多数シナリオ津波避難シミュレーションによる 確率論的避難安全性の評価

牧野嶋 文泰¹・今村 文彦²・安倍 祥³

¹学生会員 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)

E-mail:fumiyasu.makinoshima.r1@dc.tohoku.ac.jp

²正会員 東北大学 災害科学国際研究所 (〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)

E-mail:imamura@irides.tohoku.ac.jp

³正会員 東北大学 災害科学国際研究所 (〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)

E-mail:yabe@irides.tohoku.ac.jp

津波避難行動解析が内包している不確実要因が、避難安全性の評価に確率として反映される評価手法を、多数シナリオ津波避難シミュレーションによって実現した。まず、一般的な避難行動解析に含まれる不確実要因について整理し、そのパラメータの設定方法を詳細に検討した。そのうえで不確実要因の影響を含めて避難安全性を評価する手法を提案し、並列計算を活用して、提案手法を宮城県気仙沼市の実市街地に適用した。その結果、避難行動解析でランダムに設定するパラメータは、避難安全性の評価結果に無視できない影響を持つことを定量的に明らかにした。また、この影響を確率的に表現して避難安全性の評価に反映し、より信頼度の高い、避難安全性の評価結果を提供できることを示した。

Key Words : tsunami evacuation, evacuation simulation, parallel computing, stochastic simulation

1. はじめに

津波避難シミュレーションは、津波避難に係る種々の対策を定量的に評価し、対策を検討することが可能になる有用なツールであり、研究と実務の両面で活用が進んでいる^{1,2)}。しかし、津波避難シミュレーションが対象とする避難行動では、発災時の避難者の初期分布や、避難開始時間が不可知であるにも関わらず、従来の多くの検討では、単一もしくは数少ない避難シナリオに基づいた避難安全性の評価に留まっている。スーパーコンピュータ「京」をはじめとする全国の大規模計算環境を共用基盤として整備したHPCIを活用した多数シナリオ検討も始まっている³⁾が、避難行動解析が含む不確実要因の整理や、多数シナリオ計算の結果を安全性評価へ反映する検討は十分でない。従って、避難行動解析が含む不確実要因の影響を避難安全性の評価に反映するような評価手法を構築することは、避難行動解析結果の信頼度を高めることにつながり、従来は参考値に留まっていた解析結果を、具体的な避難目標として住民に提示できる可能性をもつ。

本研究では、避難行動解析に含まれる不確実要因を整理したうえで、多数シナリオ津波避難シミュレーションにより避難行動解析が内包する不確実要因の影響を定量的

的に評価し、この影響が避難安全性の評価に反映される手法を新たに提案する。さらに、解析の並列化による高速計算などを活用することで、提案手法を宮城県気仙沼市の実市街地へ適用し、避難行動解析に含まれる不確実要因が解析結果へ及ぼす影響を定量的に明らかにするとともに、提案手法の有用性を示す。

2. 確率論的避難安全性の評価手法

(1) 避難行動解析に含まれる不確実要因の整理

津波避難対策を検討する場合には、災害発生以前に、発災時の避難行動の様相を想定することになるため、津波避難シミュレーションを用いて、この想定を行う場合、数値計算を構成する要因に、避難者の初期分布といった不可知の要素が含まれる。こうした津波避難行動解析に含まれる不確実要因を表-1のように整理した。不確実要因は、大きく避難者、避難環境、津波外力に分けられ、それぞれ表に示した要素で構成される。本研究では、避難行動解析自体が内包する不確実要因の影響を検討するので、避難者の不確実要因のみを検討対象とするが、災害時の避難路の閉塞による避難環境の変化や津波外力の要因を検討で考慮する場合には、近年の地震・津波解析の知見^{4,5)}を取り入れることで今後、検討可能である。

表-1 避難行動解析中の不確実要因の整理とパラメータの設定方法

不確実要因	構成要素	検討での考え方	パラメータの設定方法
避難者	初期位置	計画人口	H22国勢調査に基づく町丁・字等別昼間人口 (25869人、ランダム分布)
	開始時間	目標避難開始時間	地震発生後600±100 sの正規分布
	避難速度	統計的な通常時 歩行速度に基づく (Weidmann, 1993)	65歳未満: 1.34±0.26 m/s の正規分布 65歳以上: 0.67±0.26 m/s の正規分布 (≥ 0.35 m/s)
	避難手段	原則徒歩避難	徒歩避難
	避難先	目標とする避難先	最寄りの避難場所 (震災実績を参考)
	避難経路	目標とする避難経路	最短経路
避難環境	避難路	想定道路網	震災以前の道路網
津波外力	到達時間	想定津波	東北地方太平洋沖地震津波の数値計算
	浸水深		

本研究では、検討対象地域での避難安全性を「目標とする避難が行われた場合の津波暴露リスクの程度」と定義する。これにより、避難の手段は原則徒歩、避難先・経路などの避難の方法は最寄り避難場所に最短経路で避難することに一意に定めることができる。なお、表にあって示した避難者パラメータの設定方法と考え方は次節で詳しく述べる。

(2) 避難者パラメータの設定方法と考え方

避難者の総数は、統計値等を参考にした計画人口を基に決定することができるが、各避難者の位置は、一意に決定することは出来ないため、統計値に従ってランダムに分布させ、設定する。広域の行動を検討する津波避難では、建物火災など、対象規模が小さい場合と比較して、この分布が解析結果に及ぼす影響が大きいと考えられる。

避難開始時間は、計画者が目標避難開始時間として提示するものを設定することが多い。ここで、強い揺れが続く最中は、避難行動を開始できないことが実態として知られており、避難開始時間の設定には、これを考慮する必要がある。本研究で対象とする気仙沼市では、東日本大震災時に観測された時系列震度⁹⁾と既往研究の避難可否基準⁷⁾に基づく地震発生約3分後までは、避難開始が困難であったと考えられる。住民は、状況把握や判断の後に、順次避難を開始するものと想定し、本研究では、目標避難開始時間を平均 600 s、標準偏差 100 sの正規分布で考えた。これは全住民が地震発生後、およそ5分から15分の間に避難を開始することに対応する。

避難者の避難速度は、歩行者に関連する検討で広く用いられている通常時の歩行速度の統計値⁹⁾に基づき設定する。ここで、本研究では、65歳未満の避難者と65歳以上の避難者を区別して考慮した。65歳未満の避難者には、統計に基づき平均 1.34 m/s、標準偏差 0.26 m/sの正規分布で表現する歩行速度分布を、65歳以上の避難者には、65歳未満避難者の半分の平均速度を考えた。これは、Imms & Edholm⁹⁾の屋外活動性の低い高齢者の自由歩行速

図-1 確率論的避難安全性評価の概念図

度 0.66 m/s に整合する値である。確率分布で与える移動速度に負値が発生しないように、本検討では、閾値として最低速度 0.35 m/s を設定した。これは確率分布のおよそ下側 10% に相当する。

(3) 確率論的避難安全性の評価手法の提案

前節に示したように、津波避難行動解析には、避難行動が含む不確実要因により、統計値を設定できるものの、一意に決定できないパラメータが含まれる。例えば、避難場所から遠く配置された避難者に、遅い避難開始時間と、低速な避難速度が与えられた検討ケースと、逆の検討ケースでは、計算される避難の様相は異なり、安全性の評価結果も、それに応じて変化することが想定される。

本研究で提案する多数シナリオ津波避難シミュレーションによる確率論的避難安全性評価の概念図を図-1に示す。避難行動解析でランダムに与えられるパラメータによって変化する避難シナリオを、多数計算することができれば、避難シナリオ毎に変化する人的被害の程度とその発生頻度、すなわち津波暴露リスク分布を直接算定することができる。これにより、これまで議論した不確実要因の影響を反映した避難安全性の評価が可能になる。

3. 提案手法の実市街地への適用

(1) 避難行動解析諸元

a) 対象領域

本検討では、図-2に示す、宮城県気仙沼市の中心市街地 $4 \times 5 \text{ km}^2$ の領域の避難行動を対象とした。本領域は、震災時の知見が豊富¹⁰⁾であることや、詳細な避難行動シミュレーションを必要とする複雑な街路を有していることを理由に決定した。街路や地形は震災以前のものを用い、避難場所は震災で利用実績のあった避難場所を参考に決定した。図中に示したA地点では、性能評価の際に、計算された避難行動の様子を確認する。

b) 避難行動解析モデル

解析には、Social Forceモデルにポテンシャルモデルを統合することで、複雑かつ大規模な領域でも詳細な徒歩避難行動を解析可能にしたマルチエージェント徒歩避難シミュレータ¹¹⁾を採用した。詳細は既往文献¹¹⁾に譲るが、本解析モデルは、連続平面2次元上の歩行者の追い越しや回避といった動きを直接計算するもので、混雑によって移動速度が低下するといった基礎的な歩行者の挙動⁹⁾を定性・定量的に再現できることを確認している。

c) 並列計算手法

採用した避難行動解析モデルは、密度-速度関係などのマクロな仮定を設けず、より現実に近い歩行者の挙動を計算可能であるため、再現される現象の妥当性も高い。しかし、詳細な解析であるため、図-2に示した津波避難行動を検討するようなスケールでは、計算コストが大きく、多数シナリオ検討も難しくなる。そこで、本研究では、大規模の多数シナリオシミュレーションを実現するために、計算の並列化による解析の高速化を検討した。

今回採用した解析モデルのように、避難者を粒子として扱い、その干渉を計算するようなLagrange的計算の並列化では、空間分割法¹²⁾が一般的である。しかし、避難行動のようにある一点に、計算対象である避難者が集中する場合、安定した並列計算の性能を得るためには、メッシュ再構築などの動的負荷分散の機構を用意し、それを一定のタイムステップで実行する必要がある。

そこで、本研究では、各エージェントに固有のIDを与えて、IDに応じて、各並列プロセスがほぼ同数のエージェントを並列して処理する方法を考えた（以下、ID法）。本研究で考案したID法のイメージを図-3に示す。図は N' MPIプロセス数で N 体のエージェントの避難行動を並列処理した場合、各プロセスが担当するエージェント数が3体になった場合を示している。各プロセスの同期処理が必要、メモリの制約から超大規模計算には適用できないなどの課題もあるが、MPIプロセスの増加に伴って、各プロセスが担当するエージェント数が減少するため、検討規模では、安定した性能を得ることができる

図-2 計算対象領域と設定避難場所

図-3 並列計算の概念図

と考えた。また、各MPIプロセスが担当するエージェントの処理をさらにOpenMPIによりスレッドで並列処理することで、ハイブリッド並列化も容易に実装可能である。

d) 計算条件

避難者の避難の方法や、避難開始時間、移動速度などの計算パラメータは、表-1に既示したパラメータの設定方法に従って決定し、国勢調査に基づいて推計した町丁・字等別の昼間人口分布に従って、合計 25,869 人の避難行動を検討した。このうち 7,055 人が 65 歳以上人口である。避難行動解析モデルでは、人体円の半径は 0.25 m としており、人の肩幅等を考慮した現実的なパラメータで、避難行動が計算される。その他モデル固有のパラメータについては、既往研究^{11),14)}を参照されたい。

計算対象領域は、全域を1mメッシュで解像しており、エージェントは、このメッシュを参照しながら、連続平面2次元座標上を移動する。エージェントは避難を開始すると、まず最寄りの道路に向けて移動し、その後、道路を避難場所まで移動する。既往研究^{23),10)}と同様に、避難後の行動までは考慮しないが、今後、検討の必要はあろう。計算の再現時間は確実に避難完了、もしくは津波暴露が計算される 5400s とし、時間刻み幅は 0.01s とした。津波外力には、津波数値計算結果¹⁰⁾を採用し、内閣府想定¹⁹⁾を参考に浸水深 1m を津波暴露の基準とした。

(2) 計算性能の評価

多数シナリオシミュレーションを実施するにあたり、並列計算による、単一シナリオの計算性能を評価した。計算環境には、2×Xeon E5-2690v2/Nodeが、Infinibandで接続された計算機クラスター（最大600 CPUコア）を使用した。なお、この評価にあたっては、再現時間を3600 s、性能計測のバラつきを抑えるために、地震発生5分後に一斉避難とし、エージェントに避難開始時間や移動速度の分布を与えていない。また、同様の理由で津波数値計算結果の読み込み以外のI/Oは計測に含んでいない。

地震発生10分後の計算スナップショット（図-2中、A地点）を図-4に示す。図には、65歳未満、65歳以上のエージェントをそれぞれ緑、赤の球で表示している。広域の避難行動であっても、回避・追い越しといった個人スケールの詳細な避難行動が再現されている。

計算に使用したCPUコア数と実行時間の関係を図-5に示す。図に示したように、本研究で考案したID法によって、計算に投入するCPUコア数が増加するのに従って実行時間は減少し、100コア以上でリアルタイム、対象地域の津波到達時間よりも早く計算可能であった。しかし、MPIのみの並列化によるFlat MPIでは、400コア以上を使用した場合で、更なる高速化は困難であった。それに対し、OpenMPによるハイブリッド並列化では、計算機クラスターのフルノードまで使用した高速化が可能で、最大で実行時間の約5倍速での解析が可能であった。

プログラムをおよその処理別に分割し、実行時間の内訳を測定・比較したものを図-6に示す。Flat MPIのケースで実行時間の70%を超える割合を占めていたエージェントデータの通信・同期の処理が、ハイブリッド並列化により40%以下に低下し、相対的に避難行動計算が占める割合が増加していることが分かる。この結果から、スレッド並列を併用したことにより通信に参加するMPIプロセス数を抑えたことで通信コストが低下し、解析が高速化できたものと推察できる。

(3) 不確定要因の定量評価

並列化による計算の高速化により、大規模かつ詳細な津波避難シミュレーションの多数シナリオ検討が可能になった。そこで、表-1に示した解析条件での避難行動解析を500シナリオまで実施した。解析結果として、500シナリオ分の時系列避難完了率を図-7に示す。ここで、各シナリオは異なる線色で示している。巨視的に見た結果では、避難開始から完了までの移動分と思われるタイムラグがあるものの、概ね設定した目標避難開始時間に従ってエージェントが避難を開始し、対象地域で想定した津波が到達する、地震発生後約40分前後では、ほとんどの避難者が避難を完了しているのが分かる。巨視的には、検討値である避難完了率に大きな差は確認できないが、

図-4 計算スナップショット（図-2、A地点）

図-5 CPUコア数と計算実行時間の関係

図-6 計算実行時間の内訳（400コア実行時）

図-7 500シナリオの時系列避難完了率

図中の拡大図に示したように、詳細に検討結果を確認すると、検討値は一定の幅を持っていることが分かる。次に、この検討値の幅が、計算の時系列中にどのように推移しているのかを確認した。500シナリオ計算中に確認された、時系列での避難完了者数の最大値と最小値の差をプロットしたものを図-8に示す。ここで、避難完了者数の値の取得は1s毎に行ったものである。検討値の幅は、避難開始から上昇し、およそ全員が既に避難開始の状態となる地震発生後15分前後で高くなり、この時、時系列の避難完了人数に400人程度の差が発生していることが分かった。その後、避難完了率が上がるにつれて検討値幅は小さくなり、津波襲来後、一定値に収束する。

今回、多数シナリオ津波避難シミュレーションを実施したことで、初めて避難行動解析に含まれる不確実要因の解析結果への影響程度を定量的に明らかにすることができた。本論文での避難条件では、津波の襲来前にほとんどの避難者が避難を完了するため、この影響が津波暴露リスクに大きく現れないが、住民の避難開始に対して、相対的に津波の襲来が早い場合など、津波避難シミュレーションを用いて厳しい条件の検討を行う場合には、検討結果には大きな差が存在し得る。一般的に津波避難シミュレーションを用いた検討では、ある時刻での避難完了者数や、津波数値計算と重ね合わせた人的被害者数の大小で、対策効果を議論するため、解析中にランダムに設定する不確実要因を含む場合は、検討値が幅を持つことを留意しなければならないといえる。現在、発生が危惧されている南海トラフ巨大地震津波では、津波の到達が最短で地震発生後数分以内に想定されている地域もあり、前述した厳しい検討となる場合が多いことが想定される。そのような場合は、以上の知見を踏まえて計算結果を議論する必要がある。

(4) 確率論的避難安全性の評価

多数シナリオ津波避難シミュレーションにより得た、津波暴露と判定された人数とその発生頻度を、年代別津波暴露リスク分布として図-9に示す。避難行動解析中の不確実要因に対して与えたランダム性が分布の幅に対応して津波暴露リスク分布に反映されている。多数シナリオ計算を実施することにより、このようにリスク分布を直接算定することが可能になる。図-9(a),(b)は、それぞれ100シナリオ実行時と500シナリオ実行時の分布を表しており、分布型の比較から、500シナリオまで計算することで、安定した分布型を得ることが出来ていることが分かる。本検討での避難条件では、65歳未満避難者については、ほとんどのシナリオで津波暴露0人である一方、65歳以上の避難者については、10人前後の津波暴露が発生するシナリオが多く、津波暴露と判定される人数には±10人程度の幅がある。これを確率的に表現すると

図-8 検討値幅の時系列推移

図-9 年代別津波暴露リスク分布

(a: 100シナリオ, b: 500シナリオ)

図-10 年代別の確率論的避難安全性評価結果

図-10の関係を得る。本検討の解析条件では、65歳未満避難者は96.4%という高い確率で津波暴露0人を達成できるのに対し、65歳以上の避難者は津波暴露0人を達成することは難しく、暴露10人以下を達成できる確率も50%程度である。移動速度の遅い避難者への対策の必要性を示す結果であるといえる。このように多数シナリオ津波避難シミュレーションを実施することで、不確実要因の影響が確率の形で安全性評価に反映され、より信頼性の高い津波避難安全性の評価結果を得ることが可能になる。但し、解析では、全避難者が徒歩で避難できることを仮定しているのに対し、実際には、歩行が困難な避難者も地域に存在する。シミュレーションが示すものは、あくまで巨視的な仮定に基づく具体的な目標値であるが、この目標値によって、地域での避難計画や合意形成の議論がより具体的なものとなることが期待できる。

4. 結論

本研究では並列計算を活用して、大規模かつ詳細な津波避難シミュレーションを実現し、実市街地への適用を通して、新たに確率論的避難安全性の評価手法を提案した。本論文で得られた主要な結論を以下に示す。

- (1) 本研究で考案した ID 法による並列化は、津波避難シミュレーションにおける並列化方法として、簡便かつ安定した計算性能が得られる方法である。他の解析でも同様の効果が期待できる手法である。
- (2) 避難行動解析に含まれる不確実要因に与えるランダム性は、時系列の避難完了者数等に大きな影響を及ぼしうる。特に設定する避難開始時間に対して、津波到達が早い場合に、その影響が大きくなると推察され、厳しい避難条件の検討では、注意が必要である。
- (3) 本研究で提案した評価手法により、避難行動解析に含まれる不確実性の影響を考慮した、より信頼性の高い津波避難安全性の評価が可能になる。本評価手法により、様々な条件下で、安全な避難を実現できる方策を模索・検討することで、地域の避難に関する議論や合意形成の促進に貢献することが期待できる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、JSPS 特別研究員奨励費（17J03690）、東北大学災害科学国際研究所における共同研究「津波レジリエントな地域防災に向けた地域カスタマイズ型津波解析プラットフォームの検討」（代表：東京大学 古村孝志）の助成を受けた。本研究成果は東北大学災害科学国際研究所の所有する計算資源を利用して得たものである。

参考文献

- 1) 仙台市：津波避難施設の整備に関する基本的考え方, pp.31-38, 2013.
- 2) 有川太郎, 野地徹, 平野弘晃, 遠藤雅人：防護施設の津波避難に及ぼす影響に関する考察, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 72, No.2, pp.1_1561-I_1566, 2016.
- 3) Aguilar, L. and Wijerathne M.L.L.: On a Mass Evacuation

- Simulator with Complex Autonomous Agents and Applications, *J. Earthq. Tsunami*, **10**(5), 1640021, pp.1-17, 2016.
- 4) Fujita, K., Ichimura, T., Hori, M., Maddegadara, L. and Tanaka, S.: Scalable multicase urban earthquake simulation method for stochastic earthquake disaster estimation, *Proceeding of a Computer Science*, **51**, pp.1483-1493, 2015.
 - 5) Oishi, Y., Imamura, F. and Dugawara, D.: Near-field tsunami inundation forecast using the parallel TUNAMI-N2 model: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake combined with source inversions, *Geophys. Res. Lett.*, **42**, pp.1083-1091, 2015.
 - 6) 気象庁：強震波形（平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震）, http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/110311_tohokuchiho-taiheiyouoki/, 参照 2017-05-07.
 - 7) 秦吉弥, 湊文博, 常田賢一, 小山真紀, 鉢田泰子, 山田雅行：強震動予測および歩行実験に基づく津波避難困難地域の評価- 和歌山県串本町を例として -, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.71, No.2, pp.1_671-I_676, 2015.
 - 8) Weidmann, U.: Transporttechnik der Fussgänger. Schriftenreihe des IVT Nr. 90, ETH Zürich, pp.52, 1993.
 - 9) Imms, F.J. and Edholm O.G.: Studies of gait and mobility in the elderly, *Age Aging*, **10**(3), pp.147-156, 1981.
 - 10) Makinoshima, F., Imamura, F. and Abe, Y.: Behavior from tsunami recorded in the multimedia sources at Kesennuma city in the 2011 Tohoku tsunami and its simulation by using the evacuation model with pedestrian-car interaction, *Coast. Eng. J.*, 1640023, pp.1-28, 2016.
 - 11) 牧野嶋文泰, 今村文彦, 安倍祥：ポテンシャル場と Social Force モデルを用いた群衆避難行動の検討, 東北地域災害科学研究, 第 52 巻, pp.223-228, 2016.
 - 12) Liao, W., Seyfried, A., Zhang, J., Boltes, M., Zheng, X. and Zhao, Y.: Experimental study on pedestrian flow through wide bottleneck, *PED2014*, pp.26-33, 2014.
 - 13) Tsuzuki, S., Aoki, T.: Effective Dynamic Load Balance using Space-Filling Curves for Large-scale SPH Simulations on GPU-rich Supercomputers, *Scala 2016*, pp.1-8, 2016.
 - 14) Karamouzas, I., Skinner, B. and Guy, S.J.: Universal power law governing pedestrian interactions, *Phys. Rev. Lett.*, **11**, 238701, pp.1-5, 2014.
 - 15) 内閣府：南海トラフ巨大地震 建物被害・人的被害の被害想定項目及び手法の概要, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/2_2.pdf, 参照 2017-04-10.

(2017.3.15 受付)

A STOCHASTIC EVACUATION RISK EVALUATION BY MULTI-SCENARIO TSUNAMI EVACUATION SIMULATION

Fumiyasu MAKINOSHIMA, Fumihiko IMAMURA and Yoshi ABE

This paper presents a new methodology for tsunami evacuation risk evaluation considering uncertain factors in evacuation analysis based on multi-scenario tsunami evacuation simulation. First, Uncertain factors in tsunami evacuation simulations and its well-defined parameters are organized. Then, the evaluation methodology is applied to an actual urban environment with the defined parameters. Based on the multi-scenario analysis, we found the uncertain factors can have huge effect on simulation results such as evacuation completion ratios. The new methodology can offer reliable evacuation risk evaluation by reflecting the effects of the uncertain factors to evaluation results.