

2011年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動への津波避難シミュレーションの適用性

熊谷 兼太郎¹

¹正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）

E-mail: kumagai-k27n@ysk.nilim.go.jp

東北地方太平洋沖地震津波の避難行動を再現する津波避難シミュレーションを行い、適用性を検証した。対象は、岩手県釜石市の中心市街地における徒歩避難者の避難行動である。シミュレーションでは、街路・建物ネットワーク上の建物に約4,700人を配置し、収容可能人数を考慮した最寄りの避難場所を選択するモデル（条件付きp-メディアン問題モデル）を用いた。歩行速度はアンケートで得られた「高齢者比率」及び「グループ歩行比率」をパラメータとして設定した。シミュレーションで得られた避難完了者の時間的増加を示す曲線は、長距離を避難する行動など再現できていない部分はあるものの、青壮年を中心としたアンケートの結果と近く、リアス式海岸沿岸部の徒歩避難者の避難行動に津波避難シミュレーションをある程度適用できることが分かった。

Key Words : 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Tsunami Evacuation Simulation, Ria Coast

1. 研究の背景と目的

(1) 研究の背景

2011年東北地方太平洋沖地震により18,564人の死者・行方不明者が発生し（警察庁，2013）¹⁾、死因の約9割は溺死であった（同，2012）²⁾。こうした被害を踏まえ、中央防災会議は、想定される最大クラスの津波に対し「住民等の避難を軸に（中略）総合的な津波対策」が必要としている。また、「概ね5分程度で避難が可能となるようなまちづくり」を目指すべきとしている³⁾。このように、国、市町村、施設管理者等に対して津波避難の安全性を向上する対策が求められている。

効果的な対策を計画・実施するためには、対策に伴う効果の評価が必要である。例えば、避難ビルの整備に伴う避難所要時間短縮の効果、湾口防波堤の整備に伴う浸水遅延の効果、車避難者の比率を変化させる施策実施に伴う混雑緩和の効果等の評価が考えられる。前者二つは「構造物の整備」、後者は「避難行動の質的变化」が避難安全性に及ぼす効果をそれぞれ評価していると言える。

これらの定量的な評価手法の一つとして、津波避難シミュレーションを用いた手法が考えられる。

(2) 既往の研究

ここでは、避難シミュレーションに関する主な既往の

研究を、避難開始時間の推定モデル、避難場所の選択モデル及び避難者の歩行モデルという観点で整理する。

a) 避難開始時間の推定モデル

永川ら（2000）は、過去の津波避難行動のアンケート結果を統計的に処理することにより、災害情報の伝達経路・種類、地震の発生時間・大きさ、居住場所及び津波経験をパラメータとして避難開始時間を推定する手法を提案している⁴⁾。ただし、同一属性の地域には一律の値を与える手法であり、避難行動の個人差は考慮されていない。それに対し武田ら（1997）⁵⁾及び早川ら（2002）⁶⁾は、避難行動の個人差を考慮した手法を研究している。井料ら（2013）は感染症の拡散モデルを参考に避難開始時間をマクロ的に推定する数理モデルを提案している⁷⁾。

b) 避難場所の選択モデル

竹内ら（2002）は、避難者の現在地と海岸の位置関係を基準に避難場所の安全性を判定したうえで、最短直線距離の避難場所を選択する手法を提案している⁸⁾。行木ら（2007）は最短経路検索に加えて避難上のリスクを考慮した経路検索手法について提案し⁹⁾、筆者も著者として含む大江ら（2012）は、線形計画法の一種であるp-メディアン問題（総避難距離最小化問題）モデルを、収容可能人数が上限となる条件付きで避難場所の選択モデルとして適用することを提案している¹⁰⁾。

c) 避難者の歩行モデル

歩行速度に影響を及ぼすのは、年齢、同行者の有無、混雑、逃げ惑い、階段などの障害物、疲労等の要因である。最も単純化した手法は歩行速度として一定速度を与えるもので、例えば「津波避難ビル等に係るガイドライン」(2005)は避難可能範囲の推定の際に用いる歩行速度の目安として1 m/sの値を示している¹¹⁾。歩行速度を変化させたり、避難者同士や周辺環境からの情報取得による行動変化等の比較的複雑な避難者の行動を表現したりするために、マルチエージェントシミュレーション¹²⁾、個別要素法¹³⁾、ポテンシャルモデル¹⁴⁾、セルオートマトン法¹⁵⁾等が用いられている。

ただし、これらの避難シミュレーション結果と実際の避難行動とを比較して再現性の検証を行ったものはこれまでほとんど無く、シミュレーション結果の検証が課題である。2011年東北地方太平洋沖地震津波については避難行動のアンケートが実施されており、実際の避難行動を比較的詳細に把握できる。そこで、同地震に伴う津波の避難行動を再現する津波避難シミュレーションを行い、その結果と実際の避難行動とを比較することにより再現性を検証することとした。

(3) 研究の目的

本研究は、2011年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動を再現する津波避難シミュレーションを行い、その結果と実際の避難行動とを比較することにより再現性の検証を行うことを目的とする。

2. 東北地方太平洋沖地震津波の避難行動

(1) 対象地域

国土交通省都市局(2011)は、東北地方太平洋沖地震の津波浸水域をリアス式海岸沿岸部(石巻市牡鹿半島以北)と平野部(石巻市平野部以南)との2つに大きく区分して避難状況を整理している¹⁶⁾。本研究ではこの考え方を参考にして、リアス式海岸沿岸部の典型例として、岩手県釜石市中心部のうち甲子川左岸の地域を抽出した(図-1)。

対象地域の大きさは、東西約2.5km、南北約1.5kmの範囲である。対象地域の南側は東西方向に河川が流れるとともに、対象地域の東側と西側は街並みが途切れそれよりも外側の地区とは離れている。従ってこの対象地域は概ね避難行動が均質と考えた。すなわち海または河川に面した市街地から標高の比較的高い山のもとに向かって、基本的には北方向へ避難行動が取られると予想した。

一般に、行動様式が極端に異なる複数の避難者群が含まれている場合は、それぞれの避難者群の行動結果が重

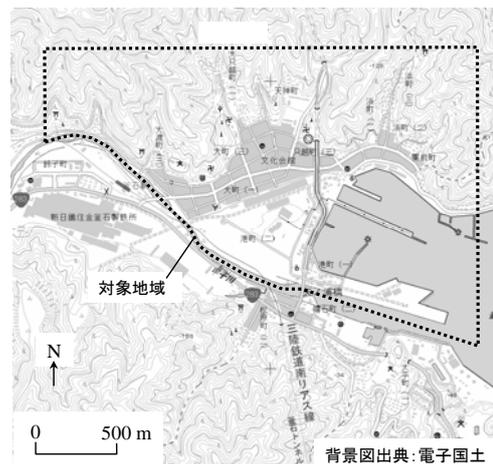


図-1 対象地域

なって一つの結果として現れるので、的確な分析が難しいと考えられる。そこで、避難行動がある程度均質な地域を抽出することを意図して、対象地域を設定した。

なお、今回の検討ではリアス式海岸沿岸部が対象であり、平野部の避難行動は検討の対象外である。また、徒歩避難者が対象であり、車避難者は検討の対象外である。

(2) 釜石市を対象にしたアンケート調査

2011年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動について、釜石市では、国土交通省東北地方整備局釜石港湾事務所と釜石市による「津波避難実態アンケート」(以下、釜石港湾事務所・釜石市アンケートという。)¹⁷⁾、国土交通省都市局による「津波からの避難実態調査」(以下、国土交通省都市局アンケートという。)¹⁸⁾、NPO法人環境防災総合政策研究機構と東洋大学による「津波に関するアンケート」¹⁹⁾及び群馬大学と釜石市によるアンケート¹⁹⁾という4種類のアンケートが実施されている。このうち、詳細なアンケート結果を入手することが出来た釜石港湾事務所・釜石市アンケート及び国土交通省都市局アンケート(釜石市に関する部分)の分析を行った。

(3) 釜石市の避難行動

a) 釜石港湾事務所・釜石市アンケート

アンケートの実施時期は2011年5月～6月で、市中心部の公共施設への来訪者、避難場所への避難者、企業の従業員等の431人から回答を回収している。

国土交通省東北地方整備局釜石港湾事務所の協力により、筆者は回答結果を入手することができた。それにより地震発生時に(1)の対象地域に所在していた178人のうち、徒歩避難を行った122人を抽出した。178人に対する割合、すなわち徒歩避難率は68.5%である。

表-1の第2列は、この徒歩避難者122人に関する整理結果である。「65歳以上比率」(65歳以上の回答者の比率)及び「グループ歩行比率」(2人以上で避難した回

答者の比率)はそれぞれ18.0%, 84.8%となった。この二つの指標は、3章で述べるシミュレーションにおいて避難者の歩行速度のパラメータとして利用している。徒歩避難者の地震発生から避難開始までの時間は平均14.3分であった。避難所要時間(避難開始から避難場所に到着するまでの時間)は平均6.1分となった。

図-2に、避難所要時間と避難完了者比率との関係を示す。ここで、避難完了者比率とは徒歩避難者の全体人数に対する当該時間までに避難を完了した人数の比率である。例えば、避難完了者比率が0とは避難完了者がいない状態、1とは全員が避難完了した状態を示す。避難所要時間10分程度まで、避難完了者比率の勾配は比較的大きいがその後は緩やかになっている。避難完了者が5割を超えるのは避難所要時間5分の時点、避難完了者が8割を超えるのは同10分の時点である。

b) 国土交通省都市局アンケート(釜石市分)

アンケートの実施時期は2011年9月～12月で、青森県から千葉県までの太平洋側に位置する49市町村の10,603人から回答を回収している。

国土技術政策総合研究所都市防災研究室の協力により、筆者は国土交通省都市局アンケートのうち釜石市の297人の回答結果を入手することができた。そのうち、避難経路の情報があつて地震発生時に対象地域に所在していた35人のうち、徒歩避難を行った24人を抽出した。35人に対する割合、すなわち徒歩避難率は68.6%である。

表-1の第3列に、この徒歩避難者24人に関する整理結果を示している。「65歳以上比率」及び「グループ歩行比率」はそれぞれ52.1%, 66.7%となった。a)とb)とを比較すると、b)に比べa)は65歳以上比率が小さく青壮年層が回答者の多くを占めている。徒歩避難者の地震発生から避難開始までの時間は平均10.8分であった。また、b)の調査では避難経路の詳細な情報がGISデータとして得られているため、それをもとに徒歩避難者の避難距離の平均値及び避難速度(総避難距離を総避難所要時間で除した値)を求めると、それぞれ393 m, 0.54 m/sとなった。避難所要時間は平均12.2分となった。

図-2に、避難所要時間と避難完了者比率との関係を示す。a)に比べb)は勾配が小さくなっている。避難完了者が5割を超えるのは避難所要時間10分の時点、避難完了者が8割を超えるのは同20分の時点である。

3. 津波避難シミュレーション

(1) シミュレーションモデルの概要

国土技術政策総合研究所沿岸防災研究室の開発している津波避難シミュレーションシステムであるNILIM-TES2を用いてシミュレーションを行った。対象地域は

表-1 アンケートの対象と結果の概要

| | 釜石港湾事務所・釜石市アンケート | 国土交通省都市局アンケート |
|------------|------------------|---------------|
| 全体の人数 | 431人 | 10,603人 |
| 分析対象(A) | 178人 | 35人 |
| 徒歩避難者(B) | 122人 | 24人 |
| 徒歩避難率(B/A) | 68.5% | 68.6% |
| 実施時期 | 2011年5～6月 | 2011年9～12月 |
| 65歳以上比率 | 18.0% | 52.1% *1 |
| グループ歩行比率 | 84.8% *2 | 66.7% |
| 避難開始時間 | 14.3分後 *3 | 10.8分後 |
| 徒歩避難者の避難距離 | - | 393 m *4 |
| 〃 避難速度 | - | 0.54 m/s *4 |
| 〃 避難所要時間 | 6.1分 *5 | 12.2分 *4 |

*1 アンケート票選択枝が10歳刻みのため、「60代」の回答のうち半数を65歳以上と仮定。

*2 不明の40人を除く。*3 逃げ遅れ・不明の8人を除く。

*4 24人から到着時刻不明の2人を除いた22人の平均値。

*5 不明(3名)を除くとともに、地震発生から大規模な浸水が発生するまでの時間が約45分程度であることを考慮して60分超(4名)を除いた。

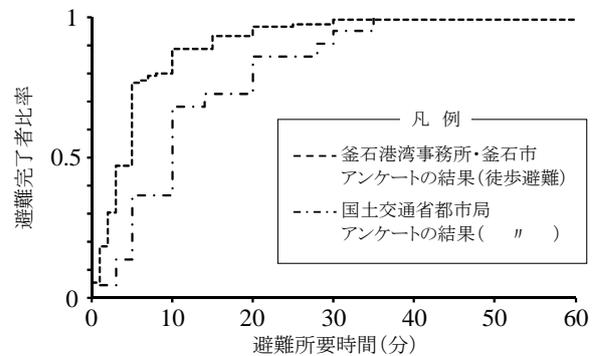


図-2 避難所要時間と避難完了者比率の関係

2(1)で述べたリアス式海岸沿岸部の地域であり、徒歩避難者約4,700人を配置した。避難場所選択は、収容可能人数を上限に最寄りの避難場所を選択するモデル(条件付きp-メディアン問題モデル)を用いた。歩行速度は、2(3)のアンケート結果より得た「高齢者比率」及び「グループ歩行比率」を参考に、グループ歩行、単独歩行(65歳以上)、単独歩行(65歳未満)の三区区分を設定し既往の文献²⁰⁾で示されている避難速度を一定速度で与えた。さらに、混雑、逃げ惑い及び障害物の発生を想定し避難者が交差点を通過するごとに10秒のロスタイムを与えた。なお、今回の検討では単純化のため避難者の疲労による速度低下等は考慮していない。

図-3に、シミュレーションのフローを示す。プログラムでは、まず建物・街路ネットワークデータ等のデータ読み込み、条件設定ファイルの読み込みを行う。次に、避難場所・経路を避難者ごとに与えるため、汎用的な線形計画問題ソルバーであるLINGO Ver.13 (Lindo社製)の入力形式に則った入力ファイルを作成する。このファイルをLINGOに投入することにより経路の解を得る。こうして得られた避難者ごとの経路情報について、避難速度及び

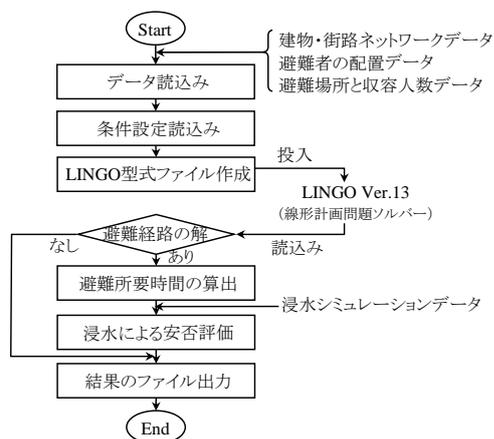


図-3 シミュレーションのフロー

交差点通過に伴うタイムロス considering 避難所要時間を算出・出力する。

(2) シミュレーションに必要なデータ

建物・街路ネットワークデータ、避難者の配置データ、避難場所と収容人数のデータ、浸水シミュレーション結果のデータが必要である。それぞれの構成内容を下に示す。また、参考として各データの形式サンプルを附属2に示す。

a) 建物・街路ネットワークデータ

建物・街路ネットワークデータは、建物（平面的な中心位置）、交差点、街路の変曲点、接道点（建物が街路に接続する点）等の平面位置座標を含むデータと、交差点と交差点、建物と接道点等の間の接続関係を表現する街路データから構成される。データは、住宅地図（株式会社ゼンリン、平成22年版）を参考として、汎用的なGISソフトウェアであるArcGIS for Desktop Basic Ver. 10.1（ESRIジャパン株式会社）を用いて建物、交差点、街路の変曲点、接道点等をPC画面上でプロットすることによりそれぞれの位置座標をデータ化して作成した。さらに、建物、各点の接続関係を入力したテキストデータとして街路データを作成する。このようにして、建物・街路ネットワークデータ一式とする。

作成された建物・街路ネットワークデータにおいて、建物数は2,711、街路数は1,094であった。

b) 避難者の配置データ

各建物に初期状態として避難者を配置した。地震発生は2011年3月11日14時46分で平日の就労時間にあたり、昼間人口を配置する必要がある。そこで、対象地域の常住人口を推定してから、昼間人口を推定した。

平成17年度国勢調査100mメッシュデータ（株式会社JPS）をArcGIS for Desktop Basic Ver. 10.1（ESRIジャパン株式会社）を用いて読み込み、対象地域に含まれるメッシュの人口を集計すると、常住人口は4,867人となった。これは平成17年度時点の値なので、地震の発生時に近い

時点（直近の国勢調査が行われた平成22年度）の値に補正する必要がある。釜石市全体の人口は平成17年（42,987人）と平成22年（39,574人）であり²¹⁾、市全体の人口と対象地域の人口が同じ時期に同じ比率で変化したと仮定して、平成22年時点の対象地域の常住人口を4,481人と推定した。

総務省²²⁾による平成22年時点の釜石市全体の常住人口（39,574人）と昼間人口（41,514人）との比を用いて、対象とした地域の昼間人口を約4,700人と推定した。これが、対象とした地域に配置する総人口である。

約4,700人を各建物に配置する方法は以下のとおりである。まず、建物種別を住宅と大規模建物の2種類に区分する。中央防災会議のアンケート²³⁾によると、岩手県では地震発生時に1~2名が在宅していた場合が72%を占めていて、不在の場合は約1割と少なかったことから、住宅には1名または2名を配置した。平均1.5人棟となるように、偶数番号の建物には1名を、奇数番号の建物には2名を配置した。つぎに、配置する総人口（4,700人）から住宅に配置した人数を差し引き、大規模建物にいる人の総数を推定する。ここで、大規模建物とはホテル、大規模な工場、市役所（関連施設含む）、合同庁舎、郵便局（本局）、学校（幼稚園・保育園を含む）、総合病院及び魚市場である。大規模建物の人数について参考となる適切なデータ（平日昼間に大規模建物に所在する平均的な人数）が無かったので、4,700人から住宅に配置した人数を差し引き、大規模建物の数で割り、5人単位で切り上げをおこなって、最終的に25名/棟とした。

以上のようにして、対象地域に配置した人口の総数は4,715名であった。

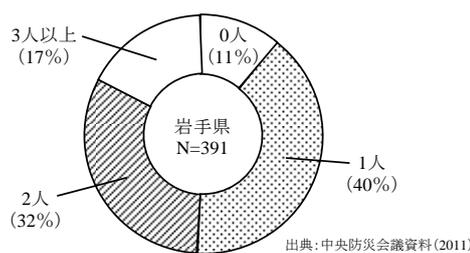


図-4 地震発生時に自宅にいた人数²³⁾

c) 避難場所と収容人数のデータ

避難場所は、地震発生前に市指定の21箇所とした。収容人数を推定するため、各避難場所を踏査する現地調査を平成24年10月25日~26日に行い、避難場所の形状を測定した。その結果をもとに、内閣府（2005）の示す値である1㎡あたり一人¹¹⁾として算定し、50人単位で切り上げて与えた。21箇所の収容可能人数は100~1,000人の範囲で、合計値は10,050人となった。b)の避難者数と単純に比較した場合は、収容可能人数が上回っている。

d) 浸水シミュレーション結果のデータ

浸水による安否判定を行う際に必要である。ただし、今回の検討では浸水による安否判定は行わず、避難開始から避難場所に到着するまでの避難行動の再現性の検討だけを行っているため、このデータは利用していない。

(3) 設定した条件

2(3)節の二つのアンケート調査結果によると、まずグループ歩行比率はそれぞれ84.8%、66.7%であった。そこで概ねの平均値である75%をグループ歩行比率とした。次に、歩行速度は「65才以上の年齢から急に遅くなっていく傾向がある」²⁹⁾などの65歳を境界とした歩行速度の変化に関する既往の指摘があることから、65歳以上と65歳未満とに区分する。前出のアンケート調査結果によると、65歳以上比率はそれぞれ18.0%、52.1%であった。そこで平均値である35%を65歳以上比率とした。

これをふまえ、避難者のうち75%はグループ歩行として歩行速度1.13 m/sとした。残りの25%は65歳以上単独歩行(9%)と65歳未満単独歩行(16%)に割り振り、それぞれ歩行速度を0.96 m/s、1.19 m/sとした。それぞれ設定した歩行速度は既往の文献²⁰⁾によっている。

避難者への割り振り方法は、各避難者に無作為に割り振った通し番号により、上述の3つの構成比を満たすように歩行速度をそれぞれ与えた。

なお、表-1で徒歩避難者の平均速度を示したが、この値は用いていない。理由は、この値には避難する際の混雑等のそれぞれの市街地の都市構造が避難行動に及ぼす影響を含んでしまっていて、そのまま汎用的に適用するには問題が生じる可能性があるためである。それに対し年齢と歩行速度の関係、グループまたは単独で歩く際の歩行速度は、人間の特性として普遍的と考えられるのでシミュレーションにおいて採用し、シミュレーションの汎用性を高めるためには、混雑、逃げ惑い、障害物、疲労等を考慮する必要がある場合は、別途モデル化すべきと考えたものである。今回のシミュレーションでは混雑、逃げ惑い及び障害物の発生を考慮して避難者が交差点を通過するごとに10秒のロスタイムを与え、避難者の疲労は考慮していないことは3(1)で述べたとおりである。

(4) 計算環境と処理時間

計算に用いたPCのオペレーティングシステムはWindows Vista™ Home Premium 64bit、プロセッサはIntel(R) Core™ i7-950 (3.06GHz, 8MB L3 Cache)、メモリは9.00GB RAMである。プログラミング言語はVisual C# 2010 with Visual Studio (R) 2010である。(1)と(3)の条件のうち処理時間に最も大きく影響するのは避難場所数であり、避難場所数が21箇所の場合、計算の処理時間は147秒である。

(5) シミュレーション結果と実際の避難行動との比較

図-5に、シミュレーションより得られた避難所要時間と避難完了者比率との関係を、実際の避難行動のアンケート結果に重ねて示す。アンケート結果は、図-2に示したものの再掲である。

シミュレーションで得られた避難完了者の時間的増加を示す曲線は、二つのアンケートのうち対象者に青壮年が占める割合が大きい釜石港湾事務所・釜石市アンケートの結果と概ね近い形状となった。ただし、避難所要時間が10分を超えるような比較的長い距離を避難する部分と、避難所要時間が非常に小さい部分は十分に再現できていない。長距離を避難する行動は、出発地から避難場所まで数か所を経由する等の必ずしも最短経路によらない行動があることが原因の一つと考えられる。また、避難所要時間が非常に小さい部分は、地震発生時にもともと避難場所の中や近傍にいたと回答した避難者があったことから、初期の避難者の配置(2(b))がある程度の仮定を置いていることが原因の一つと考えられる。このように長距離を避難する行動など再現できていない部分はあるものの、リアス式海岸沿岸部の徒歩避難者の避難行動に津波避難シミュレーションをある程度適用できることが分かった。

シミュレーションの結果、避難場所の収容人数に対する避難者数の比率は0.08~1.00の範囲で分布していた。21箇所の避難場所のうち7箇所まで収容人数に達して飽和している(図-6)。最短ではない場所に避難が必要な避難者が発生するため、避難場所の収容人数の設定値が計

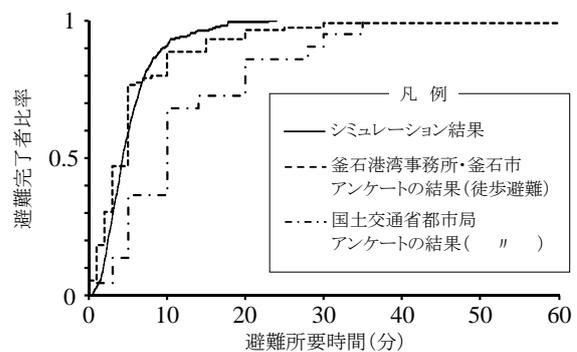


図-5 避難所要時間と避難完了者比率の関係

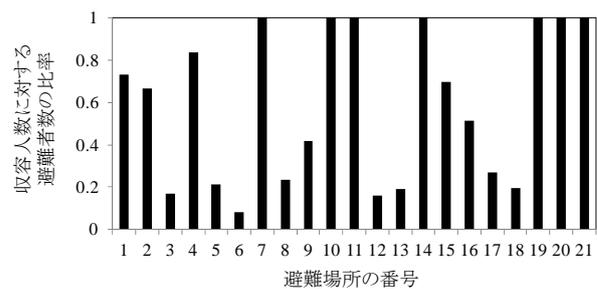


図-6 収容人数に対する避難者数の比率

算結果に影響していることを示す結果となった。ただし、避難場所の実際の収容人数に関するデータは筆者は未入手のため、シミュレーション結果と実際の現象との比較はできていない。

4. 結論と今後の課題

本研究は、2011年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動を再現する津波避難シミュレーションを行い、その結果と実際の避難行動とを比較することにより再現性を検討した。その結論及び今後の課題は以下のとおりである。

(1) 結論

シミュレーションで得られた避難完了者の時間的増加を示す曲線は、二つのアンケートのうち対象者に青壮年が占める割合が大きい釜石港湾事務所・釜石市アンケートの結果と概ね近い形状となっており、長距離を避難する行動など再現できていない部分はあるものの、リアス式海岸沿岸部の徒歩避難者の避難行動に津波避難シミュレーションをある程度適用できることが分かった。

また、シミュレーションでは避難場所の選択の結果、21箇所の避難場所のうち7箇所まで収容人数に達して飽和しており、最短ではない場所に避難が必要な避難者が発生するため、避難場所の収容人数が計算結果に影響している結果となった。

(2) 今後の課題

避難場所選択モデルは、避難場所の収容人数の制約条件下ではあるものの最短経路の避難場所を選択するように、“合理的”なものとしている。しかし実際の避難行動では、出発地から避難場所まで数か所を経由する等の必ずしも最短経路によらない“不合理な”行動が生じているので、こうした行動を適切にモデル化することが課題となる。例えば南ら(2005, 2006)は、その一連の研究で宮古市田老地区において昼と夜のそれぞれの住民の所在位置を詳細に調べたり、主要な避難路の勾配、整備状況、幅員、起伏、到達標高等を詳細に調べたりして総合的に避難場所を決定するというアプローチをとっている^{25), 26)}。このように個別に地域を調べて避難場所を決定していく方法、数学的手法を活用して最適配置に基づいて一律のルールで避難場所を決定していく方法等が考えられるので、津波避難シミュレーションにおいて今後も試行錯誤が必要な課題であると考えられる。

また、本研究ではリアス式海岸沿岸部が対象であり、平野部の避難行動は検討の対象外である。また、徒歩避難者が対象であり、車避難者の避難行動は検討の対象外である。国土交通省都市局の被災地全体を対象にした調査¹⁰⁾によると、リアス式海岸沿岸部に比較して平野部で

は、避難者の全体に占める車避難者の割合が高くなっている。平野部の避難行動をシミュレーションの対象とする場合、車避難者の避難行動のモデル、長距離を避難する避難者の疲労の考慮、また、車避難と徒歩避難との混在により発生する現象の適切なモデルについての検討が必要と考えられる。

謝辞: 本研究にあたり、釜石市危機管理監防災危機管理課、国土交通省東北地方整備局釜石港湾事務所、国土技術政策総合研究所都市研究部都市防災研究室ほか、関係者の皆様にお世話になりました。また、釜石市の避難シミュレーションに必要な道路・建物ネットワークデータの構築に際して、国土技術政策総合研究所沿岸海洋・防災研究部沿岸防災研究室のメンバーにご助力頂きました。ここに記して、御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 警察庁：平成 23 年東北地方太平洋沖地震の被害状況と警察措置，広報資料，2p.，2013 年 4 月 10 日。
- 2) 警察庁：東日本大震災と警察，p.14，広報誌焦点，第 281 号，2012。
- 3) 中央防災会議：東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告，44p.，2011 年 9 月 28 日。
- 4) 永川賢治・今村文彦：情報伝達・避難開始時間に着目した防災力評価法の提案，津波工学研究報告，東北大学工学部，第 17 号，pp.79-94，2000。
- 5) 武田誠・井上和也・戸田圭一・川池健司：高潮ハザードマップと避難に関する二・三の検討，海岸工学論文集，第 44 巻，pp.356-360，1997。
- 6) 早川哲史・今村文彦：津波発生時における避難行動開始モデルの提案とその適用，自然災害科学，日本自然災害学会，pp.51-66，2002。
- 7) 井料隆雅・辻本晋吾・天野和信：避難タイミング決定行動の数理モデルとその検証，平成 24 年度土木学会重点研究課題シンポジウム，土木学会土木計画学研究委員会・安全問題研究委員会，pp.17-20，2013 年 3 月 29 日。
- 8) 竹内光生・近藤光男：地震津波発生時の避難場所の選定に関する研究―須崎市を事例として―，土木計画学研究・論文集，土木学会，Vol. 19，no.2，pp.297-304，2002。
- 9) 行木雅子・金光永煥・門倉博之・浦野義頼：地震災害時において周辺環境及び個人属性を考慮した避難経路の決定手法，日本災害情報学会第 9 回研究発表大会予稿集，pp.75-80，2007。
- 10) 大江悠介・山田裕通・渡邊祐二・熊谷兼太郎：津波避難施設の最適配置のための数理計画モデル生成，日本オペレーションズ・リサーチ学会 2012 年春季研究発表会アブストラクト集，pp.130-131，2012。
- 11) 津波避難ビル等に係るガイドライン検討会・内閣府政策統括官（防災担当）：津波避難ビル等に係るガイドライン，68p.，2005。
- 12) 堀宗朗・犬飼洋平・小国健二・市村強：地震時の緊急避難行動を予測するシミュレーション手法の開発に関する基礎的研究，社会技術研究論文集，Vol.3，pp.138-145，2005。

- 13) 清野純史・三浦房紀・瀧本浩一：被災時の群集避難行動シミュレーションへの個別要素法の適用について，土木学会論文集，No.537/I-35，pp.233-244，1996.
- 14) 西畑剛・森屋陽一・田村保・瀧本浩一・三浦房紀：気仙沼地点における津波避難シミュレーション，海洋開発論文集，土木学会，第21巻，pp.163-168，2005.
- 15) 白木渡・井面仁志・有友春樹：Live Designのための参加型避難シミュレーションシステムの開発，第61回年次学術講演会後援概要集，pp.379-380，2006.
- 16) 国土交通省都市局：津波避難を想定した避難路，避難施設の配置及び避難誘導について（改訂版），79 p.，2012.
- 17) 交通政策審議会港湾分科会：参考資料，第3回防災部会，資料2，p.24及びp.30，2011年7月6日.
- 18) NPO 法人環境防災総合総合政策研究機構：東北地方・太平洋沖地震、津波に関するアンケート調査分析速報，<http://www.npo-cemi.com/works/image/2011tohoku/0507tsunamisurvey.pdf>，2011年5月7日.
- 19) 釜石市：3.11 東日本大震災アンケート調査について，<http://www.city.kamaishi.iwate.jp/index.cfm/6,19757,34,html>，2012年4月19日.
- 20) 日本建築学会：建築人間工学事典，彰国社，p.47，1999.
- 21) 釜石市：釜石市統計書（平成23年度版），p.23，<http://www.city.kamaishi.iwate.jp/index.cfm/10,22134,82,html>，2013年5月1日時点.
- 22) 総務省統計局：都道府県・市区町村別昼間人口，夜間人口，昼夜間人口比率，<http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2010/index.htm>，2013年5月1日時点.
- 23) 中央防災会議：平成23年東日本大震災における避難行動等に関する面接調査（住民）単純集計結果，東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会第7回会合，参考資料1，p.131，2011年8月16日.
- 24) John J.FRUIN：歩行者の空間，長島正充訳，鹿島出版会，p.48，1974.
- 25) 南正昭・中嶋雄介・安藤昭・赤谷隆一：避難経路の高低差が津波避難者に与える負荷に関する基礎的研究，都市計画論文集，日本都市計画学会，No.40-3，pp.685-690，2005.
- 26) 南正昭・谷本真佑・安藤昭・赤谷隆一：住民分布を考慮した津波避難計画の支援に関する研究，都市計画論文集，日本都市計画学会，No.41-3，pp.695-700，2006.

(2013.5.7 受付)

APPLICABILITY OF TSUNAMI EVACUATION SIMULATION OF EVACUATION ACTIVITY DURING THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE TSUNAMI

Kentarō KUMAGAI

In this study, applicability of tsunami evacuation simulation is discussed in such a way as to compare between a result of the simulation and a result of questionnaires of evacuation activity to evacuees during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake Tsunami. A target of the simulation is a nearshore area in a bay of ria coast of Tohoku district, and number of evacuees is about 4,700. In a model of the simulation, evacuees select their evacuation sites in accordance with a route choice problem with its capacity limit, "Conditional p-median problem". Evacuee's walking speed is decided from parameters by introducing the result of the questionnaire conducted on evacuees, in terms of a proportion of elder persons to the evacuees and a proportion of persons who evacuate in group to the evacuees. According to the result of simulation, a shape of a curve which expresses the relation between time and number of evacuee who arrives at their goal is also seems to be agree with a result of the questionnaire on evacuee. In spite of the problem on the route choice for evacuee who makes complex evacuation route, it is found that result of the evacuation simulation is agree with result of tsunami evacuation activity on foot at a nearshore area in a bay of ria coast.