

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420495

研究課題名(和文) 経路上の混雑および自動車による移動を考慮した水害時避難行動シミュレーション

研究課題名(英文) Flood evacuation simulation considering congestion on the pathway and moving on foot and by cars

研究代表者

堀 智晴 (HORI, TOMOHARU)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：20190225

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：研究代表が開発を続けてきた水害時の避難行動を個人レベルでシミュレートするモデルに、障害物を回避する行動アルゴリズムを導入するとともに、信号制御を表すモジュールを開発・付加した。さらに、人の歩行モデルをベースに自動車特有の行動様式を加味した車両避難行動モデルを構築した。開発したモデルを用いて歩行のみと、車と歩行避難が共存する場合についてどのような失敗ケースが発生するかを分析するとともに、歩行による混雑が大きく影響すると考えられる津波からの避難シミュレーションを行い、避難所の設置場所と避難成功率との関係を求めた。また、避難中に浸水等による経路の障害情報が得られることの効果についても分析を試みた。

研究成果の概要(英文)：Obstacle avoiding algorithm and a module for simulating traffic light regulation have been added to the micro-simulation model of flood evacuation, which has been developed by the primary researcher. Car behavior is also modeled based on walking evacuation model by introducing car specific way of moving such as lane keeping, following and overtaking. Simulation analyses have shown how the failure cases in flood evacuation differ when evacuee moves only on foot and when some uses cars and others walk to the shelters. Tsunami evacuation simulation is also performed and the relation between the locations of shelters and evacuation success ratio. The effect of on-line providing of obstacle information to evacuees on the way to the shelters is quantitatively estimated through the evacuation simulations by the model developed in this study.

研究分野：水資源工学・水文学

キーワード：避難 水害 シミュレーション 水防 洪水 災害対応 危機管理 防災

1. 研究開始当初の背景

洪水氾濫時の避難は、人命保護の立場から極めて重要であるが、個々の住民にとって避難を必要とするほどの規模の水害を経験する機会は少ないため、洪水時の避難でどのような事態が起きうるかを様々な条件に応じて具体的に想像することは難しい。コンピュータ上での避難行動シミュレーションはこうしたイマジネーションを豊かにする有力なツールとなりえる。こうした観点から水害時避難行動シミュレーションの研究が積み重ねられ、氾濫水深と歩行速度の関係から移動の可否を扱うモデル(西原, 1983)、(高橋ら, 1970)、GISを用いて災害情報伝達過程をシミュレートするモデル(片田, 2000)、津波からの避難を対象としたもの(鈴木・今村, 2005)、避難者を粒子に見立てて混雑状況の影響を見るモデル(後藤ら, 2007)などが開発されてきた。申請者も、住民が避難決意に至る心理過程を含めてシミュレートする水害避難ミクロモデル(高棹ら, 1995)に始まり、より詳細な街路状況を考慮できるモデル(堀, 2007)や情報伝達過程をシミュレートする機能を付加したモデル(Hori, 2008)、歩行者による混雑を考慮したモデル(花島ら, 2012)と避難行動モデルの開発とバージョンアップを重ねてきた。

ところで、こうした洪水時避難シミュレーションモデルのほとんどが対象とするのは、人が徒歩で避難所に向かうという行動である。しかしながら、実際には水害時の避難を自動車で行う事例は多く、また、避難のためでなくても自動車移動中に浸水に遭遇する例も後を絶たない。さらに、いわゆる災害弱者の避難を支援するためには自動車はなくてはならない。したがって、避難行動を考える場合には、自動車の利用がどのような影響をもたらすかを様々な条件で検討することが不可欠になりつつある。水害時の避難行動や減災行動において、自動車を用いるがゆえに可能になること、より危険になることは何で、それはどのような条件のときに顕在化するのかを具体的に知ることは、学術上も実際上も喫緊の課題である。

こうした問題意識を背景として、申請者らは従来から開発を進めてきた水害避難ミクロモデルのデジタル街路ネットワーク版に、道路を線ではなく面で表現し、人体を円で表現することで混雑や回避行動を表現する方法について予備的な検討を行い、その可能性を確認した。こうした経緯をもとに、人の混雑時の障害物回避行動を発展させることで、車両の行動をシミュレートするモデルを構築できるという着想を得た。

2. 研究の目的

本研究の目的は、歩行時の混雑や障害物の回避行動の影響をモデル化することに加え、自動車走行モデルを開発し、車社会における水害時の避難計画や効果的な避難を可能に

する施策について、定量的に分析するシステムを構築することである。研究期間内に達成しようとした目標は以下のとおりである。

- (1) 研究代表者が従来開発を進めてきた一次元空間型の避難行動シミュレーション(道路を直線の組み合わせで、人を点で表現するタイプ)に、街路を連続する長方形を用いて面的に表現し、人を一定の広がりを持つ円で表現する機能を追加することにより、混雑や障害物の回避行動を再現できる機能を持つ歩行避難行動モデルを構築する。
- (2) 人の移動・回避行動モデルをベースに、発進・加速、減速・停止など車固有の行動様式を考慮した自動車行動モデルを構築する。
- (3) 簡便に避難行動シミュレーションを実施できるように、研究代表者らが従来開発を進めてきたデジタル街路ネットワークモデルを拡張し、交差点部分での信号の機能を再現する信号制御モデルを構築する。
- (4) 上記の人の歩行行動モデル、車両行動モデル、デジタル街路・信号制御モデルを組み合わせ、氾濫解析と組み合わせることで、人と車両の避難行動を同時にシミュレートするシステムを開発し、実地域への適用を行い、モデル性能を確認する。

なお、上記(1)の人と場の面的表現については、本課題を申請する準備段階において基本形の検討を終えており、本研究ではより様々な形状の街路で、簡略表現の仮定が有効かどうかの詳細なチェックを始めるところから取り掛かった。

3. 研究の方法

本研究の「人と車が同時に行き来する現実に近い水害時避難行動シミュレーションを可能にする」という目的を、次の三つのサブモデルを開発することを通じて達成した。すなわち、歩行による人の移動に他の人や障害物を回避する行動アルゴリズムを導入すること、従来申請者が開発してきたデジタル街路モデルに面的な取り扱いを導入するとともに、信号制御を表すモジュールを開発・付加すること、(3)人の歩行モデルをベースに自動車特有の行動様式を加味した車両避難行動モデルを構築すること、である。

なお、シミュレーションのソフトウェア開発には、コーディングや設計思想の一貫性が重要となるため、研究代表者が主となり、大学院生1名を研究協力者とする体制で研究を進めた。

具体的に取った研究方法は以下のとおりである。

- (1) 障害物回避を考慮した歩行避難モデルの開発

混雑や障害物の存在と、人の歩行行動との関係を表す方法は二つに大別できる。一つは、人や障害物が道路上のどの程度の面積割合

を占めるかということと、移動速度を関係づける方法で、密度モデルとすることができる。一方は、人が障害物を認知し、一定のクリアランスを取って、衝突を回避しつつ追い越しを行ったりする様子をそのまま移動ルールとして記述する方法である（回避行動モデル）。研究代表者らは、既に密度モデルの考え方をを用いて水害時の歩行避難における混雑の影響を考慮するモデルを提案した（Hanajima et.al., 2011）。しかし、同時にこうしたアプローチでは密度（あるいは占有面積率）を考える単位領域の大小によって、不自然に歩行速度が低下するケースが発生する等の問題があることも見出した。

そこで、避難者は障害物を横に一定距離離れたスペースを確保して通り過ぎるというシンプルな構造の回避行動アルゴリズムを導入することで、具体的に障害物をよける様子まで再現できるようにした。またこの回避行動モデルを実際の街路網に適用できるレベルまでコード開発を進め、追い越しに伴う回避だけではなく、対向など進路が交錯する場合でも適用可能なモデルとした。

(2) 二次元デジタル街路ネットワークモデルへの信号制御機能の導入

混雑や車両の走行を考える場合には、道路を線、交差点を点と考える一次元街路ネットワークでは不十分である。こうした観点から、研究代表者らは、道路を長方形の連続体で表現することで、接続関係の表現にすぐれた一次元方式の利点を残しつつ、道路を面として表現する方法を提案している。

本研究では、この方式を拡張することで、車線・車道・歩道を区別できる二次元デジタル街路ネットワークモデルを構築した。

一方、信号制御については、交差点を表すモデルに、同時に通行を許可するペアとなる接続道路情報を保持させ、一定時間ごとに通行許可ペアを切り替えるといった方法で実装を試みた。ところが、こうした表現に必要な、各交差点における同時通行可（青信号）となる道路のペアや、信号保持時間など制御に関するデータが整備・公開されている訳ではない。シミュレーションで取り扱う交差点の数は膨大なものに上るため、実地踏査を考えることも現実的とはいえず、信号のモデリングが簡単に避難行動のシミュレーションを行うことの障害となった。もちろん、分析目的によっては、対象地域の個々の信号の動きを詳細に調べてシミュレーションに反映させることも必要になるかもしれない。しかし、避難シミュレーションに係る他の要素の精度を考えると、大まかな信号制御の特徴を把握・反映させることで十分である場合も多いと考えた。

そこで、数値地図 2500 の道路接続関係データから、交差点に接続する道路のうち、より直線に近い接続関係にあるペアを探し出し、これらを青信号ペアと仮定する機能を追

加することで、簡単に信号付交差点モデルを作成できるシステムを開発した。

(3) 車両避難行動モデルの開発

車両避難行動モデルについては、ベースとなる速度と道路面上での基本位置の取り方が人の移動とは異なるものの、回避行動様式は基本的に同じと考えてよいことから、本研究で最初に構築した障害物回避を考慮した歩行避難モデルを拡張するという方針を取った。ただし、自動車の場合は基本となる速度が人に比べて大きいいため、発進・加速過程や減速・停止過程を組み込むことが、再現性を高めるために不可欠である。そこで、自動車は、前方に障害物がない場合には速やかに制限速度まで加速し定速走行を行うこと、前方に走行車両がある場合には速度に応じた車間距離を保ちつつ、相対速度を0となるようにして追従走行するなどの簡便なルールを設定することで、その特性に応じた動きを表現できるようモデル化を行った。

以上の開発したモデルを用いて、歩行のみで避難するケースと自動車を用いるケースの比較や、混雑が特に問題となる可能性がある津波からの避難行動について、具体的な地域を取り上げてシミュレーションをおこない、より円滑な避難行動を行うためには、どのような計画が必要かについて検討を加えた。

4. 研究成果

本研究の大きな成果の一つは、他の避難者や障害物を回避しながら避難場所まで歩行によって避難する行動を完全に個人レベルで再現する機能、発進・加速・減速・停止と追従・車線変更を行い、目的地まで移動する自動車の行動を再現する機能を有する避難シミュレーションモデルを構築するとともに、対象地域の街路ネットワークを簡単にシミュレーションモデルに取り組みするための二次元デジタル街路網・信号モデリングシステムを構築したことである。これにより、我が国のほとんどすべての地域で、シミュレーションを行うモデルを作成できるようになった。開発したシステムは、

- (1) 数値地図 2500 のデータファイルからシミュレーションの対象地域に含まれる図葉を取り出し、街路網に関するデータ類を切り出す機能、
- (2) 切り出した街路データについて図葉を超える部分の接続関係を検索し、新たに一つの図葉データに変換する機能、
- (3) 対象地域内のすべての交差点の組み合わせについて、両者を結ぶ最短経路を求める機能、
- (4) 主要道路の交差点に対し、同時に通行を許可する街路区分を自動的に検出し、任意のサイクルを持った信号エージェントを付加する機能、
- (5) 障害物の回避機能を持つ歩行避難エー

ジェントを必要な人数分作成し、対象地域内に任意の密度で配置する機能、

- (6) 発進、加速、低速走行、減速、追従走行、車線変更機能を持った自動車エージェントを必要な台数分作成し、対象地域内に任意の密度で配置する機能、
- (7) 配置した避難者に対し、最近接の避難場所を検索し、目的地となる避難場所を設定する機能、
- (8) 別途推定した通常交通量の情報に従い、対象区域の境界部分から通常交通に相当する自動車エージェントを発生・流入させることで、通常交通を模擬する機能、
- (9) 別途計算される対象地域の時々刻々の浸水深のデータと街路ネットワークを重ね合わせ、避難エージェントの現位置における浸水深を求める機能、
- (8) 任意のタイミングで避難を開始させ、指定したタイムステップで避難状況を再現していく制御機構、

を有する総合的なものとなっている。

また、開発したモデルを用いて実際に種々の避難行動シミュレーションを行った結果、いくつかの興味深い知見が得られたことも本研究の成果の一つである。

まず、滋賀県長浜市虎姫地区を対象として、通常交通量を考慮した自動車避難シミュレーションを行った。この地区は、南端には一級河川の姉川、東端にはその支流の高時川があり、これら河川の堤防に囲まれている。両河川は、洪水時には相当な被害を生じる恐れがある河川として滋賀県によって「洪水予報河川」に指定されている。堤防が決壊すれば、平坦な町内に水が大量に流れ込んで滞留することが予想されている。滋賀県が 2012 年に作成した「地先の安全度マップ」によると、生起確率が 100 年に一度の洪水でほぼ町内全域で 3.0m 以上の浸水、両河川の合流地点付近の住宅地では 4.0m 以上の浸水が予想されており、円滑な避難行動が水害から命を守るためには欠かせない地域である。

水害時の自動車による避難を考えるためには、避難を直接目的としない通常の交通を再現することが不可欠である。通常交通を行う車両が浸水等によって立ち往生して混雑の原因となり、避難車両の動きを妨げることは十分に考えられる。しかしながら、被害水害避難シミュレーションの対象となるような比較的広範なエリアで、平時の交通量を示すデータが十分な量入手できる状況は考えにくいことから、道路交通センサスのデータと少数の観測地点における実測によるデータを用い、主要な道路の断面交通量を推定する方法を提案した。また、断面交通量データから、個々の自動車挙動を扱う推定モデルへの変換方法も同時に提案している。

こうして得られた平時の交通量のデータと、氾濫解析のデータを用いて再現期間 10 年程度の洪水と再現期間 100 年に相当する大規模出水の複数の規模の洪水に対して、統合

避難シミュレーションを行った。その結果、大規模な浸水が発生しつつある状況下では、通常交通の有無よりも浸水による交通阻害が避難の成否に支配的要因となるものの、計画的避難行動に重要な浸水開始前や浸水初期の状態では、平時の交通量が避難行動の成否に相当程度の影響を与えることが分かった。このことは、事前避難に自動車を使用する場合、道路の側溝や農業用水路などからの浸水によるいわゆる内水氾濫が、交通に障害を発生させ、避難行動の阻害要因となる可能性に注意すべきことを示唆しており、自動車を使用するような避難計画を策定する場合、浸水想定区域図のような大規模河川が氾濫した際の最高浸水位のような情報を参照するだけでなく、洪水の初期の浸水状況を十分検討しなければならないことを示している。こうした状況は、比較的規模の小さい洪水で起こる浸水状況のシミュレーション結果が参考になるため、複数の規模の洪水に対するハザードマップの整備が重要であることも示唆する結果となっている。

次に、静岡市清水区三保・折戸地域を対象に、津波からの歩行避難シミュレーションを行った。本地域を含む静岡市沿岸部は、近い将来に発生が危惧されている南海、東南海トラフ地震に伴う津波により、甚大な被害が予想されている。特に、今回対象とした地域は、入り組んだ海岸地形のため津波高が大きくなると予想されており、地震発生後の速やかな避難が人命被害を軽減するために不可欠とされている。シミュレーションには、これら地域を含む南北 6km、東西 4km のエリアを対象とし、地震発生後に直近の避難所に徒歩で向かった場合、静岡市が配布している津波ハザードマップに色分け記載されている津波到達時間より前に避難所にたどり着けるかどうかをシミュレーションした。

経路上の混雑発生と避難所の収容人数を考慮したシミュレーション結果からは、多くの方が同時に避難所に接近するために避難所近傍で歩行速度が低下することで混雑が発生すること、容量の小さい避難所では到着した人が入り切れず、別の避難所に向かわなければならないケースが発生することが確認できた。また、こうした状況は、全員の初期歩行速度（障害物や人との交錯がない状態の速度）が全員同じである場合よりも、分布のある場合（遅い人や早い人が混在する場合）の方が、悪化しやすいことが確認された。これは、歩行速度が速い者も追いつきによって集団化し、低速歩行を余儀なくされるケースが発生するためである。

また、津波到達時間が短い危険エリアに津波避難タワーを増設したケースについても、シミュレーションを行った。このケースでは、避難タワーの位置や容量によって、かえって避難失敗者が増加する場合があることが分かった。これは、避難者が地震発生時にいた場所から直近の避難所に向かう場合、より津

波が早く到達するエリアに設置された避難所に向かうとする人が増えてしまい、津波到達までに避難所に到達できなかつたり、避難所に入り切れなかつたりするケースが発生するためであった。

こうした解析結果は、地震発生時にどの場所にいるかによって、どの避難所に向かうべきなのかといったエリア別の避難計画を立てておくことの重要性を示唆していると考えられる。また、収容可能な避難所、あるいは満員となった避難所に関する情報がリアルタイムで与えられれば、避難の成功率を上げることにつながる可能性も示された。

さらに、滋賀県彦根市の芹川周辺部を対象に、水害避難シミュレーションを行うシステムを作成し、仮想的な氾濫状況下で、浸水等により通れなくなっている箇所に関する情報を出発直前に避難者に与えた場合、その後の浸水状況も含めリアルタイムで移動中の避難者に与えた場合の効果について検討した。この分析の対象エリアは、芹川が下流部扇状地に広がった市街地を貫流し、その多くは築堤区間となっているため、破堤が発生した場合甚大な被害が予想されるところである。そのため、事前避難や浸水状況を正確に把握し、浸水を回避した避難行動が必要と考えられる。

ここでは、全く浸水情報を持たずに避難を開始し、移動中も自身が遭遇する以外は浸水に関する情報がないケース、定期的にエリア全体の浸水状況が移動中に避難者エージェントに届けられるケース、10分先の予測浸水状況（ここでは完全予測を仮定）が与えられるケースについて避難シミュレーションを行った。その結果、移動開始前や移動中に経路上の障害情報を伝達できれば、避難行動の効率性や安全性を一般には高められるものの、情報提供のタイミングや内容、氾濫水の挙動の組み合わせによっては、かえって避難失敗者を増加させるようなケースも存在することが判明した。こうした事態を避けるためには、避難中のリアルタイムの情報提供といった ICT 技術の活用はもちろんであるが、予め地域の地形特性や河川の整備状況に応じた洪水氾濫と避難状況のシナリオ分析を詳細に行い、代表的なシナリオ別の経路や避難場所を含めた避難計画を策定しておくことが重要であることを、ここでの解析結果は示唆している。

以上のように、本研究では、研究代表者が従来から開発を続けてきた水害避難ミクロモデルに、障害物を回避する行動特性、自動車を用いた避難行動を再現する機能を追加し、より現実的に即したシミュレーションを行えるシステムを構築した。また、構築したモデルを用いたシミュレーション解析により、興味深い知見も得られている。

一方で、次のような課題があることも忘れてはならない。開発を進めた結果、水害避難ミクロモデルはより複雑で多機能なモデル

となり、対象とする避難行動過程もより複雑なものになった。この結果、本モデルによるシミュレーションの結果が、総体としてどの程度現実を正確に再現できているのかといった点を直接検証することも難しくなってきたことに注意しなければならない。

これには二つの理由がある。一つは水害時の避難行動に対する詳細なデータの不在である。水害時の避難移管する調査は事後的なものにならざるを得ないため、時系列に住民の心理状況や行動を整理することは難しい。また、個々の意思決定や行動が祖のケースに特殊なものなのか、一般化できるものなのかを区別することも容易ではない。

もう一つの要因はモデルに含まれるパラメータが、モデルの大規模化・高機能化によって増加していることである。これに対しては、パラメータの値に設定に、関係する要素行動に関して妥当と思われるものを用いることで対応している。例えば、浸水深と歩行速度の関係などは、実験によって実際に得られた知見をもとに設定した。こうした要素行動毎に一定の妥当性を有する関係を積み上げていくことで、モデル全体の信頼性を高めようとしてきた。しかしながら、個々の要素が妥当なものであっても、そうした関係が多数組み合わせられた場合に、不自然な行動がシミュレートされることにならないとも限らない。したがって、今後、より多くの解析事例を積み重ねるとともに、比較的条件を明確化できる避難訓練過程などを再現することを通じて、モデルパラメータの妥当性を検証することや、逆に訓練時と同じことを水害時に行った場合にどのような結果になるかを確認したりするといったアプローチを取ることにも必要と考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

Hanajima, K., Hori, T. and Nohara, D: Car behavior model used in simulating flood evacuation, Proc. 19th IAHR-APD Congress 2014, Hanoi, 査読有, 2014, 7pp ISBN 978604821338-1

Hori, T., Wada, Y. and Nohara, D: SIMULATION-BASED ASSESSMENT OF TSUNAMI EVACUATION SCHEME IN AN URBANIZED AREA AT SOUTHERN COAST OF JAPAN, Proceedings of 20th Congress of the Asia Pacific Division of the International Association for Hydro Environment Engineering & Research, Colombo, 査読有, 2016, 6pp.

[学会発表](計4件)

・西川詞雲・堀智晴・野原大督：経路上の障害情報が水害避難行動に及ぼす影響に関

する基礎的考察，土木学会第 71 回年次学術講演会概要集， -125, 2016.9.9, 東北大学。
西川詞雲・堀智晴・野原大督：経路上の障害情報が水害避難行動に及ぼす影響に関する基礎的考察，平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集， -10， 2016.6.11, 立命館大学。

Hori, T., Wada, Y. and Nohara, D.: Simulation-based assessment of tsunami evacuation scheme in an urbanized area at southern coast of Japan, The 20th Congress of the Asia Pacific Division of International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, Colombo, Aug. 28th, 2016.

Hanajima, K., Hori, T. and Nohara, D: Car behavior model used in simulating flood evacuation, Proc. 19th IAHR-APD Congress 2014, Hanoi, 査読有, 2014, 7pp ISBN 978604821338-1

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀 智晴 (HORI, Tomoharu)
京都大学・防災研究所・教授
研究者番号： 20190225

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し

(4) 研究協力者 (計 2 名)

西川詩雲 (NISHIKAWA, Shiun)
京都大学・大学院工学研究科・都市社会工学
専攻修士課程

和田洋介 (WADA, Yousuke)
京都大学・大学院工学研究科・都市社会工学
専攻修士課程