

リスクコミュニケーションツールとしての水害避難行動シミュレータの構築*

An Evacuation Simulator as a Tool of Risk Communication*

柿本竜治**・山田文彦***・原田翔太****

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

1. はじめに

公共の避難場所の検討に洪水ハザードマップがしばしば用いられている。しかし、洪水ハザードマップは流域全体の避難計画の把握には適しているが、各地域のきめ細かな実情までは考慮されていないため、地域住民が必要とする避難場所の情報が得られないケースも多い。そのため、詳細な避難場所の検討に数値シミュレーションが活用されている場合がある^{1,2)}。しかしながら、シミュレーション結果の精度検証が十分に行われないうまま、活用されている場合がほとんどである。その原因として、精度検証に用いる実際の避難行動に関するデータの取得が困難であることが挙げられる。

我々は、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2006年10月に実施した。その避難訓練では、GPS機能付携帯電話を避難者に所持してもらい実際の避難行動データを取得している。そこで、本研究では地域水害リスクコミュニケーションツールとしての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タの構築・適用を目的とし、実践的洪水避難訓練での避難行動データ³⁾を用いた水害避難行動シミュレーション結果の精度検証手法の提案を行う。

2. 水害避難行動シミュレータの概要

水害避難行動をシミュレーションするにあたり、対象とする空間をモデル化する必要がある。従来は平面2次元空間 (X, Y座標) のみを考慮した2次元格子モデルがほとんどである。しかし、この2次元格子モデルでは実際の標高 (Z座標) 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っ

*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

****正員、修士 (工学)、建設技術研究所 大阪支社

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などから適切ではないと考えられる。そこで、本研究では、空間モデルを構築するにあたり、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、リンクとノードの繋がりによる3次元ネットワーク空間モデルを構築した。

本研究では、避難者である「住民」と道路網の「ノード」をエージェントとして定義する。住民エージェントには、初期位置や避難開始時刻、移動速度などの情報を、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与えている。なお、避難者である「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。また、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。

シミュレーションが開始されると、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。

経路選択を行う際、各住民エージェントは各々の経路に対し、「避難場所に近づくか $(+a)$ 」、「川から遠ざかるか $(+b)$ 」、「標高が高くなるか $(+c)$ 」、「周囲に避難者がいるか $(+d)$ 」の条件を満たせば0内のポイントを、以下の式(1)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。

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

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に判断を行い、値が最も高い避難経路を、次に進む避難経路として選択していく。

3. 水害避難行動シミュレータの精度検証の方法

本章では、実践的水害避難訓練のデータを用いた避

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、避難訓練時とシミュレーション時の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、避難訓練のデータと比較するため、シミュレータ内で全住民エージェントが避難場所まで避難するように、避難場所までの距離パラメータ (+a) の値を最大に設定した。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のデータと比較する。空間的再現性の検証には経過時間に伴うX, Y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X, Y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X, Y座標データを取得する。

(1) 空間的再現性の検証方法について

まず、図-1に示すように、MAS_jをシミュレーションによる避難経路上の10秒間隔の点、また、避難訓練時の避難経路上に誤差評価点GPS_iを設定する。次に、ある住民Nについて、避難訓練時の避難経路上のある誤差評価点GPS_iから避難行動シミュレーションによる避難経路上のすべてのMAS_jの座標点までの距離を求め、その中の最短を $l_{i,N}$ とする。住民Nについて $l_{i,N}$ の総和を求め、その総和が避難訓練時の避難距離 L^N_{GPS} に対してどの程度であるかを空間的誤差と定義し、式(2)で求める。

$$E^N_a = \frac{\sum_{i=1}^n l_{i,N}}{L^N_{GPS}} \times 100(\%) \quad (2)$$

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 $l_{i,N}$ 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

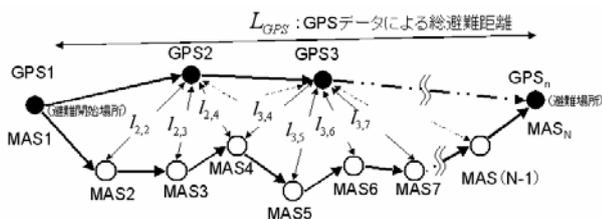


図-1 空間的誤差検討方法

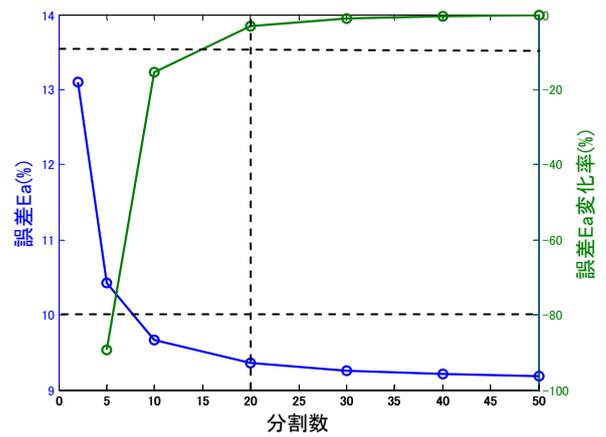


図-2 分割数と空間的誤差と誤差の変化率の関係
与えられる避難訓練時の避難経路1分割あたりの空間的誤差 E^N_a が安定する分割数に分割することとする。ここで、 a は分割数である。

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

空間的誤差評価に適切な分割数 a を求めるため、分割数を0から順次5分割増やしていき50分割した場合までの E^N_a 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^N_a の平均値および平均値の変化率を図-2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と分割数増に対するその変化率ともに減少することが分る。また、1分割あたりの空間的誤差の平均とその変化率がともに10%以下となるのは20分割以上した場合であり、また、20分割以上でそれらの変化は緩やかになり、1分割あたりの空間的誤差の平均の値が安定する。そこで、本研究では適切な分割数を20分割とし、空間的再現性を検証する。

(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-3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 $V=22.2\sim 76.8\text{m/min}$ 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-3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

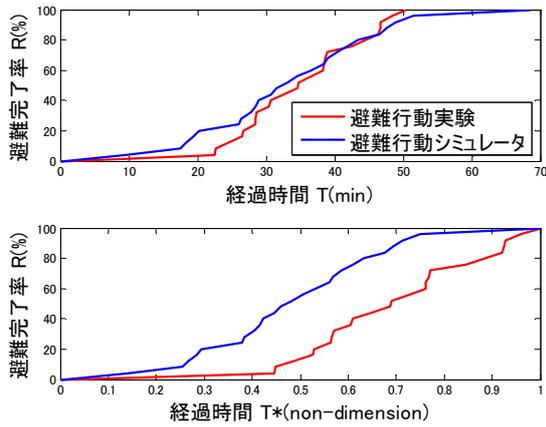


図-3 経過時間と避難完了率の関係
(上段：実時間，下段：無次元時間)

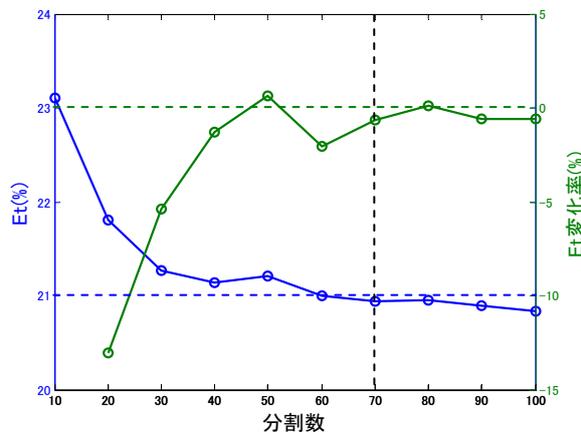


図-4 分割数と避難率誤差・避難率誤差変化率の関係
おける避難訓練と避難行動シミュレーション結果の避難完了率の差を $e_i(\%)$ とし、その総和を分割点数分 ($b-1$) で除した値 E_t は、式(4)で与えられる。

$$E_t = \sum_{i=1}^{b-1} e_{ii} / (b-1) \quad (\%) \quad (4)$$

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-4に示す。分割数の増加に伴い E_t とその変化率はともに減少することが分る。分割数 70 以上で E_t が 21% 以下、また、50 分割から 60 分割に増加したところで変化率は 1% 以下になっている。そこで、本研究では妥当な分割数を 70 分割として 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。

4. 避難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、避難行動シミュレータのパラメータ・ルールの設定について検討する。



図-5 危険箇所の位置

表-1 危険箇所回避有無による E^N の統計量の比較

$E^N(\%)$	瀬戸坂通過	瀬戸坂回避
平均値	2.04×10^2	1.09×10^2
最大値	3.48×10^2	2.52×10^2
最小値	9.81×10^1	4.52×10^1
標準偏差	6.34×10^1	5.04×10^1

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-5参照)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 E^N の統計量を比較した結果を表-1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。

次にある一定の経過時間後に図-5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。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、30 分経過後には全住民エージェントが新坂を通過してしまっているため、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^N の統計量を比較した結果を表-2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% を下回ることはなく、現状では平均で 100% 程度の空間的誤差が存在することが確認された。

表-2 経路遮断タイミングによる E^N 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	1.09×10^2	1.02×10^2	1.18×10^2
最大値	2.52×10^2	2.51×10^2	2.51×10^2
最小値	4.52×10^1	1.54×10^1	1.54×10^1
標準偏差	5.04×10^1	6.27×10^1	5.96×10^1

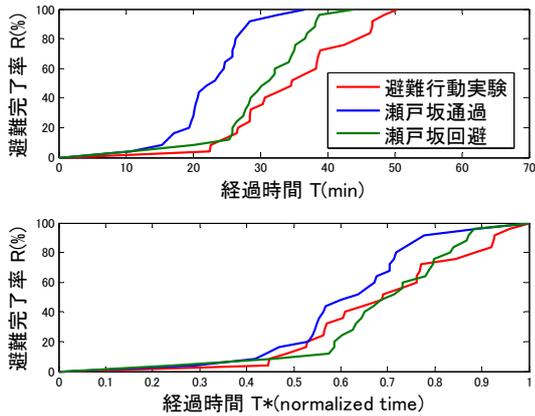


図-6 危険箇所回避有無による経過時間と避難完了率の関係(上段:実時間, 下段:無次元時間)

表-3 危険箇所有無による E_t の比較

E_t (%)	瀬戸坂通過	瀬戸坂回避
平均値	7.69×10^0	4.67×10^0
最大値	2.82×10^1	2.04×10^1
最小値	7.00×10^{-2}	1.10×10^{-1}
標準偏差	7.84×10^0	4.87×10^0

(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、空間的再現性検証と同様に危険箇所である「瀬戸坂回避」の有無による時間的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-6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-6の上段より、「瀬戸坂」通過のシミュレーションの場合 $T_e=13.7\text{min}$ 、「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-6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-3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として、避難行動解析結果の最小値と最大値の間の避難速度 $V=22.2\sim 76.8\text{m/min}$ を設定する。ケース2として、避難行動解析結果の平均値±標準偏差、 $V=43.2\pm 11.4\text{m/min}$ を設定する。避難訓練と上記の2ケースの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-7に示す。図-7の上段より、ケース1の場合 $T_e=18.3\text{min}$ 、ケース2の場合 $T_e=5.38\text{min}$ 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は良いことが確認できる。次に、図-7の下段

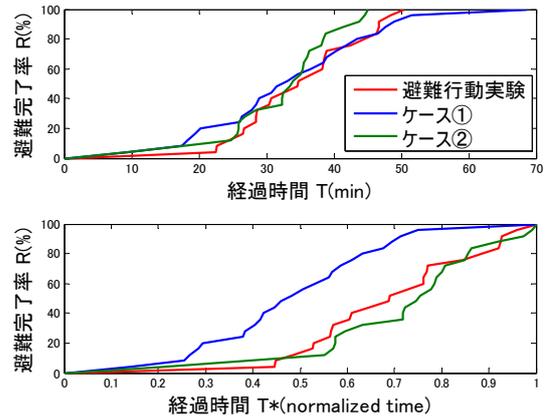


図-7 避難速度 V の違いによる経過時間と避難完了率の関係(上段:実時間, 下段:無次元時間)

表-4 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	2.09×10^1	5.26×10^0
最大値	4.26×10^1	1.87×10^1
最小値	2.80×10^{-1}	1.40×10^{-1}
標準偏差	1.50×10^1	4.59×10^0

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。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。

5. おわりに

本研究では熊本市壺川校区で行った水害避難訓練のデータを用いた水害避難行動のシミュレーション結果の精度検証方法の提案を行った。1つの方法は、避難経路の空間的再現性に着目したものであり、もう1つの方法は、避難完了時間・避難完了率といった時間的再現性に着目した精度検証方法である。提案する検証方法によりシミュレーション結果の再現性を検証した結果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。

今後の課題として、避難行動シミュレータをワークショップ等で住民に公開し、実際の利用を通じて意見を聴取し、実用的なものに改善を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.