2011年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動の 津波避難シミュレーションによる再現性の検証

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の津波避難シミュレーションを行い、再現性を検証した。対象は、岩手県釜石市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、建物・街路ネットワーク上に約4,700人を配置し、収容可能人数の制約がある条件付きで最寄りの避難場所への最短経路を選択する経路選択モデルを用いた。また、アンケートで得られた「65歳以上比率」及び「グループ歩行比率」を満たすように避難者の歩行速度の初期値を与えた。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, Kamaishi City

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¹⁾）、死因の約9割は溺死であった（同²⁾）。こうした被害を踏まえ、中央防災会議³⁾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」が必要であると指摘している。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。このように、国、自治体、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。

適切な対策を計画・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、防波堤の整備に伴う浸水遅延の効果、避難完了時間を早める施策実施に伴うリスク低減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。それらの定量的な評価を行う手法の一つとして、津波避難シミュレーションを用いることが考えられる。

(2) 既往の研究

ここでは、避難シミュレーションに関する既往の研究

のうち主要なものについて、避難開始時間の推定モデル、避難経路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して示す。

a) 避難開始時間の推定モデル

永川・今村⁴⁾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。ただし、属性が同一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⁵⁾及び早川・今村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⁷⁾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。

b) 避難経路の選択モデル

竹内・近藤⁸⁾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。行木ら⁹⁾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、大江ら¹⁰⁾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、収容可能人数の制約がある条件付きの避難経路の選択モデルとして適用することを提案している。

c) 避難者の歩行モデル

歩行速度に影響を及ぼす要因は、年齢、同行者の有無、混雑、逃げ惑い、自動車との交錯、階段などの障害物、疲労等である。最も単純な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」¹¹⁾は避難可能な範囲を推定するための歩行速度の目安として1m/sの値を示している。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、再現性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、同津波の避難行動について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について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シミュレーションの再現性を検証することを目的とする。

そのため、2章では、東北地方太平洋沖地震津波のときの実際の避難行動に関するアンケート結果の分析を行った。3章では、避難シミュレーションを行うとともに、前章のアンケート結果との比較を行った。最後に4章では、結論と今後の課題を述べた。

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¹⁶⁾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。本研究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、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。具体的には、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ふもとに向かって、

図-1 対象地域

概ね一様に北方向へむかう避難行動が生じると予想した。

上述の対象地域を設定した理由を述べる。一般に、行動様式が大きく異なる複数の避難者群が含まれている場合に、それぞれの避難者群の行動結果が重なって一つの結果として現れるものに対して的確な分析を加えることは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よう意図して設定した。

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、徒歩以外の車、バイク、自転車等による避難行動は検討の対象外である。さらに、生存者へのアンケート結果をもとに避難行動の再現性の検討を行っているため、釜石市全体で死者・行方不明者が1,040人発生したが¹⁷⁾（同市の2010年時点の人口39,574人¹⁸⁾に対して約3%）そうした不幸にも亡くなったり行方不明となったりした方々の行動は十分な情報がないため考慮されていない。こうした点は留意が必要である。

(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。）¹⁹⁾、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。）¹⁶⁾、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」²⁰⁾及び群馬大学と釜石市によるアンケート²¹⁾という4種類のアンケートが実施されている。このうち、アンケート結果の個票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み）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¹⁹⁾

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。また、対象地域の昼間人口4,700人（推定方法は3(2) b)で述べる。）に対する122人の割合は約2.6%である。

表-1の第2列に、この徒歩避難者122人に関する整理結果を示す。「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初期値を与える際に利用している。なお、2010年の国勢調査によれば同市の65歳以上比率は、釜石市全体の値であるが、約34.8%となっている。

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に破線で、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。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く、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）¹⁹⁾

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って地震発生時に対象地域に所在していたことが分かる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24人の割合、すなわち徒歩避難率は68.6%である。また、対象地域の昼間人口4,700人（推定方法は3(2) b)で述べる。）に対する24人の割合は約0.51%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す。「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。釜石港湾事務所・

表-1 アンケートの対象と整理結果

	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}
徒歩避難速度	-	0.54 m/s ^{*4}
徒歩避難所要時間	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

釜石市アンケート (a) と国土交通省都市局アンケート (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ことが分かる。

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に一点鎖線で、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)は全体に避難所要時間が遅くなっている。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、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

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-TES Ver. 2.2を用い徒歩避難者のシミュレーションを行った²⁾。

図-3に、同システムのプログラムのフローを示す。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を読み込み、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 Systems Inc.) 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に投入し経路の解を得る。避難者を出発地点に配置し、各避難者についてそれぞれ避難経路上の1s後の空間的位置を計算する。街路の群集密度を計算し、歩行速度を修正したあと、交差点を通過していればロスタイムを付与する。避難完了するまで空間的位置を計算する手順以降をループ状に繰り返し、避難完了するまでの避難所要時間を算出・出力する。

対象地域は2(1)節で述べたリアス式海岸沿岸部の地域で、避難者として約4,700人を分散して配置した。

避難経路選択は、収容可能人数の制約がある条件付きで最寄りの避難場所への最短経路を選択するモデル(条件付きp-メディアン問題モデル)を用いた。

歩行速度は、65歳以上単独歩行、65歳未満単独歩行及びグループ歩行という3区分を設定し、既往の文献²³⁾で示されている値を初期値として避難者ごとに与えた。その際、2(3)節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」をそれぞれ満たすようにした。

避難開始時刻は一律とし、一斉に避難開始させた。混雑を考慮するため、群集密度と歩行速度の関係をモデル

化した。Older²⁴⁾によれば、群集密度が0.5人/m²程度までは歩行速度は他者の影響を受けないようである。また、群集密度が3.0人/m²程度を超えると、歩行速度は0.2m/s程度と考えてよいようである。そこでOlder²⁴⁾を参考に、群集密度が0.5人/m²未満及び3.0人/m²以上は歩行速度がそれぞれ自由歩行速度及び0.2m/sで一定、また、群集密度0.5人/m²以上3.0人/m²未満は、群集密度が大きくなると歩行速度が直線的に低下するモデルである式(1)を提案する。

$$\left. \begin{aligned} v &= v_0 & (d < 0.5 \text{ 人/m}^2) \\ v &= v_0 - (v_0 - 0.2)(d - 0.5) / 2.5 & (0.5 \leq d < 3.0 \text{ 人/m}^2) \\ v &= 0.2 & (3.0 \text{ 人/m}^2 \leq d) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 v : 歩行速度 (m/s), v_0 : 自由歩行速度 (m/s) 及び d : 群集密度 (人/m²) である。また自由歩行速度 v_0 を65歳以上単独歩行、65歳未満単独歩行及びグループ歩行の3区分についてそれぞれ0.96 m/s, 1.19 m/s及び1.13 m/sとした場合の群集密度と歩行速度の関係を示す(図-4)。このように、避難者をグループ歩行の有無及び年齢の属性で区分し歩行速度の初期値を与え、群集密度と歩行速度との関係を定式化したモデルを採用していることは、今回のシミュレーションで用いたNILIM-TES Ver. 2.2の特徴の一つである。

初期位置から避難経路上を避難場所まで向かう避難者の空間的位置は時間ステップ1秒で計算し、各時刻における街路の群集密度を求めた。その際、駐車車両、植栽等を考慮し、標準的な車の幅である1.5 mを街路幅員よりまず差し引いてから、群集密度を算定した。群集密度が得られたのち、式(1)より算定した歩行速度を与えて次の時刻の空間的位置を求めるという手順で、全ての避難者が避難場所に到達するまで計算した。

逃げ惑い、自動車との交錯及び障害物の発生を考慮するため、避難者が交差点を通過するごとに5秒のロスタ

図-3 プログラムのフロー

図-4 群集密度と歩行速度

イムを与えた。ただし、この5秒という値は根拠となる適切な数値が無いため、暫定的に与えたものである。また、疲労の及ぼす影響については、今回の検討では単純化のため考慮していない。

(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、避難者配置データ、避難場所・収容可能人数データ及び浸水シミュレーション結果のデータが必要である。以下にその内容を示す。

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。街路の幅員は、対象地域の平均的な幅員を考慮して一律に6mとした。さらに、建物、各点の接続関係も入力する。

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) 避難者配置データ

各建物を出発地点として避難者を配置した。地震発生は平日午後の就労時間であったことから、昼間人口を配置する必要がある。そこで、まず対象地域の常住人口を推定したあと、昼間人口を推定した。

2005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2005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2010年度）の値に補正する。釜石市全体の人口は2005年に42,987人、2010年に39,574人であり¹⁸⁾、同じ時期に市全体の人口と対象地域の人口とが同じ比率で変化したと仮定して、2010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²⁹⁾による2010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したい総人口である。

約4,700人を各建物に配置する方法を述べる。まず、建物種別を住宅と大規模建物に区分する。地震発生時の在宅状況を調査した中央防災会議の調査結果²⁹⁾によると、岩手県では1～2名が在宅していた場合が72%を占めていて、不在は約1割と少ない（図-5）。そこで、住宅には1

図-5 地震発生時に自宅にいた人数²⁹⁾

名または2名を配置した。平均1.5人/棟となるよう、各住宅に割り振ったIDが偶数の建物に1名、奇数の建物に2名を配置した。

つぎに、配置したい総人口（4,700人）から住宅に配置した人数を差し引いて、大規模建物にいる人の総数を算出した。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1棟あたりの人数については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に関する情報）が無かった。そこで、4,700人から住宅に配置した人数を差し引いた、先に述べた値を大規模建物の数で割り、5人単位で切り上げをすることにより、1棟あたり25名と推定した。

以上のようにすると、対象地域に配置した人口の総数は4,715名となった。

c) 避難場所・収容可能人数データ

避難場所は、地震発生前に市が指定していた21箇所とした。平成24年10月25日～26日に、収容可能人数を推定するための現地調査を行った。調査では避難場所の面積を測定し、内閣府¹¹⁾の示す値である1㎡あたり一人として収容可能人数を算定し、50人単位で切り上げて与えた。その結果、各避難場所の収容可能人数が得られた。1箇所あたりの収容可能人数は100～1,000人の範囲で、21箇所の合計値は10,050人であった。

d) 浸水シミュレーション結果のデータ

浸水による安否評価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評価は行わず、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に着目して検討を行ったため、このデータは利用していない。

(3) 設定した条件（基準ケース）

2(3)節の二つのアンケート調査結果によると、グループ歩行比率はそれぞれ84.8%、66.7%であった。そこで平均値である76%をグループ歩行比率とした。

次に、歩行速度は「65才以上の年令から急に遅くなっていく傾向がある」など、65歳を境界とした歩行速度の変化に関する既往の研究²⁷⁾があることから、65歳以上と

65歳未満とに区分した。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76%はグループ歩行として歩行速度の初期値を1.13 m/sとした。残りの24%は65歳以上単独歩行（8%）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研究²³⁾によっている（付録を参照）。避難者への割り振り方法は、各避難者に無作為に生成した乱数を与え、上述の「グループ歩行」、「65歳以上単独歩行」及び「65歳未満単独歩行」のそれぞれの構成比を満たすように与えた。

なお、表-1で徒歩避難者の平均速度を示したが、シミュレーションでこの値は用いていない。この値には調査地の地理的条件が及ぼす影響等が含まれており、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と考えたためである。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た。シミュレーションの汎用性を高めるために、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ることとしたものである。

(4) 計算環境と処理時間

計算に用いたPCのプロセッサはIntel Core i7-950 (3.06GHz, 8MB L3 Cache)、メモリは9.00GB RAM、オペレーティングシステムはWindows Vista Home Premium 64bitである。プログラミング言語はVisual C# 2010 with Visual Studio 2010及びIntel Visual Fortran Composer XE 2013 SP1を併用した。図-3のフローの中で処理時間が最大なのは避難経路の解を得るプロセスであり、避難場所数が21箇所の場合、同プロセスの処理時間は167秒であった。

(5) シミュレーション結果と実際の避難行動との比較

図-6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、いずれも図-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は、十分に再現できていない。アンケート結果を参考に、長距離を避難する行動の例を挙げると、出発地から直接避難場所に向かわず、数か所を経由してから避難場所に到着した事例があった。また、地震発生時は自宅外に所在していて、いったん自宅に戻ってから避難場所に向か

図-6 シミュレーション結果と実際の避難行動の比較

図-7 避難者数と収容可能人数に対する比率（計算結果）

図-8 収容可能人数の制限が無い場合との避難者数の比較

った事例があった。こうした必ずしも最短経路によらない行動はモデル化できていないので、比較的長い距離を避難する部分が十分に再現できていない理由のひとつと考えられる。

以上のように、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。

図-7に、シミュレーションの結果による、避難場所ごとの避難者数、及び、収容可能人数に対する避難者数の比率を示す。それによると、収容可能人数に対する比率は0.08～1.00の範囲である。また、比率が1.00である、すなわち収容可能人数に達して飽和していたのは21箇所のうち7箇所である。超過した避難者は、最短ではない場

表-2 パラメトリックスタディで設定した条件

ケース No.	65歳以上比率	グループ歩行比率	単独歩行速度・65歳以上 (m/s)	単独歩行速度・65歳未満 (m/s)	グループ歩行速度 (m/s)	交差点でのロスタイム (s)	備考	参照先
0	0.35	0.76	0.96	1.19	1.13	5	基準ケース	図-9
1	0.18	0.85	-	-	-	-	釜石港湾事務所・釜石市アンケート ¹⁹⁾	
2	0.52	0.67	-	-	-	-	国土交通省都市局アンケート ¹⁶⁾	
3	-	-	1.00	1.00	1.00	-	内閣府 ¹¹⁾	図-10
4	-	-	0.68	1.16	0.84	-	文献値のうち最も遅い値	
5	-	-	-	-	-	0	ロスタイムなしの場合	図-11
6	-	-	-	-	-	10	ロスタイムが大きい場合	

(注) 数値の記入されていない欄（「-」と表示してある欄）は、ケース0（基準ケース）と同じ数値を設定した。

図-9 パラメトリックスタディ（ケース0, 1, 2）

図-10 パラメトリックスタディ（ケース0, 3, 4）

図-11 パラメトリックスタディ（ケース0, 5, 6）

所を選択する。このように、初期条件として与えた収容可能人数の値が、計算結果に影響している結果となった。避難場所です実際に収容した人数のデータは筆者は未入手で実態との比較は出来ていない。ただし、国土交通省都市局アンケート¹⁶⁾にはアンケート項目の一つとして「当日、津波から最初に避難した場所の立地や設備面で問題と感じたことはありますか。」という問いがあり、対象地域も含めた釜石市全体の回答結果ではあるものの、それに対する回答として「人で溢れて、入りきれなかった」という選択肢を回答者の約7%が選択していた。従って、収容可能人数に達して飽和していた現象がある程度は発生していたと考えている。

図-8は、仮に収容可能人数の制限がある場合と無い場合とについてそれぞれ、避難者数の計算結果を比較したものである。制限がある場合に比較して、無い場合は5箇所避難者数が増加している。

地震発生直後の緊急時には、通常に想定している人数を超過して過密な状態になる現象が発生する可能性もあり、今回のシミュレーションで採用した内閣府¹¹⁾の1 m²あたり一人という収容可能人数については、今後の検討が必要である。

(6) パラメトリックスタディ

(3)節で設定した条件がシミュレーション結果に及ぼす影響を分析するためパラメトリックスタディを行った。

表-2に、パラメトリックスタディのために設定した条件を示す。ケース0は、(3)節で設定した条件で計算して(5)節で結果の検証を行った、既述のケースである（以下、「基準ケース」と呼ぶ。）。ケース1及び2は、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で得られた値をそのまま用い、それぞれ計算したものである。具体的な数値は、同表に記載した。ケース3及び4は、歩行速度がシミュレーション結果に与える

影響を検討するため、「津波避難ビル等に係るガイドライン」¹⁰⁾が目安として示す1.00 m/sのケースと、文献値（付録の表を参照）のなかから各区分（65歳以上単独歩行、65歳未満単独歩行及びグループ歩行）で最も遅い速度を抽出して与えたものである。また、ケース5及び6は、交差点でのロスタイムなしとした場合と、交差点1箇所あたり10sとした場合である。

図-9に、ケース0、1及び2のシミュレーション結果を示す。3つのケースの結果はほぼ重なっており、このパラメトリックスタディで設定した数値の範囲内においては、65歳以上比率、グループ歩行比率を変化させたことによる影響は非常に小さい結果となった。なお、各ケースの計算結果の相違は非常に小さく、ほぼ重なっている状態であるが、ケース1はケース0に対してほぼ同じ線を描く一方、ケース2はケース0に対してわずかに下側になっている部分がある。65歳以上比率、グループ歩行速度の両パラメータが影響を及ぼしにくい原因については、図-4において設定した歩行速度の違いが比較的小さいこと、また、例えばケース0とケース1を比較すると、ケース1はケース0に比べてグループ歩行比率が増加してグループ歩行する（やや遅い）人の比率が増えたものの同時に65歳以上の（最も遅い）人の比率も減少したので結果的に大きな違いとならなかったことが考えられるが、それぞれのパラメータが単体で及ぼす影響等についての詳細な検討は今後の課題である。

図-10に、ケース0、3及び4のシミュレーション結果を示す。ケース0のシミュレーション結果より描かれる曲線に対して、ケース4の結果は全体として右側に位置しており、歩行速度を65歳未満単独歩行及びグループ歩行の2区分で遅くしたことの影響が表れている。ケース3の結果は、ケース0とケース4との間に位置している。

図-11に、ケース0、5及び6のシミュレーション結果を示す。交差点でのロスタイムなしとしたケース5は、1箇所あたり5sとしたケース0の曲線に対して全体として左側に位置している。また、1箇所あたり10sとしたケース6は、ケース0よりも全体として右側に位置している。

以上のパラメトリックスタディでは、基準ケースであるケース0に対し、ケース1～6のシミュレーション結果はある程度のずれが生じるものの、いずれも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に比較的近い形状となった。

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について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、シミュレー

ションの再現性を検証した。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、高齢者・グループ歩行者の及ぼす影響の詳細な検討や、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いたことから、最短ではない場所に避難が必要な避難者が発生しており、避難場所の収容可能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

a) 避難場所と経路の選択

避難経路は、条件付きで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、出発地から数か所を経由してから避難場所に到着する等の、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。南ら^{28) 29)}は、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、また、主要な避難路の形状等を詳細に調べ避難場所を決定するような、高解像度で地域を調べて避難場所を決定していくアプローチをとっている。本研究で採用したような最適配置手法に基づいて一定のルールで避難場所を決定していく方法を含め、避難経路選択のモデル構築は、今後も試行錯誤が必要な課題である。

b) 平野部の避難行動

本研究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、徒歩以外の車避難者等の避難行動は対象外である。国土交通省都市局の調査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。

平野部の避難行動のシミュレーションを実施するためには、車避難者の避難行動のモデル、長距離を避難する徒歩避難者の疲労を考慮したモデル、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今後の検討が必要である。

c) 歩行速度に影響を及ぼす要因

歩行速度に影響を及ぼす要因は、年齢、同行者の有無、混雑、逃げ惑い、自動車との交錯、階段などの障害物、

疲労等である。本研究では、年齢及び同行者の有無はそれぞれ避難速度を変化させることで考慮した。混雑は、群集密度を考慮して歩行速度を変化させることで考慮した。ただし、避難開始時間は一律としたので、今後、避難開始時間を個人差によるばらつきを考慮する必要がある。それに対し、逃げ惑い、自動車との交錯及び障害物の発生は、交差点を通過するごとに一定時間のロスタイムを与えることである程度考慮しているものの、非常に単純な仮定である。また、疲労は、本研究においてはシミュレーションの単純化のために考慮していない。この点については今後の検討が必要である。

謝辞：本研究にあたり、釜石市危機管理監防災危機管理課、同市産業振興部港湾振興課にご協力を頂きました。国土交通省東北地方整備局釜石港湾事務所・村上明宏所長（当時）、同事務所企画調整課の各位、国土技術政策総合研究所都市研究部都市防災研究室・木内望室長には、貴重な避難アンケート結果を参照させて頂きました。同研究所沿岸海洋・防災研究部沿岸防災研究室・菅野真由美さんと西村知美さんには街路・建物ネットワークデータの構築にご助力頂きました。その他多くの方のご協力頂き、ここに記して御礼を申し上げます。

付録 高齢者及び単独・グループの歩行速度

年齢と歩行速度の関係、及び、単独歩行・グループ歩行と歩行速度の関係については、多くの報告がなされている。表-A.1に、主要なものをまとめて示す。全般に数値はばらつきが大きい。その理由は、歩行速度に影響を及ぼす要因が多く存在するためである。岡田ら³⁰⁾は、環境、肉体的、服装、心理的及び集団的条件に分け、影響を与える可能性がある要因を列挙している。このように、歩行速度は多くの要因の影響で大きく変化するので一意に決定するのが難しい。

そこで、表にまとめた数値を相互に比較し、そのなかから適切と考えられる値を採用することとした。

まず、老人の単独歩行速度については、1 m/sをやや下回るのが多いようである。次に、老人以外の一般の単独歩行速度は、1.2～1.3 m/s程度が多いようである。さらに、グループ歩行速度は、0.8～1.3 m/s程度とばらつきが大きいようである。これをふまえ、本研究では紙野²³⁾の値を採用することとした。すなわち、老人の単独歩行速度、それ以外の単独歩行速度、グループ歩行速度としてそれぞれ0.96 m/s、1.19 m/s、1.13 m/sの値を採用した。

なお、ここでグループ歩行速度は、グループの構成者の年齢によらず与えた。すなわち、グループ歩行については「65歳以上の人を含むグループ」、「65歳未満グル

表-A.1 歩行速度

出典	単独歩行 (m/s)		グループ歩行 (m/s)	階段・上り坂の昇降 (m/s)
	老人	それ以外		
内閣府 ¹⁾	1.3	-	0.88～1.29	0.21
	1.0 *			
紙野 ²³⁾	0.96	1.19	1.13	-
ブルーイン ²⁷⁾	-	1.33	-	0.50～0.57
岡田ら ³⁰⁾	0.72～0.96	1.20～1.21	0.84～1.08	-
佐藤 ³¹⁾	0.68	1.16	-	-

*避難可能範囲の算定のための参考値として示されている値。

ープ」等の年齢による区分を設けていない。その理由は、グループの構成者の年齢に着目して歩行速度を調べた事例報告は少なく筆者の知る限り岡田ら³⁰⁾の例だけであること、また、グループの歩行速度は最も遅い歩行者に同調した歩行速度になるが（岡田ら³⁰⁾）、グループの構成者の年齢を適切に想定することが困難であることが挙げられる。

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.，2013.4.10.
- 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.，2011.9.28.
- 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.17-20，2013.3.29.
- 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) 釜石市：復旧・復興の歩み 改訂版，p.2，2014. 1.
 - 18) 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>，2013.5.1 時点.
 - 19) 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. 7. 6.
 - 20) 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>，2011.5.7.
 - 21) 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>，2012.4.19.
 - 22) 熊谷兼太郎：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，国土技術政策総合研究所資料，No. 742，22p.，2013.
 - 23) 紙野桂人：人のうごきと街のデザイン，彰国社，pp. 128-132，1980.
 - 24) Older, S. J.: Movement of Pedestrians on Footways in Shopping Streets, *Traffic Engineering and Control*, Vol. 10, pp.160-163, 1968.
 - 25) 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>，2013.5.1 時点.
 - 26) 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.131，2011.8.16.
 - 27) ジョン・J・フルーイン（長島正充訳）：歩行者の空間，鹿島出版会，p.48，1974.
 - 28) 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.
 - 29) 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.
 - 30) 岡田光正，吉田勝行，柏原士郎，辻正矩：建築と都市の人間工学，鹿島出版会，pp.16-28，1977.
 - 31) 佐藤方彦：人間工学基準数値数式便覧，技報堂出版，pp.285-288，1992.

(2014. 2. 28 受付)

VALIDATION OF TSUNAMI EVACUATION SIMULATION TO EVACUATION ACTIVITY FROM THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE TSUNAMI

Kentaro KUMAGAI

In this study, a validation of tsunami evacuation simulation is conducted by means of comparing a result of the simulation with results of questionnaires of evacuation activity to evacuees of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake Tsunami. A target area of the simulation is a nearshore area in a bay of a ria coast of Tohoku district, and the number of the evacuees is approximately 4,700. In the simulation, each evacuee select his or her evacuation site and route in accordance with the shortest route choice problem with the capacity limit of the evacuation sites, "Conditional p-median problem". The evacuee's initial walking speed is defined by parameters which were introduced by the results of the questionnaires, in terms of a proportion of elder persons and a proportion of persons who evacuate in group. According to the result of the simulation, a shape of a curve which expresses the relation between the time and ratio of the evacuees who arrive at their goal is also seems to be agree with the result of the questionnaire. In spite of the problem that the method of the evacuation route choice adopted in the simulation is not well agree for some evacuees such as the evacuees who make complex evacuation routes, it is found that the result of the evacuation simulation is agree with the result of the tsunami evacuation activity on foot at a near-shore area in a bay of a ria coast.