

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 —

ANALYSIS ON EFFECTS OF DISASTER PREVENTION MEASURES BASED ON
REFUGE BEHAVIOR DATA - A CASE STUDY OF ISHINOMAKI CITY -

森田 哲夫¹・長谷川 弘樹²・塚田 伸也³・橋本 隆⁴・湯沢 昭⁵

¹ 博士 (工学) 東北工業大学教授 工学部都市マネジメント学科 (E-mail: ttmorita@tohtech.ac.jp)

² 群馬工業高等専門学校 専攻科環境工学専攻 (E-mail: hasehiro2.19@gmail.com)

³ 博士 (工学) 前橋市建設部公園緑地課 (E-mail: shinya-tsu@city.maebashi.gunma.jp)

⁴ 博士 (工学) 伊勢崎市企画部企画調整課 (E-mail: t84moto@nifty.com)

⁵ 工学博士 前橋工科大学教授 工学部社会環境工学科 (E-mail: yuzawa@maebashi-it.ac.jp)

2011年東北地方太平洋沖地震で発生した津波により甚大な被害をもたらされ、多くの犠牲者を出した。本研究では、この大地震により大きな津波被害を受けた石巻市を対象とするアンケート調査を実施し、避難行動データに基づき市の復興計画の防災対策の効果进行分析することを目的とする。

先ず、石巻市の被災者を対象とする避難行動に関するアンケート調査データに基づき避難行動特性を分析した。次に、避難行動データに基づくシミュレーションを行い、避難行動による犠牲者の減少、避難訓練強化の効果、高台避難所の整備効果を分析し、石巻市が策定した復興計画の防災対策の効果把握した。

キーワード：災害、津波、避難、東日本大震災、石巻市

1. はじめに

1.1. 研究の背景と目的

2011年東北地方太平洋沖地震とそれに伴う大津波により、東北地方太平洋沿岸部に被害をもたらした東日本大震災が発生した。被災地全体の死者・行方不明者は1万8千人以上にのぼる非常に大規模なものとなった。

発災後は、救援活動、物資輸送、復旧活動等の災害対応が行われるとともに、被災地の復旧・復興に活用するため被害状況調査¹⁾が進められた。内閣府は、東日本大震災を教訓とした地震・津波対策を検討するため、広く被災地を対象とした避難行動等に関する調査²⁾を実施している。本研究は、死者・行方不明者の多かった石巻市の被災者を対象としたアンケート調査データに基づき、避難行動を分析するものである。

国や自治体は、被災地の復旧・復興に向けた計画を策定している。被災地自治体が策定した復興計画の防災対策には、防災施設の整備、防災対策の見直し、情報伝達手段の整備等が盛り込まれており、これら計画の効果について定量的に分析する必要がある。本研究は、石巻市を対象とし、市の復興計画に盛り込まれている防災対策の効果について分析するものである。また、本研究の成果により、東海、東南海地震をはじめとする大規模地震の発生が予測されている地域の防災計画にも基礎的な

知見を提供できると考えられる。

以上より、東日本大震災により甚大な津波被害を受けた宮城県石巻市を対象とし、次の2点を本研究の目的とする。

- 1) 石巻市の被災者を対象としたアンケート調査データにより、津波来襲時の避難行動特性を把握する。
- 2) 避難行動特性を踏まえたシミュレーションにより人的被害を再現し、石巻市復興計画に示されている防災対策の効果进行分析する。

1.2. 既存研究レビューと本研究の位置づけ

本研究の目的に沿い、東日本大震災の避難行動特性に関する研究、避難行動データに基づくシミュレーションによる施策効果分析の2つの視点から既存調査・研究をレビューし、本研究の位置づけを整理する。

1つめの避難行動特性に関する研究については、以前から数多くの研究が行われている。斎藤³⁾は、1989年の三陸沖地震の津波に関する住民の意識・避難行動を分析している。片田ら⁴⁾は、2003年の宮城県沖の地震について気仙沼市の住民を対象に避難行動と意識を分析している。金井・片田⁵⁾は、2010年のチリ地震津波の避難実態を分析している。次に、これら研究成果を踏まえた2011年の東日本大震災以降の調査・研究について整理する。先述の内閣府の調査²⁾は、被災地を広く対象とした調査

(岩手県, 宮城県, 福島県の沿岸地域)である。震災 4 ヶ月後に, 被災者 870 人を対象とし避難行動等を調査した。この他にも, 東日本放送とサーベイリサーチセンター⁶⁾は, 震災 1 ヶ月後, 宮城県沿岸部の避難所の 451 人を対象に, 避難行動等について調査を実施している。ウェザーニューズ⁷⁾は, 北海道から千葉県の 1 道 6 県の被災者を対象に, 震災 2~3 ヶ月後に, 避難行動等についてインターネット調査を実施した。回答数は 5,296 件であり, 津波犠牲者の避難行動情報も得ていることが特徴である。

東日本大震災を対象とした避難行動特性に関する研究では, 調査に基づく避難距離や交通手段等の避難行動の分析⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾, 新聞記事データを用いた避難行動の分析¹¹⁾, 言語解析技術を用いた分析¹²⁾がみられ, 避難行動分析が進んでいる。金井・片田¹³⁾は, 太平洋沿岸の広い地域を対象に, 避難意思決定構造を明らかにした。また, 浦田・羽藤¹⁴⁾は, 大震災前の行動が避難開始時刻に与える影響を分析するなど, 詳細な分析も進んでいる。

1つめの東日本大震災の避難行動特性に関する研究の視点から, 本研究の位置づけを整理する。本研究は, 東日本大震災後に開始された避難行動の特性分析の研究系列上に位置するものである。本研究のアンケート調査は, 広い範囲の被災地の避難行動を調査するのではなく, 甚大な被害を受けた石巻市を対象に実施されたものであり, 国土交通省が実施した調査²⁾に比べ, 居住地, 地震発生時の所在地データが使用できる。そして, 得られた避難行動データに基づき, 石巻市の復興計画の防災対策の効果の分析までを本研究の中で行う。一方で, 本稿では, 避難行動の特性分析を防災対策の分析に必要なものに限定して示した。本研究のアンケート調査に関する詳細な分析結果については, 他の研究発表⁸⁾⁹⁾にて公表している。

2つめの避難行動データに基づくシミュレーションによる施策効果分析についても, これまで多くの研究が行われている。今村・鈴木・谷口¹⁵⁾は, 避難群衆を表現した詳細な避難シミュレーションモデルを構築し, 奥尻島青苗地区に適用している。早川・今村¹⁶⁾は, 避難行動開始モデルを構築し, 宮城県沿岸地域に適用している。西畑ら¹⁷⁾は, 気仙沼市を対象に, 浸水深と流速を考慮した避難速度と避難可否を決定するシミュレーションモデルを開発した。片田・桑沢¹⁸⁾は, 発災時刻の都市アクティビティを考慮した被災シナリオに基づく人的被害量の推定を行っている。佐藤¹⁹⁾らは, 心理的要素を導入した津波避難行動モデルを開発している。2011 年の東日本大震災後は, 自動車利用の避難行動の再現²⁰⁾, 避難シミュレーションの検討²¹⁾が行われている。このように, 重要な研究課題である東日本大震災を対象とする研究が進められているが, 避難行動の特性分析, 避難シミュレーション, 防災対策分析を一連で扱った研究は少ない。森田ら²²⁾は, 簡易な方法により人的被害を再現するとともに,

復興計画による人口分布の効果の評価しているが, 防災対策の効果的分析していない。

2つめの避難行動データに基づくシミュレーション分析による施策効果分析の視点から, 本研究の位置づけを整理する。本研究は, 被災地の石巻市を対象としたアンケート調査データに基づき避難行動特性を把握し, その結果に基づき簡易なシミュレーションを行い, 市の防災計画の分析までを一連の流れで行う点が特徴である。一方で, 既存研究と比較すると, 精緻な避難行動モデルは構築しないが, 簡易な方法をとることにより, さまざまなケースを何度も分析することができる利点があると考ええる。また, 東日本大震災を対象に避難行動の特性分析から施策シミュレーションまでを行うことにより, 喫緊の課題である被災地の復興計画検討, 事業実施への知見を提供するという意義があると考ええる。既存研究のように, 避難行動をいくつかの段階に分けた精緻な避難行動モデルの構築については, 今後の課題として取り組む予定である。

2. 研究対象地域

2.1. 対象地域の設定

2011 年東日本大震災による宮城県石巻市の人的被害状況²³⁾は, 死者 3,140 人, 行方不明者 452 人, 死者・行方不明者 3,592 人であった。本研究では, 大震災による死者・行方不明者数が最大の市町村である宮城県石巻市を研究対象地域とする (Fig. 1)。

被災前の人口は 162,822 人 (2011 年 2 月末住民基本台帳), 人口に対する死者・行方不明者数割合は 2.2% である。現在の人口は 151,120 人 (2013 年 7 月末住民基本台帳) であり, 震災前と比べると 11,702 人, 7.2% 減少した。

面積 555.8km² に対し, 浸水面積²³⁾は 73km² であり, 市域の約 13% が浸水した。市街地のほぼ全域が浸水し, 浸水域にかかる推定人口割合は約 70% であった。津波の高さは 8.6m (気象庁発表の鮎川検潮所) であり, 市街地では最大 0.8m の地盤沈下が発生した。

市内には旧北上川が流れており, 旧北上川の河口を中心に市街地が形成されている。東部は丘陵, 山地であり, 太平洋に面したリアス式海岸が形成されている。

2.2. 石巻市の復興計画と防災対策

石巻市は, 2012 年 12 月に震災復興基本計画²⁴⁾を策定した。「最大の被災都市から世界の復興モデル都市石巻を目指して」と副題が付されている。基本的な考え方に示されている 3 つの基本理念の第一は「災害に強いまちづくり」であり, 「今回の震災の教訓を踏まえ, 単なる「復旧」とどまらず, 防災基準・防災体制を抜本的に見直し,



Fig. 1 研究対象地域 (宮城県石巻市)

市民の命を守る災害に強いまちづくりを進めるとして、施策大綱に示されている「新たな防災体制の構築」の防災対策を Table 1 に示す。これら対策を基本に、本研究ではシミュレーションケースを設定する。「津波減災施設の復旧・復興」として、海岸保全施設の整備、河川施設の整備、高盛土道路の整備、防潮林の整備が示されているが、本研究においては大きなハード整備を伴わない防災対策の効果を分析することとする。

3. 調査の概要と避難行動特性の把握

3.1. アンケート調査の概要

アンケート調査の概要を Table 2 に示す。石巻市の被災者の避難行動に関する情報を収集するために、避難所、仮設住宅、被災地住宅の居住者に対し、2011年10月から12月の3ヵ月間にわたりヒアリング調査、ポスティング調査が実施された。調査内容は、被災者の個人属性、

Table 1 石巻市復興計画²⁴⁾における防災対策

防災施設の整備	防災拠点・機能の整備
	避難所の配置・運営の見直し
	津波避難ビル等の設置・機能整備
情報伝達手段の整備	防災行政無線等の強化
	IT・携帯電話回線のバックアップ機能強化
	安否確認等システムの整備
防災対策の見直し	地域防災計画の見直し
	防災教育の強化
	地域コミュニティの自主防災組織の機能強化
	安全かつ円滑に避難できる避難路の設定
震災記録の継承	女川原子力発電所等の安全確保
	災害アーカイブの公開と記録展示施設の整備
津波減災施設の復旧・復興	慰霊碑の建立や震災施設の保存
	海岸保全施設の整備、
	河川施設の整備、
	高盛土道路の整備、
	防潮林の整備

Table 2 アンケート調査の概要

調査名	津波からの避難に関するアンケート調査
対象地域	宮城県石巻市
対象者	避難所、仮設住宅、被災地住宅の居住者 (1戸あたり1名)
調査期間	2011年10月～12月
調査方法	調査員によるヒアリング調査、ポスティング調査 (戸別配布、郵送回収)
回収状況	ヒアリング調査 279票 ポスティング調査 797票 [合計1,076票]
調査内容	1)個人属性 (性別, 年齢, 職業) 2)地震発生直後の状況 3)津波からの避難行動 4)過去の被災経験, 津波への備え
調査主体	東日本大震災津波避難合同調査団 (約20名)

地震発生直後の状況、津波からの避難行動、過去の被災経験、日頃の津波への備えである。調査員は、研究者、計画実務者から構成される東日本大震災津波避難合同調査団の団員約20名である。

3.2. 避難行動特性の基礎分析

ここでは、次章のシミュレーションに必要な集計結果を中心に、示す。詳細な集計結果は、既存研究^{9) 10)}にて公表している。

Table 3に地震発生時 (3月11日金曜日, 14時46分) の所在地を示した。自宅にいた人は約51%であり、仕事場にいた人 (屋内, 屋外) は約27%, その他の施設・建物にいた人は約12%, 移動中 (徒歩, 自転車・バイク, 鉄道, バス) の人は約9%であった。本調査は、ヒアリング調査の場合には対象住戸で調査に応じた人、ポスティング調査の場合には記入した人の情報となっているため、生徒・学生の回答が少ないことに注意が必要である。

Table 3 地震発生時の所在地

自宅（商店等自営業で自宅が職場の人も含む）	51.2%
屋内の仕事場（会社、工場、店舗等）	19.9%
屋外の仕事場（港、作業場、田畑、船の中）	7.3%
学校（生徒・学生として）	0.5%
病院、福祉施設、介護施設（利用者として）	3.8%
上記以外の建物の中	8.0%
歩いたり、自転車などで移動中だった	1.9%
車・バイクを運転中だった	6.9%
鉄道やバスなどに乗っていた	0.3%
その他	0.2%
合計	100.0%

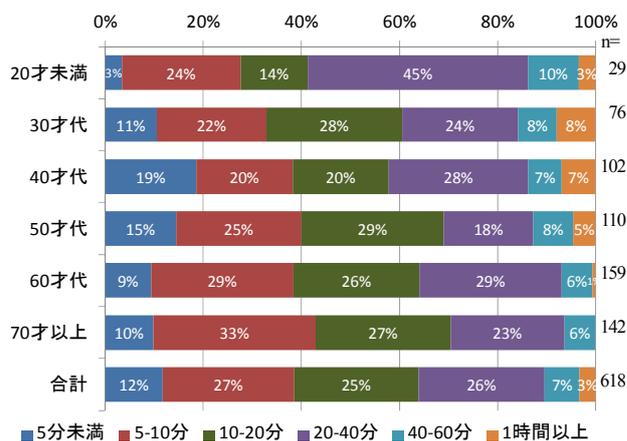
Table 4 地震直後の行動

何もせずすぐに避難を始めた	14.3%
外出先から一旦自宅に戻った	12.5%
家族を迎えに行った（学校や施設などへ）	8.3%
家族の帰りを待っていた	3.3%
海の様子を見に行った	1.1%
避難のための荷物（現金・通帳・印鑑、食料、衣類、薬、ラジオ、懐中電灯など）をまとめた	13.2%
地震で散らかった家財を片づけた	10.4%
家族や知人に連絡した（電話、メール）	10.2%
様子を見たり、近所の人と話し合ったりしていた	10.6%
近所の人に無事か声をかけていた、または避難を勧めていた	9.9%
要介護者の避難の手助けをしていた	3.0%
点呼や安全確認などの集団行動のための準備をしていた	2.8%
覚えていない	0.4%
その他	0.1%
合計	100.0%

Table 4 には、地震直後の行動を示した。何もせずすぐに避難を始めた人は約 14% にすぎなかった。外出先から一旦自宅に戻った人が約 13%、学校や施設に家族を迎えに行った人が約 8% となった。また、避難のための荷物をまとめた人が約 13%、家財の片づけをした人が約 10%、家族や知人に連絡した人が約 10%、様子を見たり近所の人と話合った人が約 10%、近所の人に声をかけていた人が約 10% であった。このように、地震直後は、家族の迎え、安否の確認、避難のための準備、連絡等の行動を行っていたことがわかる。

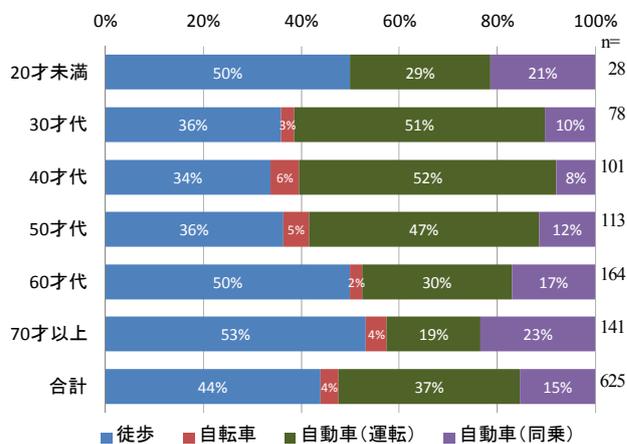
Fig. 2 に年齢階層別の避難開始までの時間を示した。20～30 才代でやや避難開始までの時間が短く、40 才以上の年代でやや長くなっている。これは、地震直後の行動（Table 4）にみられるように、さまざまな行動を行っていたことによると考えられる。

Fig. 3 に年齢階層別の避難の際の交通手段を示した。30 才代から 50 才代の人、自動車を運転して避難している人が多く、20 才未満と 60 才以上の人は徒歩や自動



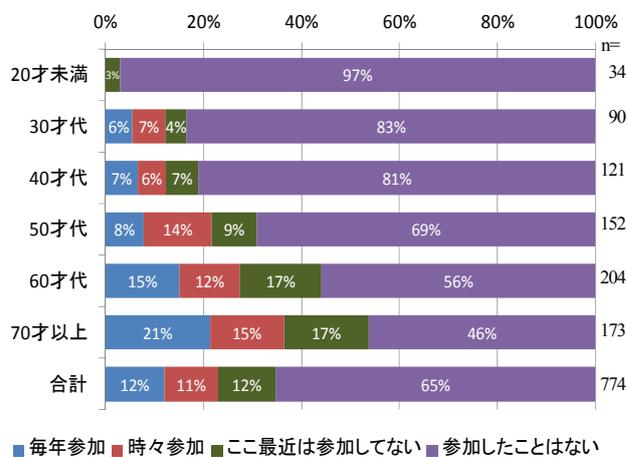
注：年齢階層、避難開始までの時間に記入ありサンプルのみ集計

Fig. 2 年齢階層別の避難開始までの時間



注：年齢階層、避難手段に記入ありサンプルのみ集計

Fig. 3 年齢階層別の避難手段



注：年齢階層、防災訓練への参加状況に記入ありサンプルのみ集計

Fig. 4 年齢階層別の防災訓練への参加状況

車に同乗し避難している人が多い傾向がある。Fig. 4 には、年齢階層別の避難訓練への参加状況を示した。年齢が高くなるにしたがい参加した人が多くなり、若い人ほど参加していなかった傾向があることが明らかになった。

4. 避難シミュレーションの方法

4.1. シミュレーションの方法

シミュレーションの分析地域は、津波に浸水した範囲とする。予測する状況は、東日本大震災時と同様の人口分布であり、震災後に策定された防災対策が施され、住民が大震災時と同様の避難行動をとった場合である。

シミュレーションの流れを Fig. 5 に示した。本研究ではアンケート調査を集計した避難行動データを入力することにより簡易に予測する。パーソントリップ調査データに基づく四段階推定法の交通手段分担交通量の予測に例えるならば、分担率曲線モデルを適用する方法に相当する。分担率曲線は通常、距離帯を変数とするが、本研究においては年齢階層別の避難行動特性を設定する。その理由は、アンケート調査結果の集計において、年齢階層別に避難行動に差異があったためである。

人口分布は、町丁・大字別（139 ゾーン）・年齢階層別（5才刻み）の昼間人口を整備する。基本とする人口は、2010年国勢調査データ（10月1日時点）とした。国勢調査は、住民基本台帳統計よりも、居住実態を捉えており、就業・就学状況の情報が含まれるために用いた。大地震は平日の14時46分に発生したため、就業者は就業中、児童・生徒・学生は就学中、幼稚園児等の未就学者は在宅していたとした。非就業者、非就学者は在宅していたと仮定した。その理由は、アンケート調査結果から非就業者、非就学者の多くが在宅していたこと、外出・移動中の人の所在地を町丁・大字別に特定できるサンプルが少なかったためである。以上により、就業者は国勢調査データに基づき従業地に配置した。就業者も従業地を離れている場合があるが、外出・移動中の所在地を町丁・大字別に特定できないため、従業地に存在したとした。就学者は小学校、中学校、高等学校、専門学校、短期大学、大学の所在地に配置した。その他の非就業者、非就学者は自宅に配置した。以上の方法は、パーソントリップ調査の交通量予測の際の現況人口フレームの設定方法と同様である。

次の浸水域内人口は、一定以上の浸水深の範囲に存在した人とする。一定以上の浸水の範囲とは、東日本大震災津波避難合同調査団の調査資料²⁵⁾より、犠牲者（死亡者）の発生と関連の強い全壊家屋のある範囲とした。浸水域内人口は44,284人（年齢不詳119人を除く）である。分析単位は町丁・大字とし、一部の町丁・大字について

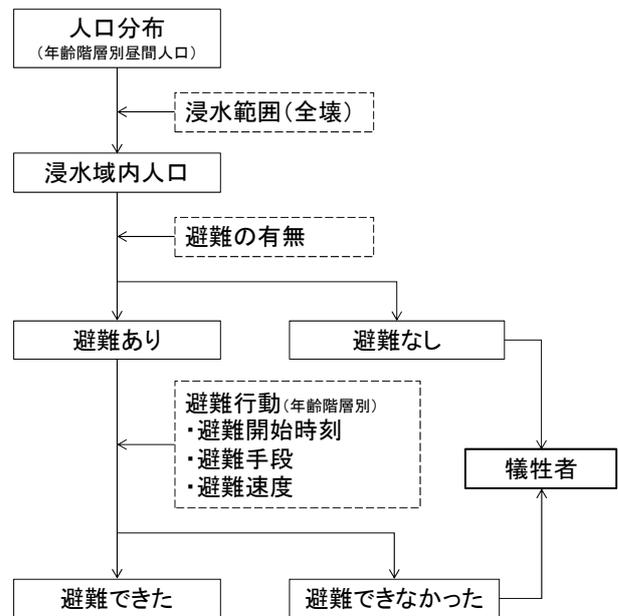


Fig. 5 シミュレーションの流れ

Table 5 避難速度

	徒歩			自転車	自動車
	15才未満	15~64才	65才以上		
避難速度 m/分	58.7	79.6	58.3	106.7	150.0

は、浸水範囲により面積比でゾーン分割した。

「避難あり」、「避難なし」の人口については、調査団の調査資料²⁵⁾から避難なしを5%とし分割する。避難なしの比率は、既に亡くなっている人を含む情報であり、生存者を対象とするアンケート調査からは把握できないため、調査団によるグループヒアリング調査結果から設定した。また、年齢階層別、町丁・大字別には十分なサンプル数を確保できていないため、一律の値とした。個人属性、地区特性別の避難行動特性を考慮できない点については、簡易なシミュレーションをしていることに由来する課題と考える。

「避難あり」については避難開始時刻、避難手段、避難速度により津波来襲までに一定以上の浸水範囲外（全壊家屋範囲外）に「避難できた」、「避難できなかった」を判定する。「避難なし」および「避難できなかった」の人口の合計を犠牲者とする。シミュレーション計算に入力する避難開始時刻、避難手段は、アンケート調査結果（Fig. 2, Fig. 3）に示すように年齢階層別に設定した。

14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震による津波は、牡鹿半島の鮎川検潮所で15時26分に最大波（高さ8.6m）を記録し、市街地の海岸沿いの門脇観測所は15時40分から15時50分までの間に欠測した。また、石巻市西側の東松島市野蒜観測所では15時45分に急激な水位の上昇を記録している。以上より、本研究では、市街地に近い海岸線には15時45分に最大波が到達した

と設定する。東日本大震災津波避難合同調査団の調査資料²⁵⁾の津波再現計算によると、津波は海岸線に到達後 10 分後に最大範囲となっている。本分析ではこの計算結果の津波到着時刻を用いた。避難速度は、国土交通省調査報告書²⁶⁾による値を用いた (Table 5)。避難経路については、アンケート調査 (ヒアリング調査) において把握しているが、町丁・大字別にみると無回答のゾーンがあるなどサンプル数が不十分であると考え、次のような方法で設定した。まず、避難方向を海岸線に直交する方向と仮定した。実際には直線経路ではなく道路に沿って迂回するため、避難速度を $\sqrt{2}$ で除した値を用いた。すなわち、正方形の対角線を移動するために、正方形の2辺を経由するという仮定である。この方法に関しては、他調査の避難経路データの援用や被害や渋滞状況を考慮した避難経路選択モデルにより予測することが今後の課題である。また、アンケート調査による地震直後の行動 (Table 4) では、一旦自宅に戻った、家族を迎えに行ったなどの行動がみられたが、本分析では、浸水範囲外 (全壊家屋範囲外) にいる人は、浸水域内に戻らないと仮定した。

ここで、生存者と犠牲者の行動特性に差異はないという、重要な仮定をおいていることを述べる。本研究のアンケート調査で得られた詳細な避難行動データは生存者に限られる。犠牲者についても生存者へのヒアリング調査により情報を得たが、生存者と犠牲者の行動特性に差異があるかを定量的に検証するほどの情報を得ていない。既存調査⁷⁾においても犠牲者に関する情報を収集しているが定量的な検証は困難である。この点については、新たに SP (Stated Preference) 調査を実施し、避難行動の意向データを分析するなどの方法が考えられるが、本研究においては今後の研究課題とする。

4.2. ケース設定

本シミュレーションでは、人口分布は東日本大震災時とし、東北地方太平洋沖地震と同じ地震と津波 (地震規模・震源、発生時節・曜日・時間帯、津波規模等) が発生した場合を予測する。防潮堤等のハード整備、地盤高は震災時と同じとし、住民が大震災時と同様の避難行動をとったとする。以上の条件で実績を再現した上で、震災後に石巻市が策定した防災対策のうち、大きなハード整備を伴わない対策を行った場合を予測する。

シミュレーションを実施するケース設定を Table 6 に示す。ケース 0 は、東北地方太平洋沖地震の発生した 14 時 46 分と同様に昼間に津波が来襲し、浸水域に所在する人が誰も避難しなかったとしたケースである。ケース 1 は、ケース 0 に対し東日本大震災時と同様の避難行動をとった場合であり、被害実績を再現するケースである。ケース 0 とケース 1 を比較することにより、東日本大震災の避難行動による人的被害の軽減効果を把握する。

Table 6 ケース設定

ケース	設定条件	設定意図
ケース 0	避難なし	ケース 1 と比較することにより、実績の避難行動の効果を把握する。
ケース 1	避難あり	【実績再現】実績の犠牲者数と比較し、再現性を分析する。
ケース 2	避難あり 避難訓練強化	ケース 1 と比較することにより、「避難訓練」の効果を把握する。
ケース 3	避難あり 避難ビル整備	ケース 1 と比較することにより、「避難ビル整備」の効果を把握する。
ケース 4	避難あり 避難訓練強化 避難ビル整備	ケース 1 と比較することにより、「避難訓練強化」、「避難ビル整備」の効果を把握する。

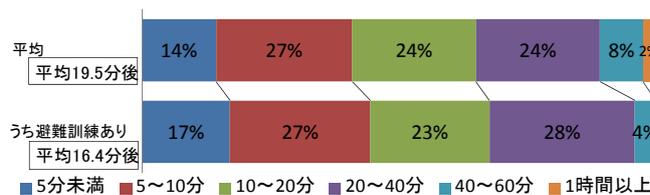


Fig. 6 避難開始までの時間 (アンケート調査の実績値)

防災対策として、避難訓練の強化と避難ビルの整備を取上げる。本研究では、石巻市が策定した復興計画の防災対策のうち、大きなハード整備を伴わない対策の効果を分析する。そのため、防災対策 (Table 1) にあげられている「防災対策の見直し」と「防災施設の整備」に着目する。防災対策の見直しについては、地域防災計画を見直し、防災教育を強化し、自主防災組織の機能を強化することにより避難訓練を強化することを想定する。防災施設の整備については、防災拠点・機能の整備を図り、避難ビル等の設置・機能整備を図ることを想定する。

ケース 2 は、大震災時よりも避難訓練を強化し、避難開始時刻を早くするケースである。アンケート調査結果では、避難開始までの時間は平均 19.5 分後であったのに対し、毎年避難訓練に参加していると答えた人に限定すると平均 16.4 分後であった (Fig. 6)。この傾向をシミュレーションに反映することとし、全員に毎年避難訓練に参加していた人の避難開始時間 (避難訓練あり) を適用することにより、避難訓練強化のケースとする。時間短縮は平均 3 分であるが、ウェザーニューズの調査結果⁷⁾によると、被災地全体で避難開始までの時間は、生存者の平均 19 分、犠牲者の 21 分であり、わずかの時間差が重大な結果 (生存できたか) につながると考えられる。

ケース 3 は、避難ビルを整備するケースである。避難ビルの配置は、石巻市震災復興基本計画²⁶⁾と内閣府の津波避難ビル等に係るガイドライン²⁷⁾を参考に、避難ビルを設置することとする。ケース 4 は、避難訓練の強化と避難ビルの整備の両方を行うケースである。ケース 3, 4 は、避難ビル方向に避難するとした。

5. 防災対策の効果分析

5.1. シミュレーション結果

避難行動を行わないケース0では、犠牲者は44,284人と予測された。ケース1以降の予測結果をFig. 7に示した。大震災時と同様の避難行動を行ったケース1の予測結果は3,651人となり、実績の犠牲者数(死者・行方不明者数²⁴⁾3,592人と比較すると、十分な再現精度が得られたと考えられる。

本分析では、実際の犠牲者の避難行動の定量的なデータが得られないまま避難行動特性を設定したこと、既存調査から避難速度を設定したこと、避難距離を仮定したことなど、多くの仮定に基づいている。実績再現ケースは、防災対策の効果を把握するための基本ケースとなるため、シミュレーションにおいては仮定を変更しながらキャリブレーションを繰り返すことにより良好な予測値を得ることができた。

ケース1はケース0よりも40,633人、約92%少なく、これらの人が避難行動により生存できたと判断できる。犠牲者数の予測値3,651人のうち避難した人は1,437人であり、年齢構成は15才未満13%、15~64才60%、65才以上27%である。浸水域内人口に比べ15才未満、65才以上の構成比が高くなっており、徒歩の避難速度が小さいことが影響していると考えられる。

次に、実績再現ケース1を基本に、防災対策を実施するケースの予測結果をFig. 7でみていく。避難訓練を強化するケース2の犠牲者数は2,730人となり、ケース2対し921人、約25%減少した。ケース1に対しケース2は避難開始を約3分早くしたケースであり、日頃の避難訓練の効果が確認された。

浸水域に避難ビルを整備するケース3の犠牲者数は3,203人となり、ケース1に対し448人、約12%減少し、避難ビルの整備効果が確認された。避難ビル整備については、石巻市震災復興基本計画²⁶⁾には位置、数が示されていないため、本分析においては、ケース1で犠牲者率の高い地区に避難ビルを整備することとした。具体的には、ケース1で犠牲者率10%以上となった12町(対象地域は32町)に各1ヶ所の避難ビルを設定した。本分析では、避難ビルの収容人数は考慮していない。

避難訓練の強化と避難ビルの整備を行うケース4の犠牲者は2,224人となりケース1に対し1,427人、約39%減少するという結果となった。

Fig. 7を整理し年齢階層別にみると(Fig. 8)、実績再現ケース1に対し、避難訓練を強化するケース2では、高齢者の犠牲者数が他の年齢階層よりも減少しており、高齢者に対する効果が大きいことがわかる。ケース3、ケース4については、各年齢階層で犠牲者が減少する結果となった。

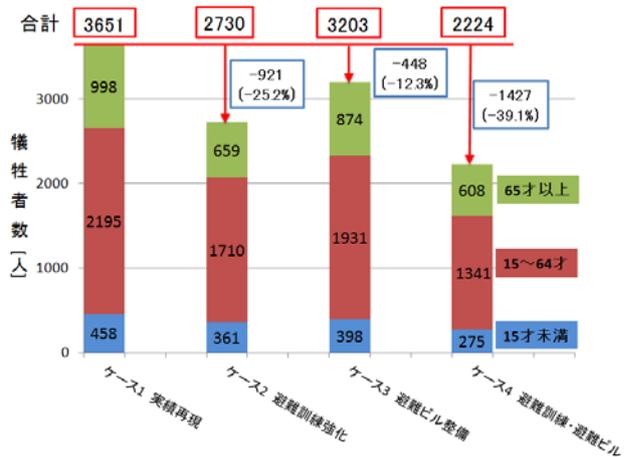


Fig. 7 ケース別犠牲者数

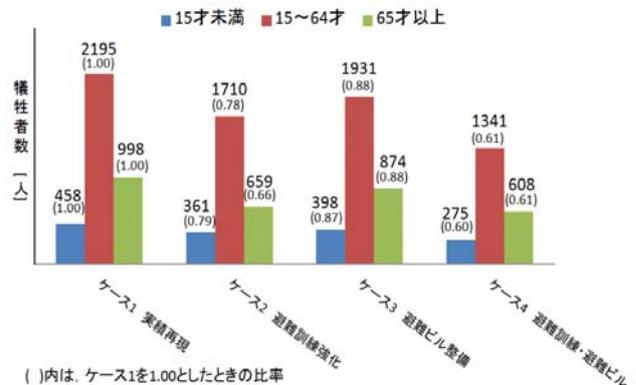


Fig. 8 年齢階層別の犠牲者数

5.2. 地区別にみた分析

防災対策の効果を地区別に分析する。大震災の浸水域内において、全壊家屋の存在する範囲について示した(Fig. 8)。地区区分は、シミュレーションで用いた町丁・大字単位(139ゾーン)を、町別(32ゾーン)に集約した。地区別犠牲者率とは、地震発生時の地区別昼間人口に対する犠牲者の比率である。大震災時と同様の避難行動を行ったケース1(実績再現)では、臨海地区において犠牲者率が9%を超える地区が広がり、臨海地区から離れた地域でやや低い。

ケース1に対し、避難訓練を強化するケース2では、臨海地区から離れた地区では、犠牲者率が低下しており、避難訓練の強化の効果が確認できる。臨海地区には犠牲者率の高い地区が残り、避難開始時刻を平均約3分早くしても津波から避難することができない人が存在することを示す。

ケース1に対し、避難ビルの整備を行うケース3では、避難ビルを整備した地区において犠牲者率が低下しており、避難ビルを設置する効果を確認できた。避難訓練の効果と避難ビルの整備を行うケース4では、臨海地区および浸水域全体において犠牲者率が低下している。

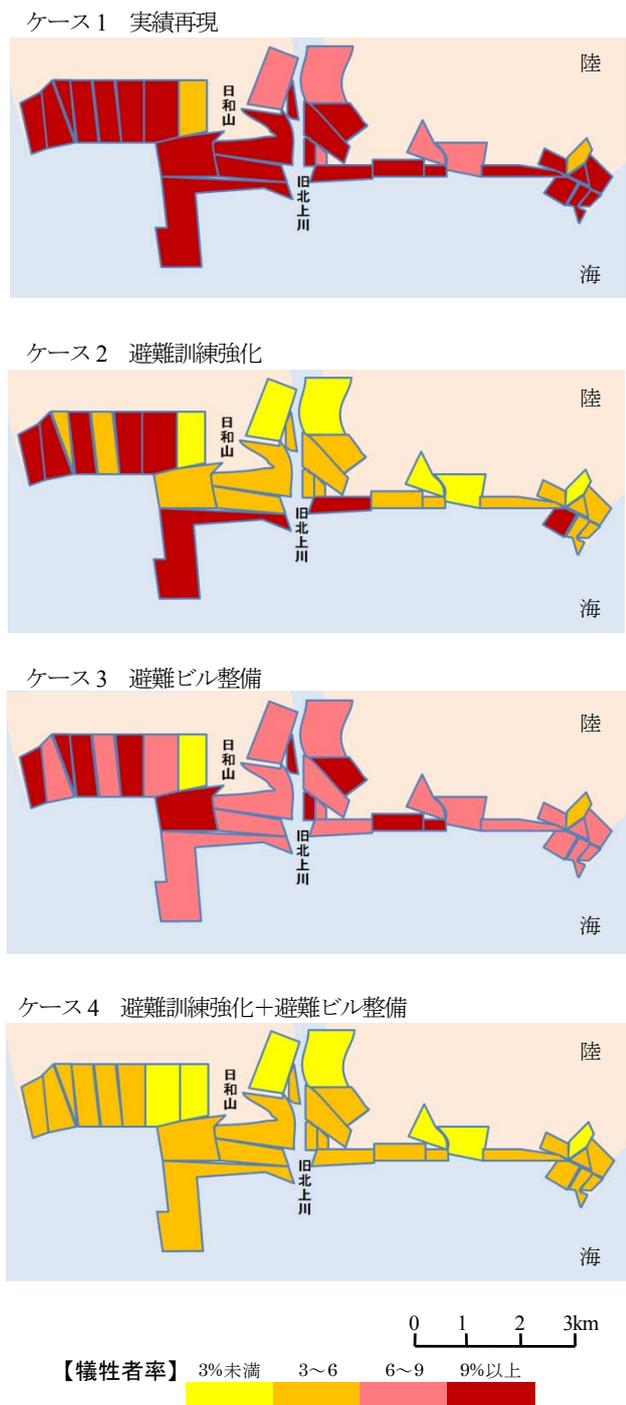


Fig. 9 地区別犠牲者率（地震発生時の昼間人口に対する割合）

5.3. 効果分析のまとめと分析上の課題

東日本大震災の人的被害を再現したところ、十分な精度が得られたため、防災対策の効果に関するシミュレーションを行った。防災対策は、避難訓練の強化（避難開始時刻を平均約3分早くする）、避難ビルの整備である。予測の結果、実績再現ケースに対し、犠牲者数をそれぞれ約25%、約12%減少させる効果があった。また、地区別にみた結果から、各防災対策が効果を及ぼす範囲を把握することができた。この2つの防災対策は規模や内容

が異なるため効果の程度を比較できないが、本分析により効果を定量的に把握することができた。2つの防災対策を行ったケースでは、実績再現ケースに対し犠牲者数が約39%減少したが、約61%、約2,200人は犠牲になるという予測結果になった。これら犠牲者の多くは、避難しない人である。

評価結果を踏まえた分析上の課題を、次の3点に整理する。まず、本分析で設定した防災対策の効果を向上するためには、避難開始時刻をより早くする、避難ビルの密度をより高くすることが考えられる。本研究の成果はこれら対策の検討に活用できると考えられる。一方で、避難開始時刻を早くする方策や本研究で設定した防災対策以外についても検討が必要であろう。これら課題については、既存研究において行われており、例えば、片田ら²⁸⁾は、シナリオ・シミュレータを用い防災教育の評価を行っている。今後は、東日本大震災被災地を対象とした研究蓄積が望まれる。また、本研究では、避難しない人の防災対策による行動変更を考慮していないが、避難しない人に迅速な避難を促すことが犠牲者の減少に効果があるため、今後検討したい。

次に、本分析においては、避難開始時刻等のシミュレーション条件を年齢階層別に一律に設定した。しかし、アンケート調査結果にみられるように、地震直後の所在地や行動は多様であることを考慮した分析の検討も必要であろう。また、高齢者や身障者等は身体の状態によって、平均的な避難行動をとることができない場合などを考慮することも課題である。今村ら¹⁵⁾¹⁶⁾が精緻なシミュレーションモデルを開発し、西畑ら¹⁷⁾が津波の挙動を考慮したシミュレーションモデルを開発し、桑沢・片田²⁹⁾は津波災害の発生構造をシミュレーションしている。また、被災時の道路混雑、避難経路を考慮した分析も必要であろう。今後も、東日本大震災被災地を対象とした研究蓄積が望まれる。

3 つめに、本研究のシミュレーションは、東北地方太平洋沖地震を想定し、震災前と同様のハード整備をしていることを想定した。震源が異なれば津波到達時刻も異なり、防潮堤等により津波遡上高も異なる。また、シミュレーションの対象時刻は日中としたが、夜間、朝夕等の時間帯についても検討が必要である。

6. おわりに

6.1. 本研究のまとめ

本研究では、石巻市において東日本大震災被災者を対象としたアンケート調査を実施し、津波来襲時の避難行動特性を把握した。次に、避難行動特性に基づく簡易なシミュレーションにより人的被害を再現し、石巻市の復

興計画で示されている避難訓練の強化、避難ビル整備等の防災対策の効果を分析した。

本研究では、ハード整備を比較的伴わない防災対策について分析してきたが、本研究で設定した条件では、犠牲者はなお約 2,200 人発生する予測結果となった。犠牲者をより減らすために考えられる方策を 3 つ整理する。まず、避難しない人の避難、避難開始までの時間をより早くするなど、避難行動の改善を図ることである。2 つめは、石巻市に指定されている「津波避難ビル」、整備が進められている「津波避難タワー」の配置について、本研究の分析結果を適用し検証することである。3 つめは、本研究ではシミュレーションを行わなかった防潮堤等のハード整備、高台移転等の土地利用計画の効果を評価することである。

6.2. 今後の課題

本研究全体を通じた課題を 2 点あげる。

1 つめは、アンケート調査のデータ精度や内容に関する課題である。被災者を対象とする調査は、震災直後に実施することは、救援活動への妨げになること、被災者への配慮、調査員の安全確保の点からの困難があり、ある程度時間を経た後に、調査活動を制約された中での調査にならざるを得ない。また、対象者の母集団の把握や抽出作業が難しいなどの調査設計上の問題もあり、データ精度の分析が課題となる。また、本研究のアンケート調査では、被災者への配慮から子どもへの調査をひかえた。これら点については、やむを得ない面もあり、既に進められているように、多くの研究者がアクセスできるデータアーカイブの構築し、他地域も含めた情報を有効に活用していくことが課題である。

2 つめは、避難シミュレーションで表現した避難行動特性に関する課題である。本研究のシミュレーションでは避難の単位を個人としたが、世帯やグループでの避難があった。また、家族を迎えに行った、海の様子を見に行ったなどのアンケート調査で把握した行動についても表現していないため課題として残る。さらに、本研究で用いたデータは、生存者の避難行動データである。避難シミュレーションを行うためには犠牲者の情報も含め分析する必要がある。被災後に犠牲者を含めた実態の避難行動データを得ることは困難であり、崔³⁰⁾、氏原ら³¹⁾が行っているように、今後起こり得る津波を想定した避難行動の意向について SP 調査を実施し分析することが、人的被害を抑制するうえで重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 例えば、国土交通省(2012.03.11)『東日本大震災の記録－国土交通省の災害対応－』。
- 2) 内閣府(2011.08.16)『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』。
- 3) 斎藤徳美(1990)「1989 年三陸沖地震の津波に関する住民の意識・行動解析」『自然災害科学』9-2, 29-63.
- 4) 片田敏孝, 児玉真, 桑沢敬行, 越村俊一(2005)「住民の避難行動にみる津波防災の現状と課題－2003 年宮城県沖の地震・気仙沼市民意識調査から－」『土木学会論文集』789/II-71, 93-104.
- 5) 金井昌信, 片田敏孝(2011)「津波来襲時の住民避難を誘発する社会対応の検討－2010 年チリ地震津波の避難実態から－」『災害情報』9, 103-113.
- 6) 株式会社東日本放送, 株式会社サーベイリサーチセンター(2011.04.28)『東日本大震災「宮城県沿岸部における被災地アンケート」調査結果について』。
- 7) 株式会社ウェザーニューズ(2011.09.08)『東日本大震災津波調査 (調査結果)』。
- 8) 柳原純夫, 村上ひとみ(2012)「東日本大震災における石巻市内での避難行動－移動距離からの分析－」『地震工学研究発表会講演概要集』32, CD-ROM (6-235).
- 9) 村上ひとみ, 三上卓, 柳原純夫(2012)「東日本大震災における津波避難の交通手段と危険度－石巻市のアンケート調査をもとに－」『地震工学研究発表会講演概要集』32, CD-ROM (6-377).
- 10) 平井寛, 南正昭, 菱沼拓郎(2011)「避難のしかたによる避難の所要時間と身体への負担の違いについての研究－宮古市田老地区における調査データを用いて－」『土木計画学研究・講演集』44, CD-ROM (P11).
- 11) 大野沙知子, 高木郎義, 倉内文孝, 出村嘉史, 大崎孝典(2012)「東日本大震災における津波避難行動に関する新聞記事データベースの構築とそれに基づく考察」『土木計画学研究・講演集』45, CD-ROM (9).
- 12) 遠藤聡, 石川哲也, 藤生慎, 高田和幸(2012)「言語解析を用いた東北地方太平洋沖地震による津波避難分析－気仙沼市の被災者を対象として－」『地震工学研究発表会講演概要集』32, CD-ROM (5-328).
- 13) 金井昌信, 片田敏孝(2012)「2011 年東北地方太平洋沖地震津波来襲時における津波避難意思決定構造の把握」『災害情報』10, 91-102.
- 14) 浦田淳司, 羽藤英二(2013)「津波避難時の避難開始時刻に与える事前行動の影響分析－東日本大震災における陸前高田市での避難行動を対象として－」『都市計画論文集』48-3, 807-812.
- 15) 今村文彦, 鈴木介, 谷口将彦(2001)「津波避難数値シミュレーション法の開発と北海道奥尻島青苗地区への適用」『自然災害科学』20-2, 183-195.
- 16) 早川哲史, 今村文彦(2002)「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』21-1, 51-66.

1) 例えば、国土交通省(2012.03.11)『東日本大震災の記録－

- 17) 西畑剛, 森屋陽一, 田村保, 瀧本浩一, 三浦房紀(2005)「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』21, 163-168.
- 18) 片田敏孝, 桑沢敬行, 金井昌信(2007)「発生時刻の都市アクティビティを考慮した津波による人的被害量の推定に関する研究」『土木学会論文集D』63, 275-286.
- 19) 佐藤太一, 河野達仁, 越村俊一, 山浦一保, 今村文彦(2008)「認知的不協和を考慮した津波避難行動モデルの開発ー避難シミュレーションへの心理的要素の導入ー」『地域安全学会論文集』10, 393-400.
- 20) 小野村広平, 藤生慎, 高田和幸(2012)「東北地方太平洋沖地震における自動車による津波避難の再現手法に関する研究ー交通流配分手法を用いた適用可能性の検討ー」『地震工学研究発表会講演概要集』32, CD-ROM (5-327).
- 21) 後藤洋三, 印南潤二, Muzailin AFFAN, Nur FADLI(2012)「地震による大規模避難の実例調査と津波からの住民避難シミュレーションの検証」『地震工学研究発表会講演概要集』32, CD-ROM (4-281).
- 22) 森田哲夫, 細川良美, 塚田伸也, 湯沢昭, 森本章倫(2014)「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』11, 1-11.
- 23) 石巻市(2012.12)『石巻市の復興状況について』.
- 24) 石巻市 (2012.12)『石巻市震災復興基本計画ー最大の被災都市から世界の復興モデル都市石巻を目指してー絆と協働の共鳴社会づくり』.
- 25) 東日本大震災津波避難合同調査団(2011.12.18)『想定を超える大津波からの避難に関する国際ワークショップ資料』.
- 26) 国土交通省(2011.12)『東日本大震災の津波被災現況調査(第3次報告)ー津波からの避難実態調査結果』.
- 27) 内閣府(2005)『津波避難ビル等に係るガイドライン』.
- 28) 片田敏孝, 桑沢敬行, 金井昌信, 細井教平(2004)「津波災害シナリオ・シミュレータを用いた尾鷲市民への防災教育の実施とその評価」『社会技術研究論文集』2, 199-208.
- 29) 桑沢敬行, 片田敏孝(2008)「震災状況下における津波被害の発生構造に関するシミュレーション分析」『土木学会論文集D』64, 380-390.
- 30) 崔宰栄(2014)「地震発生想定時の人々の抱く被害イメージと避難レスポンス」『都市計画論文集』49-1, 1-10.
- 31) 氏原岳人, 阿部宏史, 佐々木麻衣(2014)「津波に対する“備え”特性の類型化と避難行動への影響ー津波非常襲地域の居住者を対象としてー」『都市計画論文集』49-1, 120-127.

謝辞

大震災で亡くなられた方々のご冥福を祈り, 被災地の復興を祈念します. 本研究は, 東日本大震災津波避難合同調査団(山田町・石巻市担当チーム)による調査結果を使用しています. ここに記し謝意を表します.

ANALYSIS ON EFFECTS OF DISASTER PREVENTION MEASURES BASED ON REFUGE BEHAVIOR DATA - A CASE STUDY OF ISHINOMAKI CITY -

Tetsuo MORITA¹, Hiroki HASEGAWA², Shinya TSUKADA³, Takashi HASHIMOTO⁴,
and Akira YUZAWA⁵

¹Ph.D. (Eng.) Professor, Tohoku Institute of Technology (E-mail: ttmorita@tohtech.ac.jp)

²Gunma National College of Technology (E-mail: hasehiro2.19@gmail.com)

³Ph.D. (Eng.), Maebashi City Office (E-mail: shinya-tsu@city.maebashi.gunma.jp)

⁴ Ph.D. (Eng.), Iseaki City Office (E-mail: t84moto@nifty.com)

⁵Ph.D. (Eng.), Maebashi Institute of Technology (E-mail: yuzawa@maebashi-it.ac.jp)

The East Japan great earthquake disaster brought serious damage, and a lot of people died. We studied the effects of disaster prevention measures for Ishinomaki City that suffered big damage by East Japan great earthquake disaster. We should get knowledge to examine a regional plan with a little damage caused by the tsunami. At first we analyzed the refuge behavior and a refuge action characteristic based on the questionnaire survey data in Ishinomaki City. Secondly, we performed the simulation based on refuge behavior data. This study showed the effects of the disaster prevention measures in the revival plan that Ishinomaki City planned.

Key Words: disaster, tsunami, refuge, Great East Japan Earthquake, Ishinomaki City