

避難行動解析に基づく復興事業による 住民避難への効果に関する研究*

堀合 紳弥[†]・武山 泰^{††}

On the Impacts of Reconstruction Projects on Residents' Evacuation based on Evacuation Behavior Analysis

Shin-ya HORIAI and Yasushi TAKEYAMA

ABSTRACT

In this study, the authors focus on reconstruction projects in the areas affected by the Great East Japan Earthquake and examine the impacts of relocating to higher grounds on the evacuation of residents when a tsunami strikes. Concretely, the authors carry out an evacuation simulation assuming a nighttime period during winter snow cover for the case where the number of residents in the highland area is adjusted for the area where the disaster prevention collective relocation to the high ground was carried out. As a result, when relocation to higher ground was implemented, the rate of non-arrival at evacuation shelters decreased in many age groups, and an improvement of 1.2 points was observed in high places, confirming the effectiveness of relocating to higher ground L2 tsunami countermeasure.

Key Words: Tsunami, Evacuation, Disaster prevention, Reconstruction projects

キーワード: 津波, 避難, 防災, 復興事業

1. はじめに

日本は世界でも有数の地震大国であり、東北地方も過去幾度となく地震や津波により被災、復旧・復興を繰り返している。その過程では、沿岸部の集落を高台へ移転させ、津波による被害を減らす取り組みが行われている。しかし、三陸地方は古くから漁業が盛んな地域であり、高台移転により住民の居住区域と漁港間のアクセス性が低下した結果、再建から時間経過とともに利便性を求めた住民は、低地部への原地復帰を繰り返してきた¹⁾。2011年東日本大震災の被災地でも、津波による人命や住空間の被害を減らすため、山間部を宅地造成した高台地域への防災集団移転促進事業や、

* 令和4年10月7日 受付

令和5年2月6日 受理

[†] 大学院工学研究科社会基盤工学専攻博士後期課程・2年

^{††} 大学院工学研究科社会基盤工学専攻・教授

市街地を盛土造成した土地区画整理事業などの復興事業が進められ、現在では各地で新たな市街地環境が整備されている^{2),3)}。その一方で、東北地方では近い将来千島・日本海溝沿いを震源とするマグニチュード(Mw)9.3の地震が発生、津波の襲来が想定されている⁴⁾。この地震では、ところにより東日本大震災時より大きい津波が襲来し、かつ、到達時間が早くなると想定されており、今後さらなる少子高齢化が懸念される地域では、津波に対するより迅速な避難行動が求められる。今後想定される津波には、L2津波として防潮堤と高台移転による多重防御の対策が必要であり、住民避難だけでなく、防災対策事業との関連性や効果について十分な検証が重要となる。例えば、森田ら⁵⁾は宮城県石巻市の住民を対象とした東日本大震災時の避難行動に関するアンケート調査を実施し、集計した避難行動データに基づいた簡易シミュレーションにより同市が策定した復興計画上の高台避難場所の整備等の防災対策の効果について分析している。また、同じく森田ら⁶⁾は宮城県南三陸町を対象とした復興計画による人口分布の効果の評価し、新たな地域構造は防災性を高める効果があるとしている。しかし、これらは人口分布が変化した地域構造や高台に設置された避難施設への避難行動などについて着目しているものであり、住宅や集落の高台移転と津波発生時の住民避難との直接的な関係性について着目している研究は多くはない。

そこで本研究では、復興事業による高台造成が完了し、住宅移転が進む岩手県山田町を対象に、今後想定される地震や津波を想定した避難シミュレーションを実施し、防災集団移転促進事業による高台への移転の有無が、住民の避難行動に対してどのような効果を与え、津波到達予想時刻までに避難施設への程度の住民が到達できるかについて検証する。

2. 東日本大震災での被災状況と新たな津波浸水想定

2.1 東日本大震災での被災状況

2011年3月11日、14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う津波により、太平洋沿岸の広い地域で被害を受け、山田町でも多くの犠牲者が発生した。同町における震災犠牲者の年齢分布(Fig.1⁷⁾)を見ると、男女とも特に60歳以上で犠牲者が多く分布している傾向が分かる。若年層は学校に、生産年齢人口では職場等に滞在している時間帯での発災であり、このような年齢分布になったと考えられる。

被災状況の把握として、フリーGISソフトウェアである“QGIS”を用いて可視化を行った。復興支援調査アーカイブ⁸⁾にて公開されている津波浸水区域と建物被災状況のデータを、国土地理院の基盤地図情報データ⁹⁾およびQGISプラグイン機能であるGoogleMapSatelite上にレイヤ化した。浸水区域と被災区分に従い色別した建物被災状況⁸⁾についてのGISデータ(Fig.2)を示す。山田町における建物の被災状況として、全壊(流失):2673戸、全壊(撤去):635戸、全壊(条件付き再生可):351戸、大規模半壊:255戸、半壊(床上浸水):257戸、一部損壊(床下浸水):110戸となっている。Fig.2より、黒色で示した全壊(流失)判定となった建物は、津波浸水深が6~8m前後の範囲に分布している。その一方、半壊や一部損壊判定の建物は、浸水深0~2mの範囲で分布している。このことから、津波の浸水深が深いほど、全壊や流失など深刻な被害となっていることが分かる。

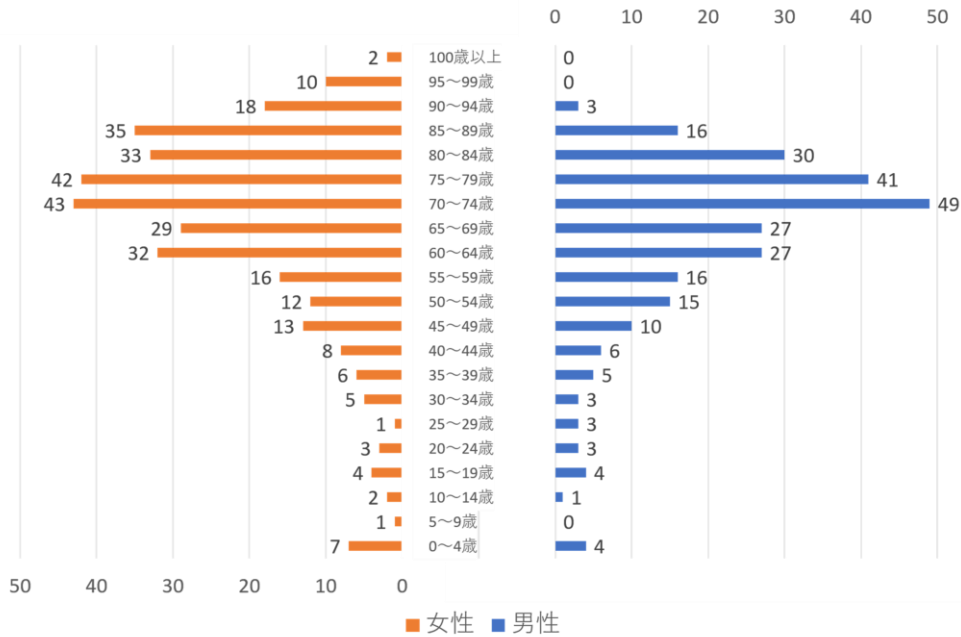


Fig.1, 岩手県山田町における東日本大震災犠牲者の年齢分布

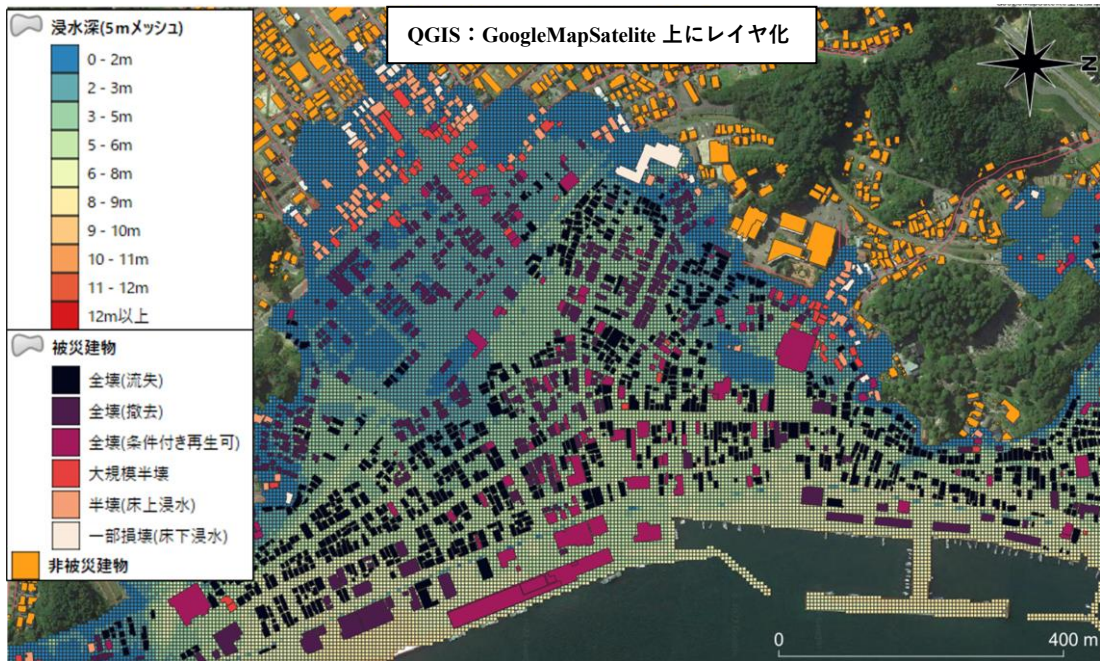


Fig. 2, 津波浸水区域の浸水深と建物被災区分の状況

2.2 日本海溝・千島海溝沿いを震源とする地震想定

内閣府の日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震モデル検討会⁴⁾では、千島海溝(十勝・根室沖)モデルで Mw9.3、日本海溝(三陸・日高沖)モデルで Mw9.1 の巨大地震の発生が想定されている。この地震では東日本大震災津波の規模を上回る巨大津波の発生が予測されており、東日本大震災からの復興事業が終了する被災地でも新たな脅威が迫っている。東日本大震災津波⁸⁾と、岩手県が公開している想定される千島・日本海溝地震による津波浸水想定区域データ¹⁰⁾の比較(Fig.3)、および、最大波

高と人的・物的被害数，被害額の比較(Table 1)^{11),12),13)}を示す。日本海溝地震による被害想定では，岩手県でも東日本大震災と同等，一部地域でさらに高い津波の襲来が想定され，推定される死者数は約 20 万人，全壊棟数約 22 万棟，経済的被害額は約 31 兆円となっており，東日本大震災よりも甚大な被害が予測されている。また，地震発生から津波が到達するまでの所要時間は，東日本大震災津波よりも早くなる見込みであり，防潮堤や盛土・高台造成による対策が進められてきた被災地でも，構造物などに頼るハード対策だけではなく，住民自らによる迅速な避難行動を行うソフト対策も合わせた津波防災対策を進める必要がある。

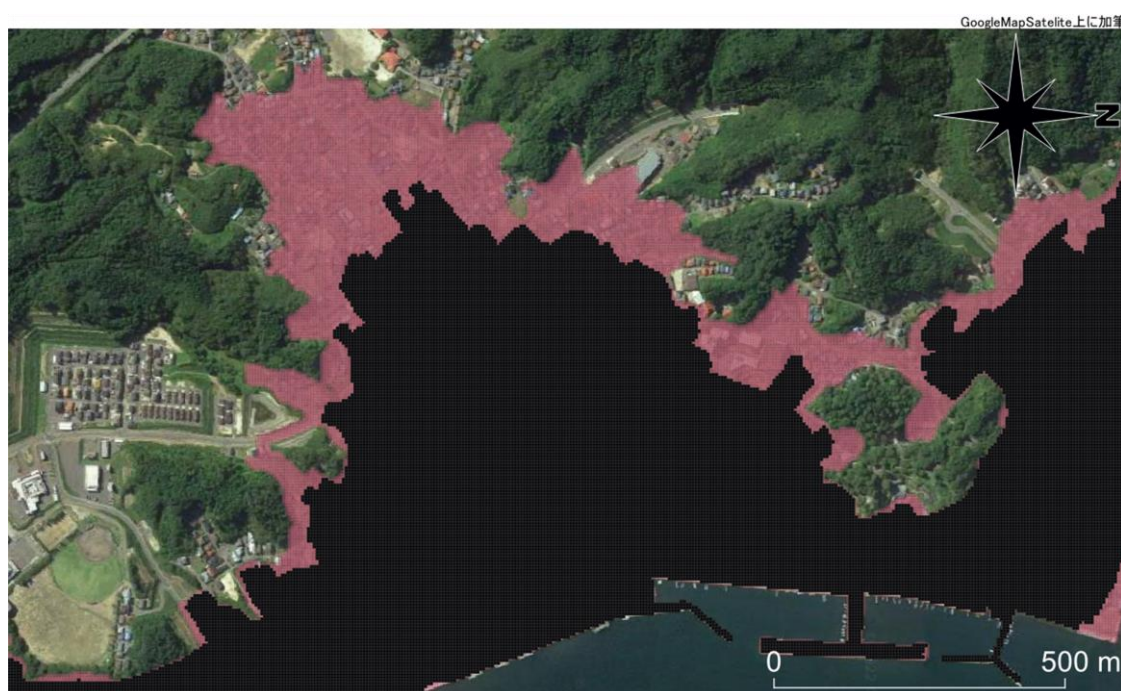


Fig. 3, 東日本大震災浸水区域(黒色)と日本海溝地震による浸水想定区域(透過桃色)

Table 1 東日本大震災と想定される千島・日本海溝地震による被害

	最大波 (m)	犠牲者数 (万人)	全壊棟数 (万棟)	被害額 (兆円)
東日本大震災	9.3 以上 (福島県相馬市)	2.2	12.2	16.9
日本海溝地震(想定)	29.7 (岩手県宮古市)	19.9	22	31
千島海溝地震(想定)	27.9 (北海道えりも町)	10	8.4	17

3. 東日本大震災当時の犠牲者数の再現解析

3.1 再現解析対象人口の算出

(1) 昼間対象地区人口

本研究での解析対象地区は山田町の中心市街地である山田地区を対象とした。マルチエージェントシステムを用いた避難シミュレーションによる解析結果の妥当性を検証するため、東日本大震災での犠牲者データの再現実験を行った。人口データには 2010 年国勢調査¹⁴⁾による山田町地区別人口データ(5 歳階級)を用いた。東日本大震災発災は平日午後で、若年層は学校へ登校中の時間帯であり、対象地区の小中学校や高等学校は全て高台に位置し浸水を免れている。そのため、昼間の解析対象地区の総人口(5,198 人)から登校中とされる児童や生徒の人口を除く必要がある。使用した国勢データの年齢階級の都合上、19 歳以下(926 人)を除いた値を昼間対象地区人口と仮定した【式(1)】。

$$\text{昼間対象地区人口} = 5,198 \text{ 人} - 926 \text{ 人} = 4,272 \text{ 人} \quad (1)$$

(2) 地区推定犠牲者比

被災地における震災犠牲者数は市町村単位で公表されているため、詳細な地区・地割区分による犠牲者数の設定が不可能である。そこで、山田町全域の浸水区域人口に対する犠牲者数の比を算出した【式(2)】。犠牲者(825 人)は全員津波による溺死と仮定すると、総浸水区域人口(12,160 人)に対する犠牲者の割合が算出され、解析対象とする地区あたりの推定犠牲者数の設定が可能となる。

$$\text{犠牲者比} = 825 \text{ 人} / 12,160 \text{ 人} = 0.068 \quad (2)$$

(3) 地区推定犠牲者数

解析対象地区とする浸水区域の人口(5,198 人)に犠牲者比(0.068)を乗じることで、対象地区の犠牲者数を推定する。式(3)の結果、対象とする山田地区の推定犠牲者数は 353 人と算出された。

$$\text{推定犠牲者数} = 5,198 \text{ 人} \times 0.068 = 353 \text{ 人} \quad (3)$$

(4) 再現解析の評価条件

当時の避難行動についての再現実験の評価基準として、先述した式(3)による解を解析対象地区の昼間人口で除した比率を算出する。評価基準値の比率算出式を式(4)以下に示す。

$$\text{評価基準値} = (353 \text{ 人} / 4,272 \text{ 人}) \times 100 = 8.26\% \quad (4)$$

再現解析による初期避難者数と避難所未到達者数の比率≒評価基準値となった場合、本シミュレーションによる再現度は妥当であると考えられる。

3.2 再現解析の評価

2010年実施の国勢調査人口¹⁴⁾に基づく再現解析の対象人口および避難速度¹⁵⁾(Table 2)と解析過程(Fig.4)および結果(Fig.5)を示す。解析には夏季速度に積雪係数(0.8)⁴⁾を考慮した冬季避難速度を用いた。48分経過時点(第一波到達時刻と内陸部までの遡上時間を考慮)で、解析計算10回あたりの避難所への未到達エージェントの数が平均409人となり、評価比率が9.57%となった。評価基準値8.26%≒9.57%となり、誤差は1.3pt程度であるため、再現解析はおおむね妥当であると考えられる。

$$\text{避難所未到達者(人)} / \text{初期人口数(人)} = (409 / 4,272) \times 100 = 9.57\% \quad (5)$$

Table 2 再現解析における対象人口(2010年国勢調査)と避難速度¹⁰⁾

年齢区分	男性(人)	夏季速度 (m/s)	冬季速度 (m/s)	女性(人)	夏季速度 (m/s)	冬季速度 (m/s)
20~59歳	1,095	1.3	1.04	1,091	1.25	1
60歳以上	863	1.14	0.91	1,223	1.14	0.91

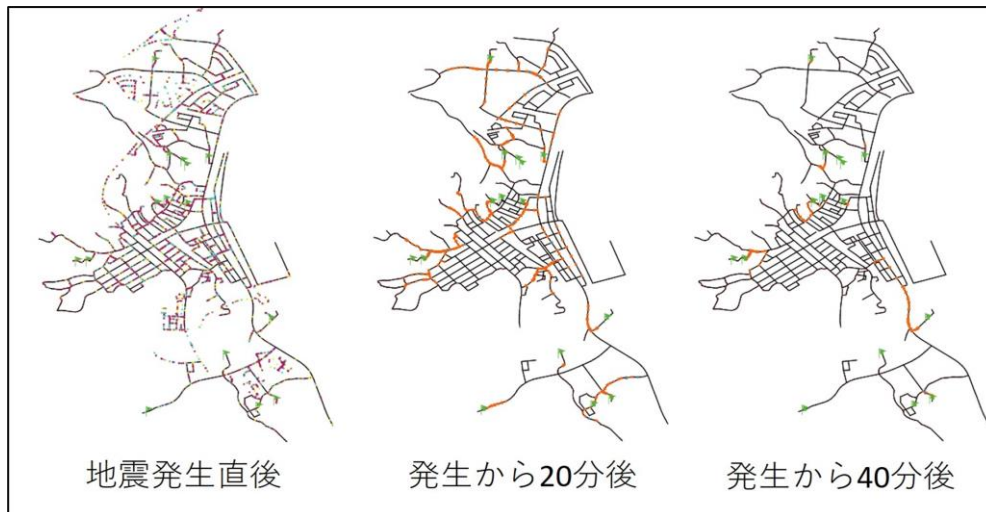


Fig.4, 避難解析過程(地震発生~40分後, 橙色:避難者, 緑旗:指定避難所)

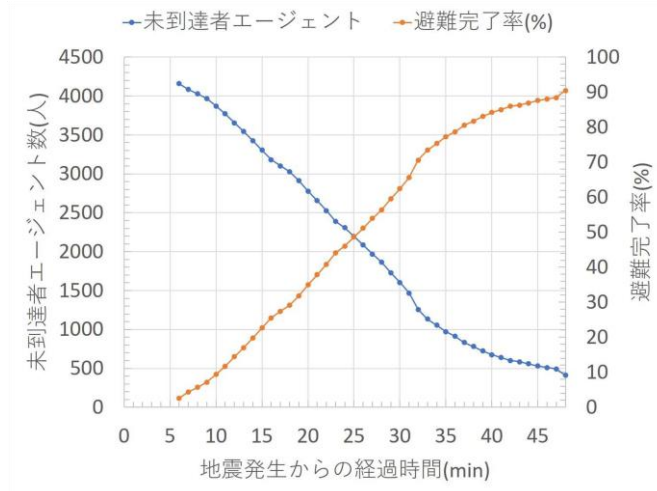


Fig.5, 再現解析の結果

4. 高台造成地への移転を考慮した避難行動解析

4.1 高台造成地移転解析の概要

本研究では、高台造成への防災集団移転促進事業による住民避難への効果について検討するため、高台部へ移転した人口数(令和4年4月時点¹⁶⁾:Table3)を考慮した解析を行う。市街地と避難先とする指定避難所¹⁷⁾、および高台造成地の位置関係を Fig.6¹⁸⁾に示す。本解析では、山田高台団地の人口を他の浸水想定区域の人口に加減し、避難行動に対する高台移転の効果について検証する。解析条件(Table4)として、日本海溝地震が冬季夜間の積雪・未除雪状態で最も避難速度⁴⁾が低下する環境下での発生を想定する。避難速度(Table5)は再現解析で示したものを使用し、速度偏差として基準速度に ± 0.2 を乗じた範囲でのばらつきを与える。想定環境を考慮するため、基準速度¹⁵⁾に各速度係数⁴⁾を与えて最遅条件とする。避難方法の選択割合は、内閣府が実施した東日本大震災時の避難行動に関する調査結果¹⁹⁾を参考とし、岩手県での選択割合を用いている。避難開始時間は、著者らが山田町で実施した質問紙調査の結果に基づき、地震発生10分後から順次避難を開始する設定とする。

Table 3 対象とする山田町中心街地区の人口数

R4,4	境田(人)	山田高台団地(人)	川向(人)	長崎(人)	中央町(人)	後楽町(人)	合計(人)	高台を除く(人)
男性20歳未満	19	29	4	104	1	2	159	130
男性20~59歳	54	55	258	261	7	36	671	616
男性60歳以上	59	51	57	215	6	43	431	380
女性20歳未満	8	24	6	75	2	7	122	98
女性20~59歳	48	69	15	242	5	33	412	343
女性60歳以上	70	60	115	287	5	77	614	554

Table 4 解析条件

解析ソフトウェア	NetLogo6.2.2
経路探索法	A*アルゴリズム法
解析ステップ	1tick=1sec
解析時間	地震発生 60分間
想定環境	積雪・未除雪
想定時間帯	夜間
避難方法割合	歩行 4 : 車両 6
基準避難速度	小坂ら(2017)
積雪, 未除雪係数	0.8, 0.6
夜間係数	0.8
速度偏差	基準速度 $\times(\pm 0.2)$
第一波到達時刻	地震発生 27分後
最大波到達時刻	地震発生 37分後
目標避難所数	4ヶ所
最早避難開始時間	地震発生 10分後

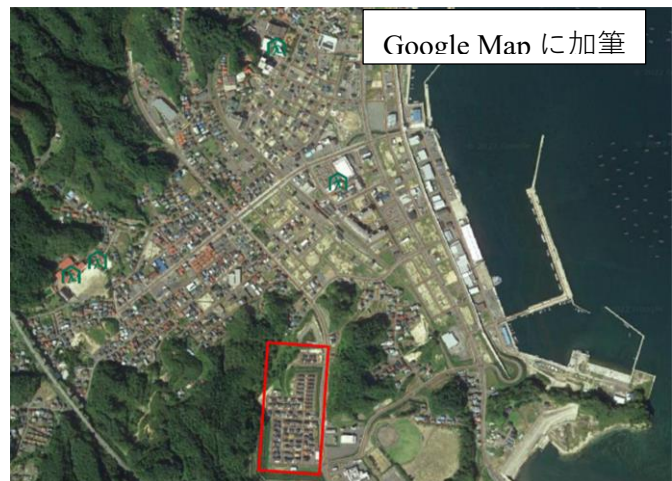


Fig. 6, 解析対象区域
(赤枠：高台造成移転区域, 緑印：町指定避難所)

4.2 避難行動解析の結果と考察

避難者の速度偏差による条件変化を考慮し、高台移転有無の解析を各 10 回行い、第一波到達および最大波到達予想時刻での避難所への平均未到達者数を算出した。解析結果を Table6 に示す。移転なしのケースは、山田高台団地の人口を含んだ総中心地区人口(n_1)にて解析を行った。第一波到達予想時刻で各年齢層 4~7%ほど未到達となったが、最大波到達予想時刻では1%台まで減少した。移転ありのケースは、高台団地の住民を n_1 から除いた中心地区人口(n_2)で解析を行った。高台団地の住民は、地震発生時点で安全域に居住するものと仮定し、 n_1 と未到達者数との n_1 比で移転なしと比較する。未到達者は移転なしと比べ、全体平均で第一波到達時点 0.5pt、最大波到達時点 0.1pt 減少している。最大値および最小値で多少のばらつきはあるものの、移転の有無についての効果は数値上では把握出来ており、津波発生時の避難行動に対して、高台移転は効果的であることが確認できた。しかし、20 歳未満において移転ありの結果が移転なしをやや上回る結果となった。移転による人口増減の変化量が、他の年齢層は 50 人以上変化するのに対し、男女とも 20 歳未満では 30 人未満しか変化しない年齢層であり、人口変化の多少が比較解析の結果に影響したと考えられる。

Table 5 適用した避難速度パラメータ

20 歳未満	速度(m/s)	20~59 歳	速度(m/s)	60 歳以上	速度(m/s)
男性	0.56	男性	0.5	男性	0.44
女性	0.51	女性	0.48	女性	0.44

Table 6 高台造成を考慮した解析結果(未到達者の割合)

高台移転なし															
	n_1	第一波到達時刻						最大波到達時刻							
		車両台数 (a)/(台)			歩行者数 (b)/(人)			n_1 比 (%)	車両台数 (a)/(台)			歩行者数 (b)/(人)			n_1 比 (%)
		最小	最大	平均	最小	最大	平均		最小	最大	平均	最小	最大	平均	
男性20歳未満	159	0	2	0.8	3	10	6.1	4.3	0	1	0.4	0	2	1.1	0.9
男性20~59歳	671	1	9	5	30	51	39	6.6	0	2	0.7	4	13	7.6	1.2
男性60歳以上	431	2	6	3.2	24	34	29.3	7.5	0	1	0.6	4	10	6.8	1.7
女性20歳未満	122	0	2	0.9	3	13	7.4	6.8	0	1	0.3	0	3	1.2	1.2
女性20~59歳	412	0	6	3.1	15	36	23.4	6.4	0	2	0.9	2	8	5.1	1.5
女性60歳以上	614	3	9	5.1	34	48	40.6	7.4	0	1	0.4	6	13	9.3	1.6
高台移転あり															
	n_2	第一波到達時刻						最大波到達時刻							
		車両台数 (a)/(台)			歩行者数 (b)/(人)			n_1 比 (%)	車両台数 (a)/(台)			歩行者数 (b)/(人)			n_1 比 (%)
		最小	最大	平均	最小	最大	平均		最小	最大	平均	最小	最大	平均	
男性20歳未満	130	0	4	0.7	3	12	7.7	5.3	0	2	0.4	0	3	1	0.9
男性20~59歳	616	2	6	4.2	22	48	36.6	6.1	0	3	0.7	5	9	6.5	1.1
男性60歳以上	380	0	7	2.8	21	29	24.6	6.4	0	2	0.6	3	8	4.9	1.3
女性20歳未満	98	0	2	0.7	5	9	6.9	6.2	0	1	0.1	1	3	1.7	1.5
女性20~59歳	343	1	6	2.9	14	24	20.3	5.6	0	2	0.6	3	5	4.3	1.2
女性60歳以上	554	2	7	4	26	42	36.1	6.5	0	2	0.5	6	16	9.4	1.6

5. おわりに

本研究では、東日本大震災で被災した岩手県山田町を対象とし、復興事業として行われた高台造成地への防災集団移転促進事業による住民の避難行動への影響について、マルチエージェントシステムによる解析に基づいて検証した。その結果、今後想定される津波災害が冬季積雪時の夜間帯に発生した場合でも、高台移転を実施しないケースと比べて移転を実施したケースの方では、未到達率を最大 1.2pt(男性 60 歳以上)改善できることが確認された。高台への移転により低地部の居住人口が減少し、避難行動時における避難者の発生密度などが低下したため、移転ありのケースでは未到達率が改善されたものと考えられ、今後想定される L2 クラスの津波への防災対策として、高台移転はおおむね有効であると考えられる。その一方で、移転による人口変化が少なかった一部の年齢層では、数値的な有意が見られない結果となった。避難の対象となる人口の変化が少なかったため、同一の想定条件による解析では改善が確認できなかったものと考えられる。

今後は、本解析で改善が見られなかった年代について詳細な検討を行い、また、少子高齢化への対策も考慮した要介護認定者や高齢独居者などの災害時要援護者の避難過程に着目し、津波発生時の安全な避難行動と、復興事業により整備された土地区画の利活用の関係について検討を進める必要がある。

参考文献

- 1) 村尾 修, 磯山 星: 岩手県沿岸部津波常襲地域における住宅立地の変遷 - 明治および昭和の三陸大津波被災地を対象として -, 日本建築学会計画系論文集, 第 77 巻 第 671 号, pp.57-65, 2012.
- 2) 石村 時大, 森 傑, 野村 理恵: 復興整備計画からみる防災集団移転促進事業の空間的特徴 気仙沼市の協議会型集団移転に注目して, 日本建築学会計画系論文集, 第 80 巻 第 715 号, pp.1979-1989, 2015.
- 3) 矢ヶ崎 太洋: 津波災害に対する地域社会のレジリエンス - 宮城県気仙沼市舞根地区における東日本大震災と防災集団移転を事例に -, 地学雑誌, 126(5), pp.533-556, 2017.
- 4) 内閣府 (防災担当): 被害想定手法について (第 1 回ワーキンググループでのご意見を踏まえた手法の検討), 日本海溝・千島海溝沿の巨大地震対策検討会ワーキンググループ(第 2 回), 2020.
- 5) 森田 哲夫, 長谷川 弘樹, 塚田 伸也, 橋本 隆, 湯沢 昭: 避難行動データに基づく防災対策の効果分析 - 東日本大震災被災地の石巻市を対象として -, 社会技術研究論文集, Vol.2, pp.51-60, 2015.
- 6) 森田哲夫, 細川良美, 塚田伸也, 湯沢昭, 森本章倫: 津波被害を考慮した地域構造に関する研究, 社会技術研究論文集, Vol.11, pp.1-11, 2014.
- 7) 警察庁 HP: 東日本大震災について, <https://www.npa.go.jp/news/other/earthquake2011/index.html>, 2018 年 7 月 15 日 取得
- 8) 東京大学空間情報科学研究センター: 復興支援調査アーカイブ, <http://fukkou.csis.u-tokyo.ac.jp/>, 2020 年 11 月 25 日 取得.
- 9) 国土地理院: 基盤地図情報, <https://www.gsi.go.jp/kiban/index.html>, 2022 年 7 月 15 日 取得.

- 10) 岩手県：最大クラスの津波浸水想定について(GIS データ), 2022 年 10 月 7 日 取得.
- 11) 内閣府 (中央防災会議)：日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震の被害想定について(定量的な被害量), 日本海溝・千島海溝沿の巨大地震対策検討会ワーキンググループ, 2021.
- 12) 内閣府：東日本大震災における被害額の推計, 平成 28 年度版防災白書, 2022 年 7 月 25 日取得.
- 13) 総務省消防庁：被害の状況, 平成 23 年東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)について(第 162 報), 2022 年 7 月 25 日取得.
- 14) e-stat 政府統計の窓口：平成 22 年度国勢調査, <https://www.e-stat.go.jp/stat-search?page=1&query=&国勢調査layout=normal>, 2020 年 8 月 25 日 取得.
- 15) 小坂陽介, 野村尚樹, 大藤愛子, 宮島昌克：マルチエージェントシステムを用いた津波避難に関する解析－輪島市臨海地域を対象とした事例研究－, 土木学会論文集, A1(構造・地震工学), Vol.73, No.4(地震工学論文集第 36 巻), pp11010 - 11017, 2017.
- 16) 山田町役場：人口と世帯数 月別の地区別年齢 5 歳階級別人口調べ(令和 4 年度), <https://www.town.yamada.iwate.jp/>, 2022 年 7 月 21 日 取得.
- 17) 山田町役場：避難場所・避難所, <https://www.town.yamada.iwate.jp/>, 2022 年 7 月 21 日 取得.
- 18) Google Map：岩手県山田町, 2022 年 10 月 4 日 取得.
- 19) 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委員会第 7 回会合：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)分析結果, 2011.

要 旨

本研究では、東日本大震災被災地における復興事業に着目し、津波発生時の住民避難に対する高台移転の影響について検証した。具体的には、高台への防災集団移転を実施した地区を対象に、高台地区の住民数を加減させたケースについて、冬季積雪時の夜間帯を想定した避難シミュレーションを実施した。その結果、高台移転を実施した場合、多くの年齢層において避難所への未到達率が減少し、多い所では 1.2pt の改善が見られ、L2 津波対策として高台移転の有効性が確認された。

キーワード :津波, 避難, 防災, 復興事業