表示されている4つのアイコンで、シミュレーションの実行、コマ送り、一時停止、停止を行うことが可能となっており、シミュレーションの挙動の変更を行う部分である。その他に、①で定義したパラメータをスライドバー(指定した範囲で自由に調整可能)、ボタン、トグルボタン、直接入力などによって決定する部分がある。この操作によって、避難者の避難所認知率の変更、避難者の待ち時間と待ち時間から避難開始までの時間の変更や、避難のためのシナリオの変更、エージェントを全て表示するのか個別表示とするのか、また任意のエージェントの軌跡表示など、実験したいシミュレーションの状況を容易に設定可能となる。

シミュレーションの挙動の変更を行う部分である。その他に、①で定義したパラメータをスライドバー(指定した範囲で自由に調整可能)、ボタン、トグルボタン、直接入力などによって決定する部分がある。この操作によって、避難者の避難所認知率の変更、避難者の待ち時間と待ち時間から避難開始までの時間の変更や、避難のためのシナリオの変更、エージェントを全て表示するのか個別表示とするのか、また任意のエージェントの軌跡表示など、実験したいシミュレーションの状況を容易に設定可能となる。

4. 熊本市壺川校区への適用

(1) 対象地の概要

本研究では、熊本県熊本市壺川校区(約1km四方)を対象地とした。図-5に対象地の航空写真と点線で囲まれた部分の3次元地形図を示す。同校区の右部を坪井川が縦に南下して流れている。坪井川は、流域面積141.7km²、流路延長が23.5kmの2級河川であり、これまで何度も水害に見舞われてきた。壺川校区は、地盤標高の高低差が最大で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・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。低平地部は過去何度も坪井川の氾濫を経験しており、住民からの水害を想定した避難行動訓練の要望は高く、熊本市においても水害防災教育の必要性が高い校区の一つである。

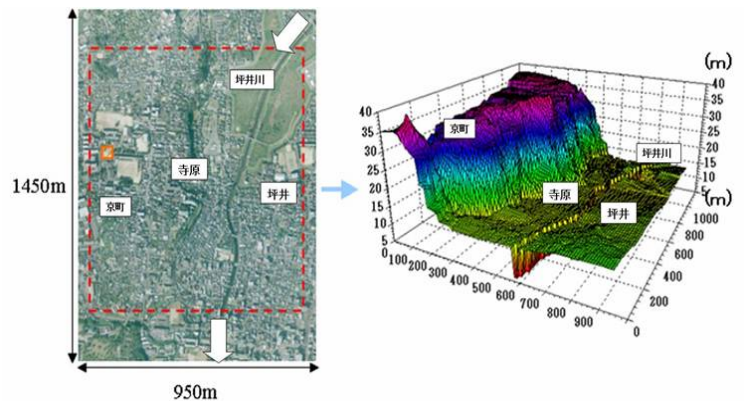


図-5 対象地域

(2) 水害避難行動に関する社会実験(避難行動実験)

a) 実験概要

本研究では、熊本市壺川校区で行われた水害避難行動に関する社会実験データ¹²⁾と比較を行う。社会実験に使用した想定シナリオの詳細は、山田・柿本¹²⁾に詳しい。既存の白川洪水ハザードマップで避難場所に設定されている壺川小学校は、水害時に浸水の可能性が高いと判断し、京町台地の壺川地域コミュニティセンターを避難場所とした。図-6に社会実験の様子と避難シナリオを模式的に示す。時間の経過とともに、内水氾濫範囲が拡大し、通行不可能な経路が増えている。これは今回の社会実

験のトラップであり、住民は事前に知らされていない。

社会実験時の住民行動パターンについての定量的な把握については、以下の4つの方法で実施した。

- 1) 実験に参加する住民全員の方々に番号のついたゼッケンを着用していただく。
- 2) 校区内の主要な道路交差点 27 箇所に学生を配置し、交差点を通過する参加者のゼッケン番号・通過時間・進行方向を記録する。
- 3) GPS 機能付き携帯電話番号 30 台を低平地に住む住民に配布し、実験開始後 2 分ごとに全員の位置情報の取得を行った。(KDDI の GPSMAP サービスを利用)
- 4) 今回の実験では避難指示の連絡体制として電話連絡網を利用したので、電話を受け取った時刻および避難を開始した時刻は各参加者が記録する。

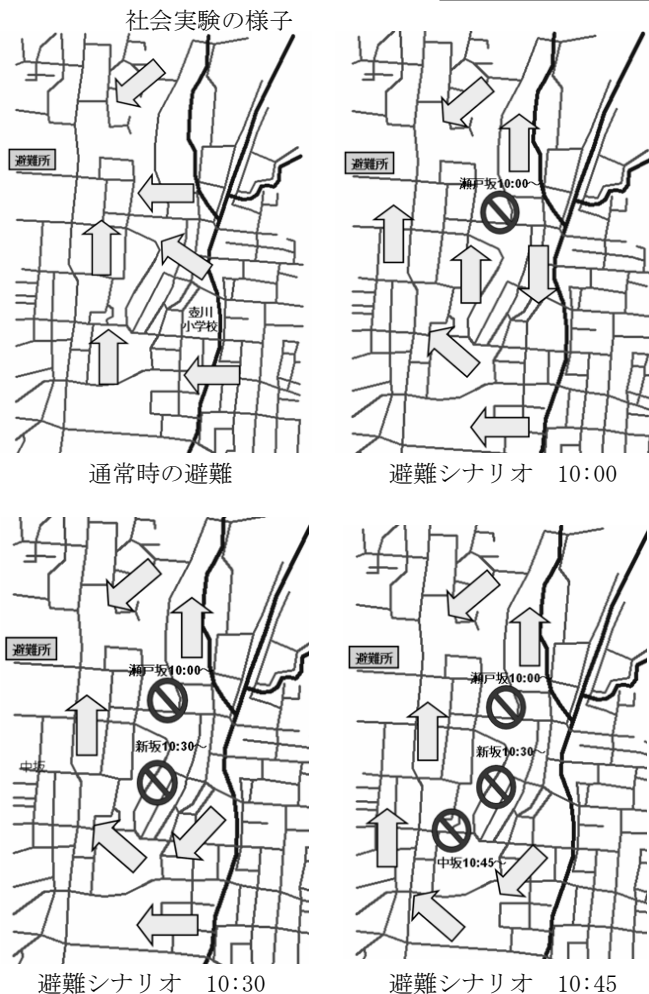


図-6 社会実験の様子とシナリオ

表-1 避難行動実験の結果(52世帯)

	平均	最大	最小
電話の受取待ち時間(分)	7.1	17.0	2.0
避難開始までの時間(分)	4.6	10.0	1.0
避難距離(m)	1300	2060	240
避難速度(m/分)	72	143	46
避難時間(分)	20	38	2

b) 避難行動実験の結果

避難行動実験で得られた参加者の避難距離、避難速度、避難時間等のまとめを表-1に示す¹²⁾。電話の待ち受け時間に関しては、平均で約7分、最大では17分を要している。また、電話を受けて実際に避難行動に移るまでに要した時間は、平均で約5分、最大で10分となった。従って、避難情報の発令タイミングは最大27分を考慮する必要がある。避難所までの各データの調査結果に関しては、避難距離の平均値は1,300m、最大では2,060mであり、避難に要した時間は平均で20分、最大で38分を要している。

(3) 内水氾濫による避難シミュレーションモデル

a) モデル領域

モデル領域は、縦1450m×横950mとした。道路網は、交差点206個あり、道路は317本となった。計算上の避難者は山田・柿本¹²⁾の避難行動実験への参加と同じとし、実際の住居を考慮して、図-7のように配置した。避難所は左上の壺川地域コミュニティセンターとし、社会実験と同じモデルに設定した。また、瀬戸坂などの通行困難地区は、時刻に対応して通行不能に設定した。交差点で住民が判断する項目は、避難所までの距離、河川からの距離、交差点標高とした。避難所や河川の距離ではCADのトポロジ解析機能を取り入れ最短ルートと距離を取得した。また、標高はLPデータからTINを構築し自動取得できるようにした。避難所認知率は100%とし、全員が避難所を目指すモデルとした。

b) 内水氾濫解析

避難行動実験に使用した想定シナリオは、2006年6月26日に壺川校区で発生した降雨に伴う内水氾濫の実績を参考に決定した。梅雨前線に伴い6月23日から降り出した雨は、3日間で250mmに達していた。そこに、26日の早朝(5~6時)降雨強度84mm/hの雨が降ったため、京町台地に降った雨が一気に低平地部に流れ込み、最大1mを越える内水氾濫が発生した。また、この時点で坪井川の水位は特別警戒水位を超えたが、それ以降、急に降雨がおさまったため、河川氾濫自体は免れた。そこで、避難訓練では、この内水氾濫後も激しい降雨が続き、坪井川の洪水氾濫が生じることを想定した¹²⁾。なお、内水氾濫解析手法に関しては、竹内ら¹³⁾と同様のレベル湛水法で行った。

内水氾濫解析結果(図-8)から浸水深さの空間分布に着目すると、瀬戸坂の対岸地域が初期から危険地域になり、10～30分後は新坂・壺川小学校が危険地域になる。その後は、壺川小学校の南部が危険地域になる結果となった。従って、避難ルートで新坂・壺川小学校付近を利用すると被害が拡大することが予想される。

C) 避難開始時刻

今回の避難行動実験では、避難開始時に参加住民全員が自宅に居ることを想定し、電話を使った避難情報の伝達を行った。その電話を受け取った後、避難の準備を行い、避難を開始するという手順で行った。そのため、避難行動実験での避難時間とは、以下の3つの時間:1)電話受取り待ち時間、2)避難準備時間、3)歩行時間の総和となる。避難シミュレーションにおけるそれぞれの時間は、避難行動実験で得られた最小値～最大値の範囲¹²⁾で、乱数を発生させて設定した(表-2)。

表-2 避難時間の概要

1)電話の受取り待ち時間	2～17分の乱数
2)避難準備時間	1～10分までの乱数
3)歩行時間	避難所までの距離/歩行速度(46～143m/分の乱数)



図-7 シミュレーションモデル

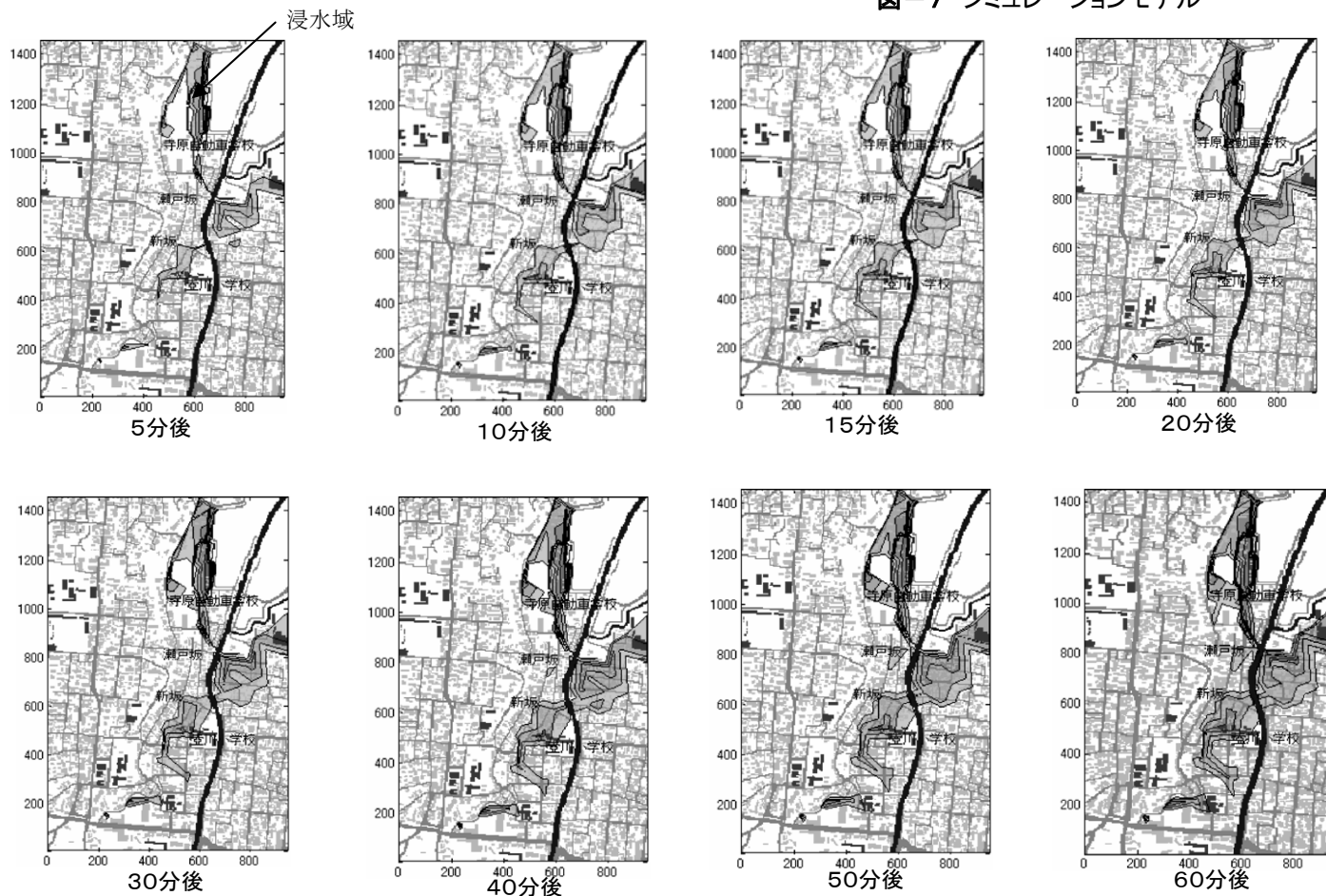


図-8 降雨による内水氾濫解析結果(浸水深)

5. シミュレーション結果と考察

今回の検討では、2つのケースを想定してシミュレーションを行った。ケースⅠは、エージェントが洪水状況は考慮せず現状の地形のみを考慮し、避難所までの最適なルートで避難していくことを想定した場合である。ケースⅡは、水害避難行動に関する社会実験の結果を受けて洪水状況を考慮した上で避難所までの最適なルートで避難することを想定した場合(瀬戸坂などの通行不能)である。図-9に2つのシミュレーション経過の違いを示す。

(1) 避難状況シミュレーション

ケースⅠでは瀬戸坂、中坂を経由して避難した。避難時間は最も早いエージェントで3.22分、最も時間のかかったエージェントで37.36分という値が得られた。なお、避難時間の値は20回のシミュレーションを行った結果の平均値である。

ケースⅡでは、15分後に瀬戸坂を迂回し(点線部)、中坂を経由するエージェントが見られた。この結果により通行不能を避難モデルが再現できていることになる。避難時間は最も早いエージェントで2.22分、最も時間のかかったエージェントで42.36分という値が得られた。瀬戸坂を迂回しているため、その分避難時間がかかっていることを示している。

上記の比較より、ケースⅠとⅡでは、避難経路が異なり、過去の災害経験などが無い住民の場合(ケースⅠ)、洪水時には危険とされる瀬戸坂を選択する可能性が高いことがわかった。この結果は、今後の避難計画や地域計画において参考とすべき重要な結果であり、今後のワークショップにおいて十分な説明も必要である。

(2) GPS計測結果比較

坪井川左岸住民の避難行動のGPS計測結果とケースⅡの避難状況を比較した結果を示す(図-10)。実線部で囲まれた坪井川左岸側の住民が実際に避難した経路と初期位置を同じにしたエージェントの軌跡を表示したものを示す。多くの住民の場合、(a)の避難経路を選択しケースⅡとはほぼ相違ない結果が得られた。ただ、少数の世帯で(b)②の経路を選択するという結果が得られた。②ルートは30分後に通行不能となるが、住民は30分以前に通過しているため問題なく避難できている。しかし①ルートの方が最短距離で、河川から遠ざかる安全なルートなのでこちらを選択するのが普通である。なぜ②を選択したのかは、今後、更なる調査が必要である。

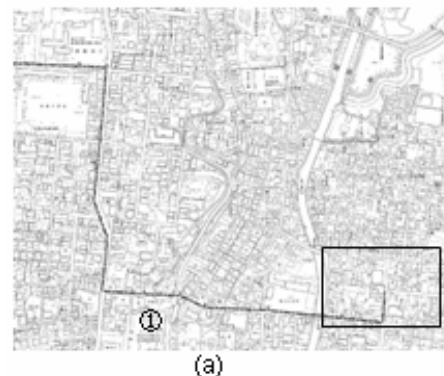


図-10 左岸側のGPS計測結果とシミュレーション結果

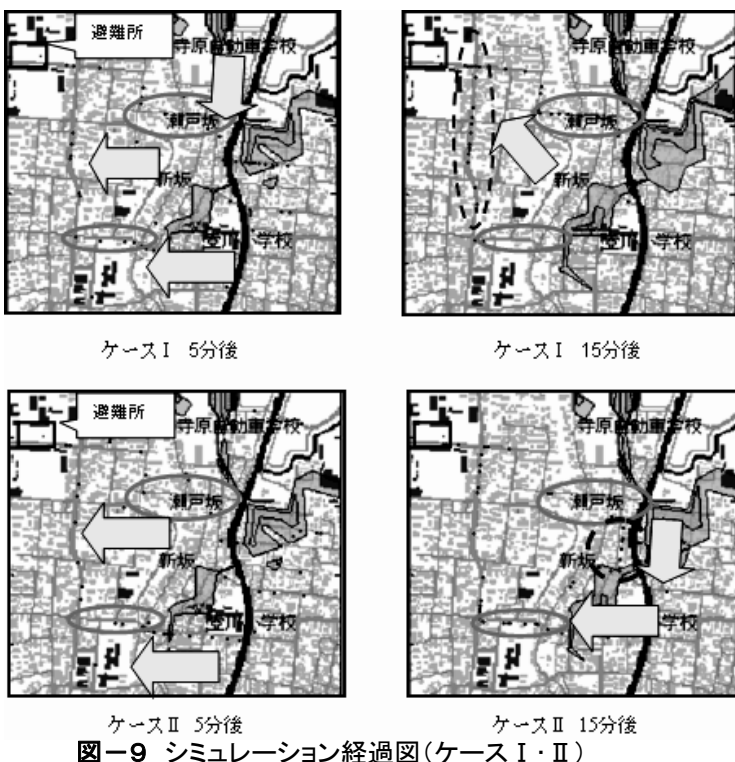


図-9 シミュレーション経過図(ケースⅠ・Ⅱ)

次に、坪井川右岸側の住民の実際の避難経路と初期位置を同じにしたエージェントの軌跡を表示したものを示す(図-11)。この場合、ケースⅡで示すシミュレーション結果と、ほぼ相違ない(a)の経路を選択したのは住民の1/3ほどで、残りの大半は(b)の点線部で囲まれた経路を選択した。また、少数住民が②の経路を選択した。点線部を利用した要因は、住民同士の追従性が上げられる。右岸住民は通常の避難の場合には瀬戸坂を利用することが予想されるが、今回の実験では通行不能となったため、付近の住民に追従し、このような結果になったと考えられる。シミュレーションでは、洪水氾濫の際に河川を横断する行動は一般的に危険とされるため、河川から遠ざかる判断を用いているため左下に避難するルートを選択していた。今後、住民の不安要素が大きいときには、追従性の比率を上げることができるように改造する必要がある。

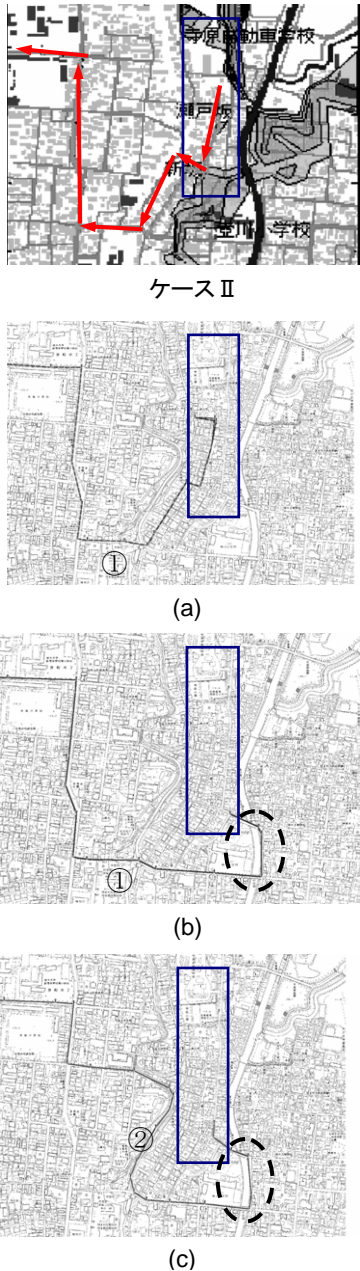


図-11 右岸側のGPS計測結果とシミュレーション結果

(3) 被害状況予測

次に、ケースⅠとケースⅡにおいて「住民」エージェントの電話受取待ち時間(絶対待ち時間)を0分、5分、10分、15分と設定し、その後の避難開始までは、ランダムで1~10分間の時間を与えたときの被害者数推移を比較した。

図-12の縦軸には被害者の人数、横軸にシミュレーション経過時間を示す。なお、これらの結果は20回のシミュレーションを行った結果の平均値である。

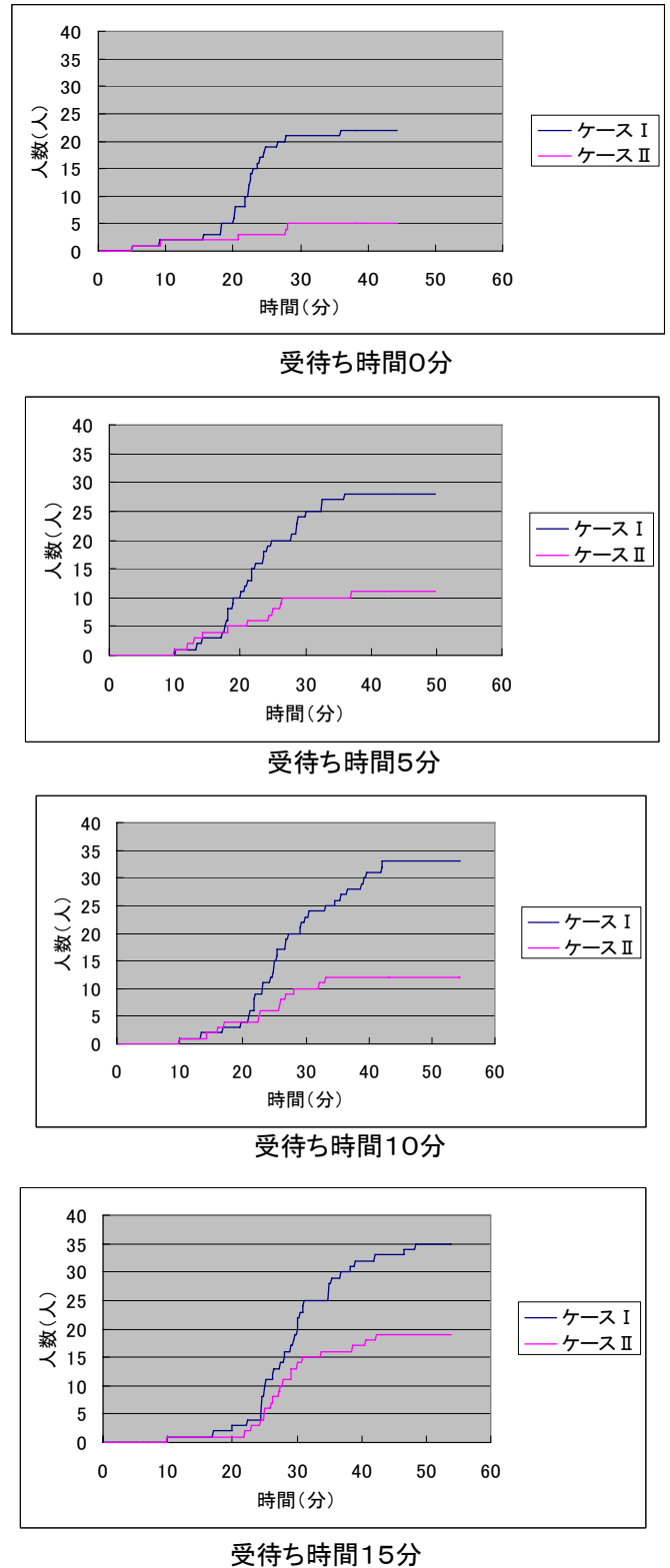


図-12 被害者の推移

ケースⅠとⅡを比較すると、被害者数では2～4倍になっている(表-3)。この結果から、事前に危険地域を知り、そこを避けて避難することが重要であることがわかる。またケースⅡで電話受待ち時間が0分と15分の結果を比較すると、被害者率が4倍になっていることが分かる(表-4)。この結果から、避難開始までの数分が被害結果を大きく左右することがわかる。

表-3 被害者数の比較

受待ち時間	0分	5分	10分	15分
ケースⅠ	22	28	33	35
ケースⅡ	5	11	12	19

表-4 被害者率の比較

受待ち時間	0分	5分	10分	15分
ケースⅠ	33%	42%	49%	52%
ケースⅡ	7%	16%	18%	28%

6. 結論

本研究では、地域の災害時の状況を忠実に再現することによって、地域住民はどのような経路で避難したらよいのが視覚的にも理解しやすい洪水・避難シミュレータ(動的な避難経路マップ)の開発を行った。そのために、現状の洪水ハザードマップの課題などを調査し、地域住民と行政のリスクコミュニケーションのツールとして利用できるように、より地域の実情を反映した精度の高いモデルの構築を目指した。さらに、構築したシステムを熊本市壺川校区の水害避難行動に関する社会実験に適用した結果、避難状況の時間経過、特に住民の避難経路選択について、実際の住民の避難行動(GPS解析結果)を少ないパラメータ数で再現可能であることがわかった。

本システムは、パラメータを変更することで、各種のケースに対応可能であり、被害者数、及び避難者の軌跡、避難時間などを視覚的に表現することができるので、一般住民に対してのリスクコミュニケーション支援ツールとして有効な手法であると考えられる。洪水ハザードマップに対応した地域避難経路マップは、作成する過程から地域住民が参加し、洪水氾濫が発生した場合、どのような行動を取れば住民の生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充実させることが必要である。本研究で開発した洪水・避難シミュレータは、課題もあるものの、現段階で十分に活用できるものと考えている。今後は、避難住民同士の追従性や相互作用を組み入れて検討できるようにし避難経路についてより精度の高い判断を行うための総合判断式を改良し、シミュレータ自体の表現精度の向上や表現内容の充実化などを改善していく必要がある。

さらに、地域コミュニティにおいて、住民、行政、専門機関が積極的に本システムを活用する機会がなければその有効性は発揮できない。筆者らは、本システムを活かし、

今後の防災対策や防災教育を地域に根ざした活動として継続させてゆきたいと考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局ホームページ：
<http://www.mlit.go.jp/river/>、2007/02 現在。
- 2) 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、pp391-409、2002。
- 3) 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志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。
- 4) 国土交通省河川局：洪水ハザードマップ
<http://www.mlit.go.jp/river/saigai/tisiki/syozaiti/>
- 5) 片田敏孝、児玉真、佐伯博人：洪水ハザードマップの住民認知とその促進策に関する研究、土木学会水工学論文集、第48巻、pp.433-438、2004
- 6) 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。
- 7) 新井健、増田浩通、落合哲郎：災害弱者を考慮したマルチエージェント避難シミュレーションモデル、第3回 KK-MAS コンペティション、
http://mas.kke.co.jp/event/mas_competition3/、2007/02 現在
- 8) 大飼洋平、小国健二、堀宗朗：避難行動予測のための計測に基づくマルチエージェントシミュレータの開発、応用力学論文集、Vol.8、pp.629-636、2005。
- 9) 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、土木情報利用技術論文集、Vol.14、pp.1-6、2005。
- 10) 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。
- 11) 須賀堯三、上阪恒雄、吉田高樹、浜口憲一郎、陳志軒：水害時の安全避難行動(水中歩行)に関する実験、水工学論文集、39巻、pp.879-882、1995
- 12) 山田文彦、柿本竜治：水害リスクコミュニケーションによる地域防災力向上の試み、坪井川とともにくらす、熊本大学政策創造教育研究センター編、成文堂、pp.133-157
- 13) 竹内秀典・殿最浩司・真期俊行・安藤龍平・井上雅夫：短時間越波量を考慮した堤内地における越波浸水に関する研究、海岸工学論文集、Vol.51、pp.621-625、2004。

(2007.5.18受付)