

リスクコミュニケーションを通じた実践的水害避難訓練に基づく避難行動シミュレータの構築*

An Evacuation Simulator based on a Practical Evacuation Drill through Risk Communication*

柿本竜治**・山田文彦***・田尻亮司****・原田翔太*****

By Ryuji KAKIMOTO**・Fumihiko YAMADA***・Ryoji TAJIRI****・Shota HARADA*****

1. はじめに

従来の災害リスク管理は、ハード対策を中心とする行政の公助に多くを依存してきたが、近年の財政状況の悪化によりそのハード対策は縮減を余儀なくされている。また、想定した計画規模を超える外力変動は常に存在するため、ハード対策のみで災害リスク管理を行うのは非常に危険である。そこで、今後の地域災害リスク管理として、地域住民や地域コミュニティが主体となって行政や専門家などと連携を取り、自助・共助の取り組みを実効性のあるものとするのが重要となっている。そこで、近年注目されているのが、災害リスク管理に対するリスクマネジメント手法の適用¹⁾である。

リスクマネジメントとは、リスクを回避・低減するために様々な手段を講じ、リスクを総合的に管理するというシステムのことである。広義的な概念としては、リスクの生起確率ないし、リスクの発生時の損害そのものを減少させる技術であるリスクコントロール、災害時により生じた被害を社会全体に分散させる技術であるリスクファイナンスの2つから構成される¹⁾²⁾。水害におけるリスクマネジメントの内容としては、①常時水害を監視し、発生を的確に予測すること、②予測される水害に対する対策を迅速かつ効果的に実施すること、③水害時に個人が的確な行動を取れるように水害や対応行動に関する教育・訓練を計画・実施することなどが含まれる³⁾。また、リスクコミュニケーションを通してリスクコントロールとリスクファイナンスを結びつけることが地域防災力の向上の鍵と考えられるが現在までのところ水害分野においてそのような実践的研究例は非常に少ない⁴⁾⁵⁾。

筆者らは、上記の③に関して継続的に実施するワークショップ(WS)形式の水害リスクコミュニケーションに取り組んでいる⁶⁾。そこで、本稿では、まず我々が取り組んでいる水害マネジメントのフレームを整理し、こ

*キーワード：リスクコミュニケーション、ワークショップ、洪水リスクマネジメント、洪水、避難訓練

**正員、博士(学術)、熊本大学政策創造研究教育センター(熊本県熊本市黒髪2丁目39番1号、TEL096-342-2040)

***正員、博士(工学)、熊本大学大学院自然科学研究科

****非会員、工学士、熊本市危機管理防災室

*****正員、修士(工学)、建設技術研究所 大阪支社

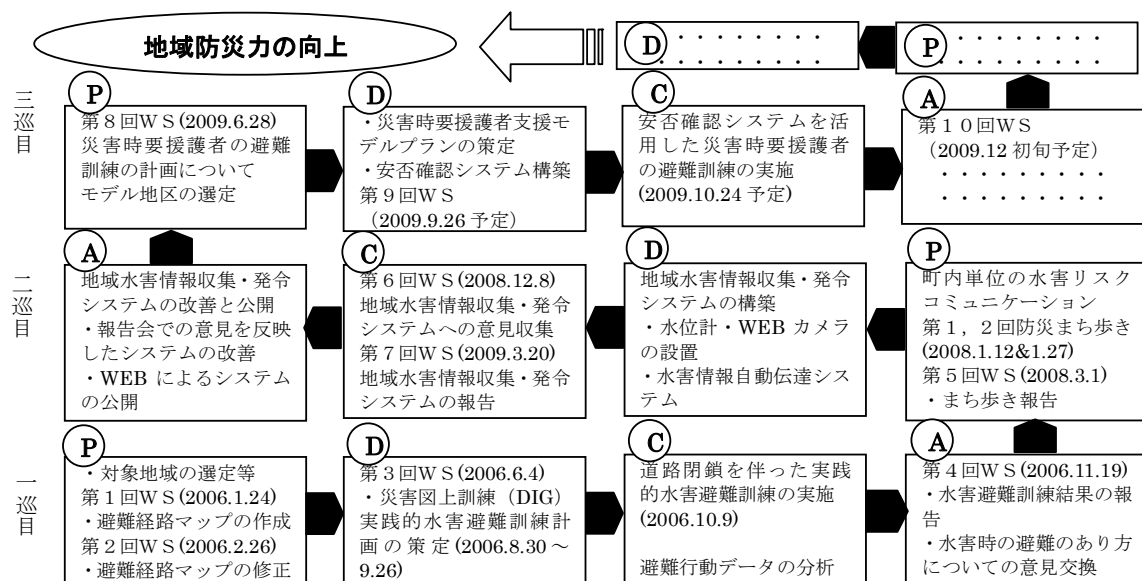
れまで取り組んできた地域防災力向上の取り組みの概要を示す。次に、これまでのWSを通じて地域防災活動の必要性を理解してもらった上で行った実践的水害避難訓練の結果を示す。その水害避難訓練のデータに基づいてシミュレーションの精度を検証しながら水害避難行動シミュレータを構築する。最後に構築したシミュレータのリスクコミュニケーションの支援ツールとしての適用性を考察する。

2. 水害リスクマネジメントと支援ツール

(1) 水害リスクマネジメントのフレーム

本研究では、水害リスクコミュニケーションを中心にした水害リスクマネジメントを、1)水害に対する防災対策や避難計画検討プロセス(Plan)、2)計画された対策や避難計画の導入を行うプロセス(Do)、3)対策や避難計画の導入後の観察・診断プロセス(Check)、4)対策や避難計画の変更・修正を行うプロセス(Action)、の4つのプロセスを持つPDCAサイクルとして捉えている⁶⁾⁷⁾。このPDCAサイクルに基づいた水害リスクマネジメントを、実際のフィールドに適用する際には、図-1に示すようにPDCAサイクルを循環させる毎に地域の実情に応じて水害リスクコミュニケーションのレベルを発展させている⁸⁾。図-1にしたがって、熊本市壺川地区で取り組んでいる水害リスクマネジメントを以下に説明する。

1巡目のPDCAサイクルのPlanとして、対象地域での水害時の避難経路の策定を行った。第1回ワークショップ(WS)において、洪水ハザードマップの説明と詳細な洪水氾濫結果をアニメーションで示し、対象地域の住民に地域の洪水リスクの理解を促した。その上で、地域の過去の水害履歴や経験に基づき参加者自身でオリジナル防災・避難経路マップ(マイハザードマップ)の作成を行った。第2回WSにおいて、第1回WSで収集した地域の内水氾濫状況を反映させた洪水氾濫のシミュレーション結果と水害意識調査の結果を住民に示した。そして、マイハザードマップの修正を行い、洪水時の避難場所までの避難経路を策定した。Doとして、第3回WSにおいて、作成したマイハザードマップを用いて内水・洪水氾濫シナリオに基づき災害図上訓練(DIG)を



図ー1 PDCAサイクルとしての水害リスクマネジメント

実施した。その後、地域住民の代表とともに水害避難訓練計画の策定を行った。Check として、地域住民が参加した時間的な氾濫水の広がりによる通路の遮断（トラップ）を考慮した水害避難訓練を実施し、避難行動データの分析を行った。そして、Action として、第4回WSにおいて水害避難訓練の報告会を開催し、洪水時の避難のあり方について意見交換を行った。

以上の1巡目のPDCAサイクルを通じて実施した水害リスクコミュニケーションが住民の自助や共助の意識を高揚させる有効な手段であることは分った。一方、地域の実情に応じたきめ細かな防災・減災対策が必要であることも分った。そこで、2巡目のPDCAサイクルのPlanとして、対象地域の中でも特に洪水危険度が高く自主防災組織が存在する町内を抽出し、防災まち歩きを行った。防災まち歩きを通じて、過去の災害の痕跡や今後気を付ける事・場所を話し合い町内単位ハザードマップの作成を行った。第5回WSにおいて、この防災まち歩きの報告を行い、町内ごとの一時避難場所の必要性や頻発する内水氾濫の情報収集と伝達が不足しているなど地域防災に関するニーズを把握した。そして、Doとして、地域水害情報収集・警報発令システムの構築を行った。このシステムは、対象校区内の内水・外水氾濫が起きやすい場所に水位計・雨量計・WEBカメラを設置し、警戒値を超えた段階で、警報サイレン・電子メール・ミニFM等の複数手段を利用し、氾濫発生の際の警戒情報を校区内の住民に自動的に伝達するものである。第6, 7回WSでは、Checkとして、この地域水害情報収集・警報発令システムの問題点や意見を地域住民から収集し、システム運用上の改善点を探った。そして、Actionとして、地域水害情報収集・警報発令システム

を改善し、WEBにより公開した。この2巡目のPDCAサイクルを通じて、地域での災害時要援護者の支援問題が浮き彫りになってきた。

現在3巡目のサイクルに取り組んでおり、そこでは、災害時要援護者支援モデルプランの策定や避難訓練を計画している。このように、現在取り組んでいる水害リスクマネジメントは、地域の実情に応じてリスクコミュニケーションの内容をスパイラルアップさせるものであり、継続的な地域防災力の向上に資するものである。

（2）水害リスクコミュニケーション支援ツール

リスクコミュニケーションを継続的に発展させていくためには、WSの開催やリスクコミュニケーションの各発展段階で適切な支援ツールを使用することが効果的であろう。近年、戦略計画のフレームを援用したWS⁹⁾やSWOT&四面会議システムを援用したWS¹⁰⁾など地域防災計画の策定を機能的・効率的に行えるようWSのフレームの改善に取り組んだ研究が見られる。それに対して本研究では、WSや水害避難訓練を通じて地域住民から降雨時の地域の詳細な情報やデータを得ることで、リスクコミュニケーションの際に提供する情報が更新されていく双方向型情報交換プロセスを重要視している。そのプロセスがリスクコミュニケーションの継続力を生み出す地域防災教育のフレーム作りを目指しており、水害リスクマネジメントをPDCAサイクルのフレームで捉えている理由である。

片田ら¹¹⁾は、洪水ハザードマップを行政と住民とのリスクコミュニケーションのための一つのツールとして活用することを提唱している。また、同時にリスクコミュニケーションの動機付けに避難場所や避難経路などの

情報が不十分な「粗なマップ」の効用を示唆している。現在取り組んでいる水害リスクマネジメントでもリスクコミュニケーションへの動機付けのツールとして行政が配布している洪水ハザードマップを用いている。洪水ハザードマップ以外にも、氾濫解析結果のアニメーション、マイハザードマップ、洪水シナリオ、洪水・避難シミュレータ、浸水被害額シミュレータ等を水害リスクコミュニケーション支援ツールとして用いている。

このようなリスクコミュニケーション支援ツールに関する研究はこれまで数多くなされている。たとえば、飯田ら¹²⁾や片田ら^{5) 13)}は、希少現象である洪水時や津波時の地域の状況をシミュレーションで地域住民に示し、地域防災に対する意識改善や知識向上を促すことを試みている。また、川崎ら¹⁴⁾は、ハザードマップの情報の質の問題に着目し GIS を活用して各種災害情報と詳細な地域情報が一元化された総合的なハザードマップの提供を試みている。これらの支援ツールに共通しているのは、住民に対して一方向的に情報提供を行う仕組みになっていることである。一方、川島ら⁴⁾は、地域住民が考える避難行動計画の自発的な試行を可能にし、行政が持つ水害リスク情報との双方向的なインタラクションや避難行動に関する他者とのコミュニケーションを実現する水害リスクコミュニケーション支援システムを開発している。この支援システムは、GIS をベースに家屋・家財のリスク表示、氾濫アニメーション、避難シミュレータをアプリケーションとして備えた総合的な水害リスクコミュニケーション支援システムである。それに対し本取り組みでも各種の水害リスクコミュニケーション支援ツールを用いているが、基本的にリスクコミュニケーションの各発展段階を支援する個別ツールであり既存の支援ツールの援用にすぎず、川島ら⁴⁾や桑沢ら¹⁵⁾が提案するような統合化されたリスクコミュニケーション支援システムを構築しているわけではない。氾濫解析にしても洪水シナリオにしても住民とのリスクコミュニケーションを通じて住民から得られる情報を適宜反映させることが柔軟に出来るようアナログ的な部分が多く残されている。本取り組みのリスクコミュニケーションは、双方向での情報交換を基本としているため支援ツール自身に住民が入り込む余地を残している。

本研究では、現在構築中の支援ツールの内、水害避難行動シミュレータに焦点を絞る。地域のきめ細かな実情が考慮できる数値シミュレーションは、公共の避難場所の検討への支援や防災教育の支援にしばしば用いられているが、詳細な精度検証が行なわれないまま使われている場合も多い^{16), 17)}。そこで、水害避難行動シミュレータの精度検証の方法の提案とその手法を用いた精度検証を行い、地域水害リスクコミュニケーション支援ツールとしての避難行動シミュレータを構築する。

3. 水害避難訓練の社会実験

(1) 対象地区の概要

対象地域の熊本市壺川校区は、南北・東西方向ともに約 1 km 四方程度の大きさがあり、約 8400 人（約 4000 世帯）がそこに居住している。65 歳以上の高齢者が校区住民の約 20%を占めており、また、約 400 世帯が高齢単身世帯である。校区の中心部を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、鹿本郡植木町の東南を源として南下し、堀川と合流し熊本市中心部を経て植木台地と金峰山東側の伏流水を源とした井芹川と併せ、有明海に注いでいる。

熊本市壺川校区は、これまで何度も水害に見舞われてきた。1953 年 6 月の降雨量は 1,000mm を越す記録的なものとなり、6 月 26 日に熊本市を流れる白川、坪井川、井芹川が氾濫し、「6・26 大水害」に見舞われた。熊本市内が水没し、大量の泥土が市内を埋め、最終的に死者行方不明者は 563 人に上った。また、1957 年 7 月 26 日の大水害では、井芹川、坪井川両水系の氾濫で、下通り町など熊本市の中心街をはじめ西部一帯が水浸しとなり、金峰山周辺の各地で山津波やがけ崩れが起こり、死者 171 人、家屋全半壊 287 戸、流出 76 戸もの犠牲を出した。この水害時の坪井川の流量は泥川付近で 320m³/s であり、これが現在の坪井川の河川整備基本方針での基本計画高水となっている。なお、現在の坪井川の通水能力は泥川および壺川校区付近で 190m³/s であり、50 年確率で堤防等の河道や遊水地の整備が行われている¹⁸⁾。図-2 に示すように壺川校区の中で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（標高 30~40m T.P.）と危険性の高い低平地（標高 10m T.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多数の死傷者を出した洪水氾濫を経験しており、住民からの水害を想定した避難訓練の要望は高く、熊本市において水害防災教育の必要性が高い校区の一つとなっている。

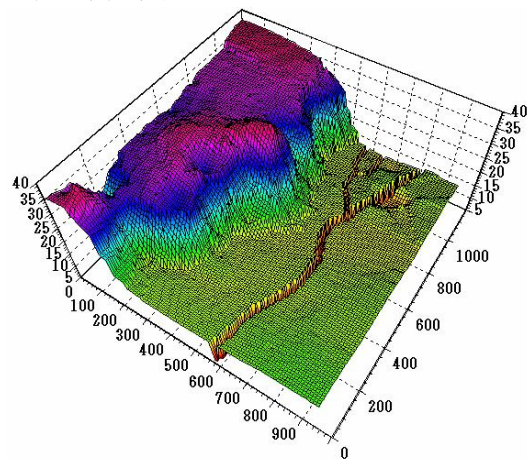


図-2 対象地区の地盤高の鳥瞰図

（２）水害避難訓練のシナリオ

水害避難訓練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）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、寺原・壺川付近で最大 1m を越える浸水（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、急に降雨が治ったため、河川氾濫自体は免れた。そこで、水害避難訓練では、この内水氾濫後も激しい降雨が続き、坪井川で洪水氾濫が生じることを想定したシナリオを作成した。内水氾濫水が時間的に広がり、通路を遮断するトラップはレベル湛水法¹⁹⁾により、15 分ごとに計算シミュレーションで再現した。

洪水ハザードマップ上で避難場所と指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ため、水害避難訓練における避難場所は、京町台地の壺川地域コミュニティセンターとした。避難訓練開始後、時間の経過とともにトラップが設定され、通行不可能となる道路については参加者には事前に通知しておらず、設定時間になると交差点に配置された計測係が、この先は通行不可能となったことを直接住民に知らせる方法を取った。なお、住民避難行動データの取得は、①実験に参加する住民は番号のついたゼッケンを全員着用し、計測係が校区内の道路交差点（27 地点）で、交差点を通過する住民のゼッケン番号・通過時間・進行方向を記録、②GPS 機能付き携帯電話 30 台を低平地に居住する住民に事前配布し、実験開始後 2 分毎に位置情報を取得（KDDI の GPSMAP サービスを利用した）、③避難指示の連絡体制として、今回、電話連絡網を利用したので、電話連絡を受けた時刻および避難を開始した時刻を各住民が記録、の 3 つの方法で行った。

（３）水害避難訓練の社会実験の結果

水害避難訓練は、2006 年 10 月 9 日(10:00-12:00)に壺川校区住民 86 名（52 世帯：大人 55 名、子供 31 名）参加のもと実施された。また、行政関係者 8 名、NPO 関係者 1 名、大学関係者 46 名が水害避難訓練のサポートにあたった。

電話連絡網に関する結果では、今回参加いただいた中での最大受け時間は約 17 分であった。また、避難指示を受けて実際に避難行動に移るまでに要した最大時間は 10 分であった。この結果、86 名の方が連絡を受けて、全員が自宅を出るまでには最大 30 分程度を要したことになる。

表－1 避難行動解析結果

		平均	最大	最小	標準偏差
避難速度 (m/分)	全員	72	143	46	19
	高台側(京町)	83	143	55	25
	低地側(壺川・坪井)	67	103	46	13
避難距離 (m)	全員	1,300	2,060	240	537
	高台側(京町)	684	1,130	240	241
	低地側(壺川・坪井)	1,600	2,060	580	358
避難時間 (分)	全員	20	38	2	8
	高台側(京町)	10	17	2	5
	低地側(壺川・坪井)	25	38	8	7

表－1 に避難訓練結果を示す。多くの自治体では避難計画において、車の利用を控え徒歩による避難を前提とし、歩行速度は水害時の悪条件を考慮して 33m/分（2km/h）と想定している。また、避難場所までの移動距離は 1 時間以内に移動できる距離とし、概ね 2km 前後としているものが一般的である²⁰⁾。今回計測した避難速度を壺川校区の避難計画に反映してゆくためには、その最小値に注目する必要がある。今回の水害避難訓練における避難場所を、京町台地の壺川地域コミュニティセンターに設定したため、高台にある京町地区に比較して低平地にある壺川・坪井・寺原地区は高低差 30 m を越える坂を上る必要がある。そのため壺川・坪井・寺原地区の避難速度は京町地区より遅くなり、その最小値は 46m/分（2.8km/h）であった。今回の避難訓練時の天候は晴天であったが、水害時の悪条件では避難速度がさらに遅くなるので、一般的な避難計画で想定される避難速度 33m/分（2km/h）で壺川校区の避難計画を立案することは妥当と考えられる。

最後に、避難場所に関しては、参加者の避難距離の平均値は 1,300m、最大値は 2,060m であり、また、避難に要した時間は平均で 20 分、最大で 38 分も要している。実際の水害時にはさらに時間が必要となることから、高低差 30 m を越える高台のみに避難所を設置することは、高齢者や障害を持った方などの災害弱者に対しては最適な配置であるとは言い難い。次章以降では、これらの避難訓練データで精度検証を行いながら、一時避難場所を検討するための水害避難行動シミュレータを構築する。

4. 水害避難行動シミュレータ

（１）シミュレータの概要

本研究では、水害避難行動シミュレータにはマルチエージェントモデル^{16),21)}を用いる。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。このシミュレーションでは、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、避難場所へ移動するための避難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、避難場所までの距離、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場所を目指していく。「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する。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、このシミュレーションでは、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。

シミュレーションを行うにあたり、対象とする地域の道路網を、図-3に示すような216のノードと326のリンクで構成した。この道路ネットワークは、徒歩での避難行動に影響のあるノード間の標高差を考慮するため、各ノードにはLPデータから得られた標高が与えられており、3次元ネットワークとなっている。

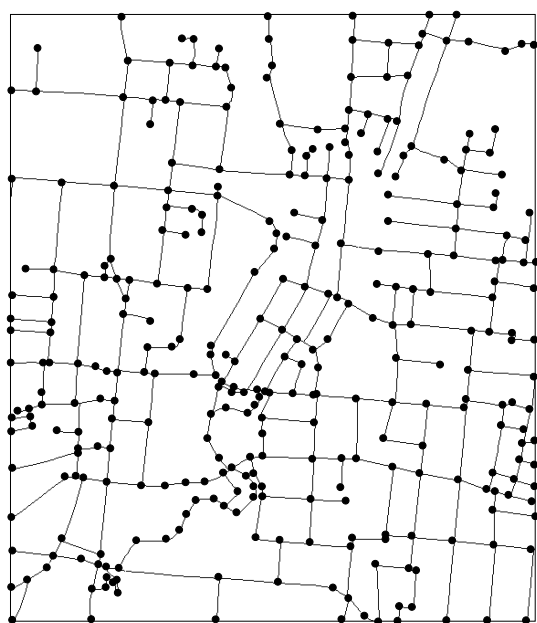


図-3 対象地域の道路ネットワーク

(2) 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-4に示す移動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を用いた。経路選択を行う際、各エージェントは各々の経路に対し、「避難場所に近づくか(+α)」、「川から遠ざかるか(+β)」、「標高が高くなるか(+γ)」、「周囲に避難者がいるか(+θ)」の条件を満たせば()内のポイントを、以下の式(1)を用いて加算する。 S は経路ごとのポイント合計値である。

$$S = \alpha + \beta + \gamma + \theta \quad (1)$$

ここで、 $i=2, 3, 4, \dots$ (i の値は交差点の接続点数によって変化)である。全ての接続点について総合的判断を行い、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、総合的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、上記の条件の他に、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。したがって、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は考慮できることである。

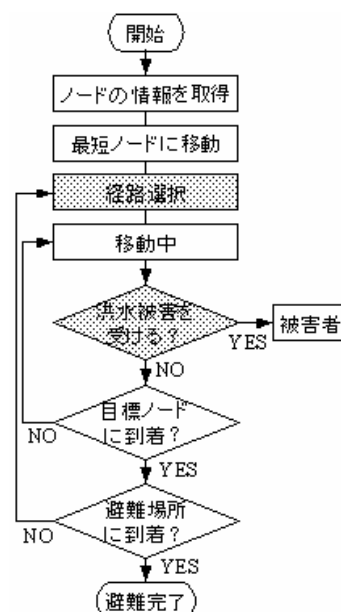


図-4 移動アルゴリズム

5. 水害避難行動シミュレータの精度検証の方法

(1) 精度検証概要

実践的水害避難訓練のデータを用いた水害避難行動シミュレータの精度検証の方法を提案する。精度検証では、避難経路に着目した空間的再現性と、避難完了時間と避難完了率に着目した時間的再現性について検討した。空間的再現性と時間的再現性を評価する際は、全参加者が避難場所に避難した避難訓練のデータと比較するため、全住民エージェントが避難場所に無事到達するように式(1)の避難場所までの距離パラメータ α の値を最大に設定した。すなわち、避難場所へ効率的に移動するような設定とした。なお、避難訓練のデータはGPS機能付携帯電話を所持し、避難行動シミュレーション対象範囲で避難した低地側25人の住民のデータを用いて精度検証を行う。また、避難行動シミュレータ内の住民エージェントの初期位置は、精度検証の対象住民の避難訓練時の初期位置とし、そこからの避難行動をシミュレーションした結果を避難訓練時の避難経路と比較する。空間的再現性の検証には経過時間に伴うXY座標、時間的再現性には経過時間データを用いる。なお、避難訓練ではXY座標を約2分間隔でGPS計測しているが、避難行動シミュレーションでは10秒間隔でXY座標データを取得する。

(2) 空間的再現性の検証方法について

避難訓練と避難行動シミュレーションの避難経路に着目し、両者の避難経路の空間的誤差により空間的再現性を評価する。ここで、空間的誤差は、避難訓練時の避難経路と避難行動シミュレーションによる避難経路との差である。具体的には、図-5に示すようにGPS_iを避難訓練時のGPS計測点、MAS_jを避難行動シミュレーションによる避難経路上の10秒間隔の点を表しているとす。ある住民Nについて、避難訓練時の避難経路上にあるGPS計測点から避難行動シミュレーションによる避難経路上の全座標点までの距離を求める。その中の最短を l_{iN} とし、ある住民Nについて l_{iN} の総和を求める。避難訓練時の住民Nの総避難距離 L_{GPS} に対して、その総和がどの程度であるかを空間的誤差 E_a^N として式(2)のように定義する。

$$E_a^N = \frac{\sum_{i=1}^n l_{i,N}}{L_{GPS}} \times 100(\%) \quad (2)$$

GPS計測点を誤差評価点GPS_iとして空間的誤差を評価すると計測点数が人により異なり、最短距離 l_{iN} の総和にばらつきが生じ25人分の空間的誤差を同等に評価できない。そこで、すべての人の避難経路を同じ分割数で分割し、その分割点を誤差評価点GPS_iとする。

しかし、この場合でも分割数の違いにより同じ経路の空間的誤差の評価値に差が生じる。そこで、式(3)で与

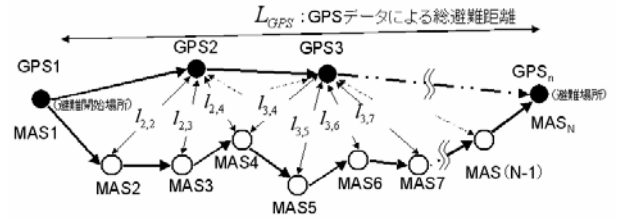


図-5 空間的誤差検討方法

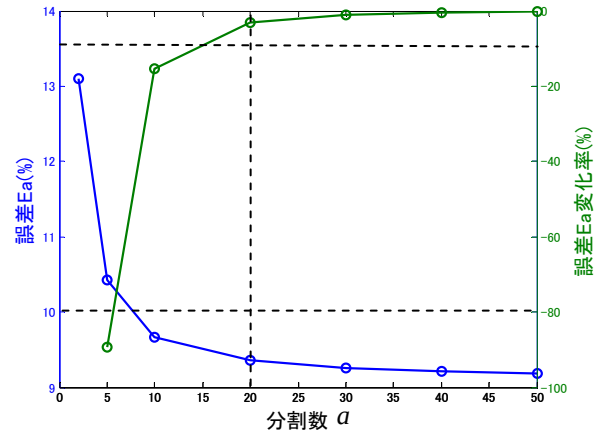


図-6 分割数と空間的誤差と誤差の変化率の関係

えられる避難訓練時の避難経路1分割あたりの空間的誤差 E_a^N が安定する分割数に分割することとする。ここで、 a は分割数である。

$$E_a^N = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^{a+1} l_{i,N} / L_{GPS} \times 100(\%) \quad (3)$$

空間的誤差評価に適当な分割数 a を求めるため、分割数を0から順次5分割増加させていき50分割した場合までの E_a^N を精度検証対象の25人分をそれぞれ算出した。各分割数での25人の E_a^N の平均および5分割増加させたときの平均の変化率を図-6に示す。分割数 a が増加すると1分割あたりの空間的誤差の平均は減少し、その変化率はゼロに近づいていくことが分る。20分割で E_a^N の平均は10%以下となり、それ以降分割数を増加させても E_a^N の平均はあまり減少しない。 E_a^N の平均とその変化率の変化が緩やかになり、 E_a^N の平均が安定するのは、分割数20辺りである。そこで、本研究では適当な分割数を20とし、空間的再現性を検証する。

空間的再現性を検証するにあたり式(2)の考え方をを用いるが、避難訓練時に計測したGPS計測点から避難行動シミュレーションによる避難経路上の座標点までの最短距離ではなく、避難訓練時の避難経路を20分割した分割点から避難行動シミュレーションによる避難経路上の座標点までの最短距離を用いて、避難訓練と避難行動シミュレータの空間的誤差を評価した。最終的に空間的誤差の評価 E_{N2} は、式(4)で与えられる。

$$E_{N2} = \frac{\sum_{i=1}^{21} l_{i,N}}{L_{GPS}} \times 100(\%) \quad (4)$$

本研究では、空間的再現性の検証の指標として、この E_{N2} を用いる。

(2) 時間的再現性の検証の方法

避難訓練と避難行動シミュレーション結果の経過時間 $T(\text{min})$ と避難完了率 $R(\%)$ の関係を図-7の上段に示す。なお、避難行動シミュレーションの結果は、危険箇所の「瀬戸坂」を回避させるルールと、避難速度 $V=22.2\sim76.8\text{m/min}$ のパラメータを与えた場合の結果である。全員が避難完了した時間は、避難訓練の場合 50.38 分、避難行動シミュレーションの場合 68.67 分であり、その差 T_e は、18.28min である。この T_e が小さいほど高い再現性があると見なせ、この T_e を時間的再現性の 1 つの指標とする。

次に経過時間に伴う避難完了率の増加傾向の一致度を検討する。避難訓練時の全員の避難完了時間、および避難行動シミュレーションでの全員の避難完了時間で、それぞれの経過時間を除して無次元化した経過時間 T^* と避難完了率 $R(\%)$ の関係を図-7の下段に示す。無次元経過時間を b 分割し、分割点 $i(i=1\sim b-1)$ の経過時間における避難訓練と避難行動シミュレーション結果の避難完了率の差を $e_i(\%)$ とし、その総和を分割点数分($b-1$)で除した値 E_t は、式(5)で与えられる。

$$E_t = \sum_{i=1}^{b-1} e_{ti} / (b-1) \quad (\%) \quad (5)$$

E_t は無次元経過時間の分割点における避難訓練と避難行動シミュレーション結果の避難完了率($\%$)の差の平均を表している。しかし、前節の空間的誤差と同様に分割数によりこの値も変化する。そこで、分割数と E_t の関係、およびその変化率の関係を図-8に示す。分割数の増加に伴い E_t は減少し、その変化率はゼロに近づいていくことが分る。 E_t とその変化率の変化が緩やかになり、 E_t が安定するは分割数 70 以上である。そこで、本研究では妥当な分割数を 70 として E_t を算定し、 T_e とともに時間的再現性の指標としてシミュレータの精度検証に用いる。

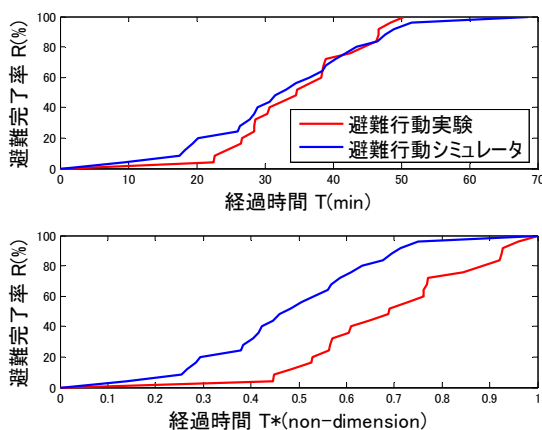


図-7 経過時間と避難完了率の関係
(上段：実時間，下段：無次元時間)

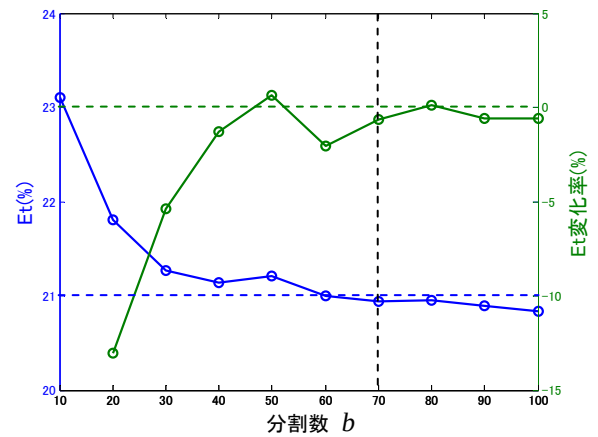


図-8 分割数と避難率誤差・避難率誤差変化率の関係

6. 避難行動シミュレータのパラメータの決定

(1) 空間的再現性検証

本章では、前章で提案した空間的再現性・時間的再現性の検証方法を用いて、水害避難行動シミュレータのパラメータ・ルールについて検討する。

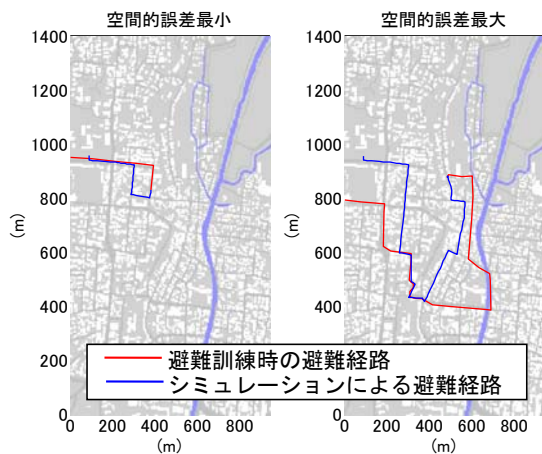
まず、豪雨時には高台に降った雨が流れ降りてくるため危険箇所と考えられる「瀬戸坂回避」の有無(図-9参照)による空間的再現性を検討する。シミュレータのルールに「瀬戸坂回避」を設定した場合としない場合の空間的誤差 EN_2 の統計量を比較した結果を表-2に示す。危険箇所である瀬戸坂を回避した場合、通過した場合と比べて誤差の平均値がほぼ半減する。このことから瀬戸坂を回避した避難行動シミュレーションの方が、空間的再現性が良いことが確認される。表-2の瀬戸坂を回避した場合の空間的誤差 EN_2 が最小と最大の場合の避難訓練時とシミュレーションによる避難経路を図-10に示



図-9 危険箇所の位置

表-2 危険箇所回避有無による EN_2 の統計量の比較

EN_2	瀬戸坂通過	瀬戸坂回避
平均値	203.53	109.26
最大値	347.92	252.26
最小値	98.08	45.21
標準偏差	63.37	50.40



図－１０ 空間的誤差最小・最大の避難経路図

表－３ 経路遮断タイミングによる E_2 の統計量の比較

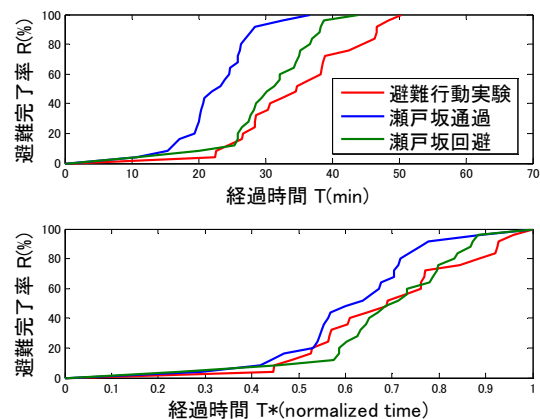
E_2	避難経路遮断なし	10 分後避難経路遮断	15 分後避難経路遮断
平均値	109.26	101.52	117.69
最大値	252.26	251.41	251.41
最小値	45.21	15.40	15.40
標準偏差	50.40	62.67	59.58

す。空間的誤差 E_2 が最大の場合、中坂付近では避難経路には空間的誤差は見られないが、中坂に差し掛かるまでに避難経路に避難訓練時とシミュレーションとで違いあることが確認できる。

次にある一定の経過時間後に図－９に示される「新坂」を通行不可とし、「中坂」を通過する設定の有無による空間的再現性を検討する。避難訓練時には避難開始 30 分後に、実際に「新坂」を通行不可とし、「中坂」へと誘導を行っている。避難行動シミュレータにおいて避難訓練と同様に 30 分後に「新坂」を通行不可とした場合、シミュレーションでは連絡時間や避難準備時間を無視しているため 30 分より前に全住民エージェントが新坂を通過してしまう。そこで、経路遮断のタイミングを 10 分後と 15 分後の 2 ケースで検討した。また、避難速度は一般的な避難計画作成時に用いられる 33m/min を用いた。「新坂」の避難経路遮断のタイミングの違い、および避難経路遮断なし（瀬戸坂回避は有）の場合空間的誤差 E_2 の統計量を比較した結果を表－３に示す。10 分後に「新坂」を遮断し「中坂」を通行するようにした場合の空間的再現性が最も良い結果となった。ただし、空間的誤差の平均値が 100%を下回ることにはなかった。本研究で用いた空間的誤差 E_2 は、経路の分割数に依存した値をとるため空間的再現性の絶対的な評価とはならない。空間的再現性の絶対的な評価を行うためには、経路迂回率等を考慮する必要がある。

（２）時間的再現性検証

本節では、避難行動シミュレータの時間的再現性を指標 T_e と E_t を用いて検証する。まず、空間的再現性検証



図－１１ 危険箇所回避有無による経過時間と避難完了率の関係（上段：実時間、下段：無次元時間）

表－４ 危険箇所所有無による E_t の比較

E_t	瀬戸坂通過	瀬戸坂回避
平均値	7.69	4.67
最大値	28.20	20.35
最小値	0.07	0.11
標準偏差	7.84	4.87

と同様に危険箇所である「瀬戸坂回避」の有無による時間の再現性の検証を行う。避難訓練、および「瀬戸坂回避」の有無による避難行動シミュレーションの経過時間と避難完了率 $R(\%)$ の関係を図－１１に示す。この場合の避難行動シミュレータの避難速度は 46m/min と設定している。まず、図－１１の上段より、「瀬戸坂」通過のシミュレーションの場合 $T_e=13.72\text{min}$ 、「瀬戸坂」回避のシミュレーションの場合 $T_e=6.38\text{min}$ となり、「瀬戸坂」を回避した場合の方が、通過した場合と比べて時間的再現性が良いことが確認される。

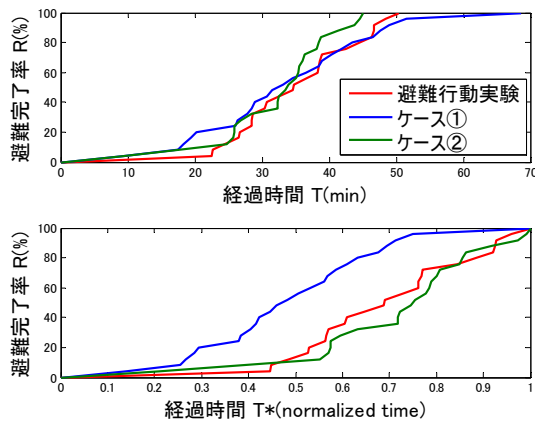
次に、図－１１の下段の無次元化した経過時間を 70 分割し、分割点における避難完了率の差の平均値 E_t について評価した結果を表－４に示す。「瀬戸坂」を回避したシミュレーションで E_t の値が小さく、避難訓練結果との経過時間に伴う避難完了率の増加傾向が近いため、時間的再現性が良いことが確認できる。

時間的再現性が良いことが確認された「瀬戸坂」回避を設定した避難行動シミュレーションにおいて、下記の 2 つのケースの避難速度 V による時間的再現性の検証を行う。

ケース 1 : $V=22.2\sim76.8\text{m/min}$ (避難行動解析結果の最小値～最大値)

ケース 2 : $V=43.2\pm11.4\text{m/min}$ (避難行動解析結果の平均値±標準偏差)

避難訓練と上記の 2 ケースの避難行動シミュレーションによる経過時間と避難完了率 $R(\%)$ の関係を図－１２に示す。図－１２の上段より、ケース 1 の場合 $T_e=18.28\text{min}$ 、ケース 2 場合 $T_e=5.38\text{min}$ となり、ケース 2 の避難速度 V を与えた場合の方が時間的再現性が良いことが確認できる。次に、図－１２の下段の無次元



図－1 2 避難速度 V の違いによる経過時間と避難完了率の関係(上段：実時間，下段：無次元時間)

表－5 避難速度 V の違いによる E_t の比較

E_t	ケース 1	ケース 2
平均値	20.94	5.26
最大値	42.59	18.70
最小値	0.28	0.14
標準偏差	14.96	4.59

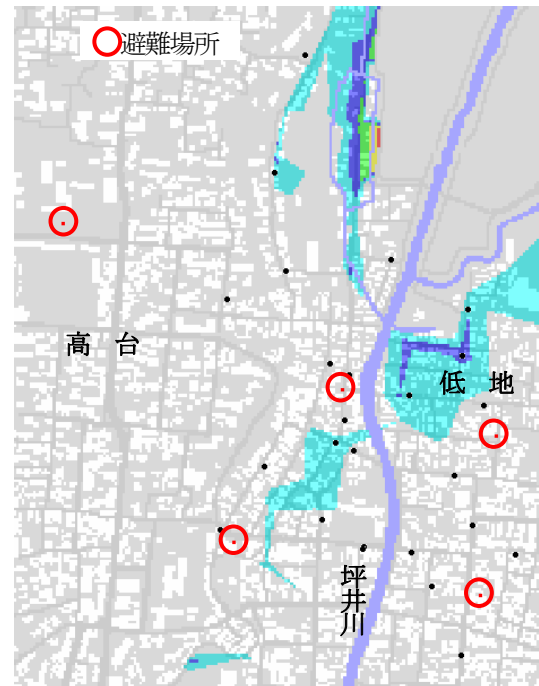
化した経過時間を 70 分割し、分割点における避難完了率の差の平均値 E_t について評価した結果を表－5に示す。ケース 2 の避難速度 V を与えた場合の E_t の値が小さく、経過時間に伴う避難完了率の増加傾向が避難訓練時に近いため、時間的再現性が良いことが確認できる。

以上の T_e と E_t の評価結果より、ケース 2 の避難速度 $V=43.2\pm 11.4\text{m/min}$ (避難行動解析結果の平均値±標準偏差)を与えた場合の避難行動シミュレーションの時間的再現性が良いことが確認された。

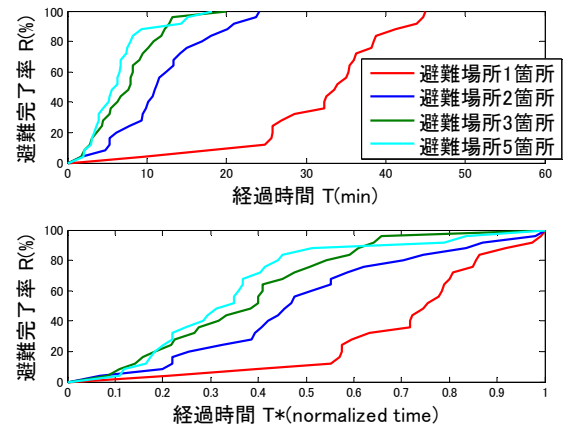
(3) 一時避難場所検討への活用について

本研究で構築に取り組んでいる水害避難行動シミュレータを一時避難場所検討のためワークショップなどで住民の方々に公開する予定である。対象地区の従来の避難場所とともに、低地側の 5 階建て以上の建物を一時避難場所の候補とした。これらの候補地から避難場所を選定するために、各候補地を避難場所とした場合の避難行動シミュレーションを行う。なお、避難行動シミュレーションに際し、前節までの空間的・時間的再現性の検討結果よりパラメータ・ルールとして、「瀬戸坂回避」，「避難速度 $V=43.2\pm 11.4\text{m/min}$ 」を用いる。また、住民エージェントの数は精度検証時と同様に 25 人とする。

避難場所を 5 箇所配置した場合の避難行動シミュレーションの一例を図－1 3に示す。赤丸は避難場所、黒点が住民エージェントを表す。また、避難場所の数を 1 箇所，2 箇所，3 箇所，5 箇所とした場合の避難行動シミュレーション結果による避難完了時間と避難完了率 $R(\%)$ の関係を図－1 4に示す。避難場所の数を増加させると、最終的な避難完了時間の早期化が予想される結果となった。また、避難場所の数を増加させると、最終



図－1 3 避難場所 5 箇所配置した場合の表示例



図－1 4 避難場所数の違いによる経過時間と避難完了率の関係(上段：実時間，下段：無次元時間)

的な避難完了時間に対して早い段階で避難を完了する住民の割合が高くなる傾向が確認される。このように本研究で構築した避難シミュレータを利用すれば、水害時の適切な一時避難の場所やその数の検討が可能となる。

実際に水害リスクコミュニケーションツールとして住民の方々に使用してもらうには、いくつかの一時避難場所の数と配置のケースを用意し、避難完了時間と避難完了率の関係を検討しながら、適切な一時避難場所の数と配置を検討していく必要がある。

7. おわりに

本研究では、地域防災力向上の取り組みとして熊本市壺川校区を対象に水害リスクコミュニケーションのための WS を継続的に行い、地域住民代表とともに水害避難訓練計画を策定し、時間的な氾濫水の広がりによる通路の遮断を考慮した実践的な水害避難訓練を実施した。その

結果、参加 86 名が連絡を受けて全員が自宅を出るまでには最大 30 分程度を要したこと、避難速度の最小値は 46m/分であったこと、避難に要した最大時間は 38 分であったことなど地域防災計画を策定するにあたって有益な情報を得ることが出来た。

本研究ではこの実践的な水害避難訓練のデータによる精度検証を行いながら避難行動シミュレータの構築も行った。また、同時に避難経路に着目した空間的再現性、避難完了時間と避難完了率の関係に着目した時間的再現性による精度検証の方法の提案も行った。提案した検証方法により避難行動シミュレーション結果の再現性の検証を行ったところ危険箇所を回避するルールを与えた方が空間的・時間的ともに再現性が良いことが確認された。また、避難速度パラメータを $V=43.2 \pm 11.2 \text{ m/min}$ (避難訓練結果の平均値±標準偏差) に設定した方が時間的再現性が良いことが確認された。避難行動シミュレータの精度検証後、妥当なルール・パラメータを設定し、シミュレーションにより一時避難場所を検討したところ避難場所の数を増加させると、最終的な避難完了時間の早期化と、最終避難完了時間に対して早い段階で避難完了率が高くなることが予想される結果となった。

今後、避難訓練の結果を活用して避難行動シミュレータを構築したことをワークショップで住民に説明するとともに、避難場所の検討等継続的なリスクコミュニケーションの支援ツールとして活用を試みる。

参考文献

- 1) 多々納裕一：災害リスクの特徴とそのマネジメント戦略，社会技術論文集，Vol.1，pp.141-148，2003.
- 2) 小林潔司：災害リスクのマネジメント，防災の経済分析（高木・多々納編），勁草書房，pp.3-21，2005.
- 3) 仲谷善雄：大規模災害に対する減災情報システム（前編），情報処理，Vol.45，No.11，pp.1164-1174，2004.
- 4) 川島健一，多々納裕一，畑山満則：自律的避難のための水害リスクコミュニケーション支援システムの開発，土木計画学研究・論文集，No.23，no.2，pp.309-318，2006.
- 5) 片田敏孝，桑沢敏行：津波に関する危機管理と防災教育のための津波災害総合シナリオ・シミュレータの開発，土木学会論文集D，Vol.62，No.3，pp.250-261，2006.
- 6) 柿本竜治，山田文彦，山本幸：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ための実践的研究，平成19年度都市計画論文集no.42-3，pp.625-630，2007.
- 7) 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，No.1，pp.25-43，2008.
- 8) 財団法人神戸都市問題研究所：リスクコミュニケーションによる地域活力・地域共生社会の創造，第1章，pp.23-47，2006.
- 9) 田村圭子，他10名：ワークショップによる，ステークホルダー参加型防災戦略計画策定手法の開発，地域安全学会論文集，No.6，pp.129-138，2004.
- 10) 羅貞一，岡田憲夫，竹内裕希子：減災型地域コミュニティマネジメントのための戦略的リスクコミュニケーション技法に関する研究，土木計画学研究・論文集Vol.36，CD-ROM(24)，2007.
- 11) 片田敏孝，木村秀治，児玉真：災害リスクコミュニケーションのための洪水ハザードマップのあり方に関する研究，土木学会論文集D，Vol.63，No.4，pp.498-508，2007.
- 12) 飯田進史，他6名：水害時の避難解析システムの構築と危機管理対応支援への適応性検討，河川技術論文集，Vol.8，2002.
- 13) 桑沢敏行，片田敏孝：災害総合シナリオ・シミュレータを用いた洪水避難のシナリオ分析，土木計画学研究・講演集，Vol.33，CD-ROM(269)，2006.
- 14) 川崎昭如，吉田聡，佐土原聡：GISを活用したハザードマップ公開・提供が市民の防災意識に与える影響に関する調査研究，日本建築学会計画系論文集，No569，pp.109-115，2003.
- 15) 桑沢敏行，片田敏孝他2名：洪水を対象とした災害総合シナリオ・シミュレータの開発とその防災教育への適用，土木学会論文集D，Vol.64，No.3，pp.354-366，2008.
- 16) 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.
- 17) 本間基寛，片田敏孝，村澤直樹：津波襲来時における漁船の避難行動を適正化するための津波教育ツールの開発，海岸工学論文集，第55巻，pp.1381-1385，2008.
- 18) 熊本県：坪井川計画書，1969.
- 19) 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.
- 20) 片田敏孝，及川康：実効性を持った洪水時の住民避難計画のあり方に関する検討，土木計画学研究・講演集，Vol.24，pp.925-928，2001.
- 21) 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.

リスクコミュニケーションを通じた実践的水害避難訓練に基づく避難行動シミュレータの構築*

柿本竜治**・山田文彦***・田尻亮司****・原田翔太*****

地域防災力向上の取り組みとして熊本市壺川校区を対象に水害リスクコミュニケーションのためのワークショップを継続的に行ってきた。そして、そのワークショップを通じて内水・洪水氾濫シナリオを用いた避難訓練計画の策定を行い、時間的な氾濫水の広がりによる通路遮断を考慮した実践的な水害避難訓練を実施した。その結果、参加86名が連絡を受けて全員が自宅を出るまでには最大30分程度を要したこと、避難速度の最小値は 46m/分であったこと、避難に要した最大時間は38分であったことなどが明らかになった。また、これらは、データに基づいた避難行動シミュレータの精度検証の方法の提案と避難行動シミュレータの構築を行った。

An Evacuation Simulator based on a Practical Evacuation Drill through Risk Communication*

By Ryuji KAKIMOTO**・Fumihiko YAMADA***・Ryoji TAJIRI****・Shota HARADA*****

In this study, risk communication using the continual workshops on flood risk management was implemented at Kosen town-community in Kumamoto City. Consequently, a practical evacuation drill for virtual flood scenario was produced there. The data of observing evacuation behavior were obtained. An evacuation simulator using multi-agent model was also developed. Then, tests of the simulator were proposed through making a comparison between the spatial and temporal accuracy of the simulator and the data of the drill. The spatial accuracy was found to be dependent on the inhabitants' recognition rate from their own house to the evacuation route.