東日本大震災時の南三陸町志津川地区における 住民の避難開始行動の時空間分析

土肥 裕史¹・奥村 与志弘²・清野 純史³

¹学生会員 京都大学大学院学生 工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail: dohi.yuji.25x@st.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学大学院助教 地球環境学堂 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail: okumura.yoshihiro.8x@kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学大学院教授 地球環境学堂 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail: kiyono.junji.5x@kyoto-u.ac.jp

東日本大震災では、犠牲者の半数以上が自宅から避難しなかった可能性があり、避難開始の難しさが浮き彫りとなった。本研究では、復興支援調査アーカイブおよび著者らが開発してきた避難者発生シミュレーションを用いて、南三陸町志津川地区の避難開始の特徴を時空間的に分析した。その結果、(1) 地震発生時にいた場所の種類によって避難開始の傾向は大きく異なり、職場・店舗にいた住民の多くが家族らを気遣い自宅に戻った後、避難を開始していたこと、(2) 津波避難行動に加え、家族等を迎えに行く行動により、住民の多くが時間の経過とともに郊外へと移動していたこと、(3) その移動に伴う「逃げなければ」という雰囲気伝播により、浸水予測エリア外においても避難を開始しやすい状況に推移した可能性があることがわかった。

Key Words: tsunami evacuation, evacuation start, individual location when an earthquake occurs, evacuee generation model, the 2011 Tohoku tsunami, Minamisanriku town

1. はじめに

東日本大震災では、多くの住民が津波に巻き込まれた。被害の大きい東北地方太平洋沿岸地域は我が国の津波防災先進地域であったこと、津波避難のために30分以上の時間があつたこと、津波警報や避難勧告などの公的機関からの情報も提供されていたことを勘案すると、津波避難の難しさが浮き彫りとなる。さらに、犠牲者の半数以上が避難をせずに自宅にいた可能性があるとの調査報告¹⁾を踏まえると、津波による人的被害軽減にむけて、避難開始に関する課題の解決が極めて重要である。

我が国の津波避難開始は、1952年の津波予警報システムの運用開始以降、気象庁による津波警報等の発表、自治体による避難勧告等の発令等によって住民に危険を知らせ、避難を促すという枠組みの中で多く議論されてきた。東日本大震災においても、公的機関からの情報によって住民は早期避難を促された。

一方で、住民を含めた社会を構成する様々な人々や自然現象が地域全体の避難開始において重要な役割を果たしたと考えられる事例も報告されている。茨城県大洗町では、沖出しをする船舶の汽笛が住民の早期避難を促し

た²⁾。また、本稿で注目する宮城県南三陸町では、商店の看板が津波で傾き、流される様子を目撃したことで指定避難場所からさらに高台へと向かわせた事例³⁾や、津波による「ごおーっという音」とともに「土ぼこりのような、瓦礫の高い壁のようなもの」を目撃することで丘へ逃げた事例⁴⁾も報告されている。避難開始における上記の現象は、リアリティの共同構築⁵⁾と呼ばれる概念を用いると、「避難を開始しなければならない事態が迫っているというリアリティ(現実味)」を構築するために重要な役割を担っていたと解釈できる。

この概念に基づき、著者らは避難者発生シミュレーション手法を開発し、津波にのまれた高齢者施設における避難行動³⁾や宮城県石巻市門脇地区・南浜地区における避難行動⁶⁾、同県南三陸町志津川地区における避難開始に関する地域差⁷⁾を分析してきた。著者らの一連の研究から、「同質の避難者を想定すれば、避難時に住民が通過する経路付近は情報発信源が多くなり、避難開始において好条件下にある」ことがわかってきた。

しかし、地域で醸成される「逃げなければ」という雰囲気伝播に敏感に反応し危機感を高めやすい住民もいれば、高めづらい住民も存在する。つまり、避難を開始しやす

い、開始しづらい住民がどのように分布しているかを理解することは、避難開始を分析するうえで欠かせないと言える。

本研究では、南三陸町志津川地区を対象として、津波災害時の避難開始の特徴を時空間的に明らかにする。具体的には、東日本大震災時の生存者の行動に注目した、国土交通省住宅局・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」データ⁸⁾および、開発してきた避難者発生シミュレーションを用いて、住民が避難開始に至る実態を明らかにする。

2. 復興支援調査アーカイブを用いた避難開始の実態分析

本章では、復興支援調査アーカイブ⁸⁾を用いて、東日本大震災時の宮城県南三陸町志津川地区における、住民の分布と津波避難開始行動の關係に着目し、避難開始の実態を明らかにする。当該データには、住民(生存者)の移動に関する詳細なデータ(移動開始時間、到達時間、移動目的、移動手段など)がまとめられている。なお、南三陸町を対象とした同データのサンプルの属性は、男性 41%、女性 59%であり、60 歳以上の回答者が全体の 51%を占めている。

(1) 対象地域の概要

志津川地区は、東日本大震災で震度 6 弱を観測し、15m を超える高さの津波に襲われた。津波浸水予測エリアの内外にかかわらず、広範囲で津波の被害を受けた(図-1(a))⁹⁾。南三陸町全体の人的被害は、死者(直接死) 620 名、行方不明者 212 名であった(2016 年 4 月現在)。著者らはこれまでに、志津川地区の推定犠牲者率は 3.5%~5.3%であり、同町全体の犠牲者率(3.1%)を考慮すると、対象地域は町内でも特に犠牲者率が高かったことを報告しており⁷⁾、同地区において避難開始の難しさが表れているといえる。また、津波数値計算結果から、地震発生 45 分後に津波が対象地域の海岸堤防を越え始めたと推定される。

(2) 分析で用いる時空間解像度

本研究では、復興支援調査アーカイブ⁸⁾における、地震発生時に当該地域内にいた人および地域内で避難を完了した人を対象とする。サンプル数は 236 名であり、同地域に居住する全住民(5,351 名)の 4.4%にあたる。また、使用するデータには、対象地区の避難開始の特徴に加え、調査方法の特徴(例えば、聞き取り調査における

(a) 津波浸範囲と震災以前の津波ハザードマップとの比較
(震災前の旧志津川町の津波ハザードマップ⁹⁾に浸水域を加筆)

(b) 注目する領域

図-1 宮城県南三陸町志津川地区

調査員と回答者のやり取りの中で生じる認識の差異)なども含まれることに留意する必要がある。そこで、本研究では前者に注目し、以下の時空間解像度を用いる。

時間解像度について、使用するデータには、住民の移動に関する出発時間、到達時間が分単位で記載されている。しかし、聞き取り調査における調査員と回答者のやり取りの中で、分単位での議論が困難な事例も見られる。例として、地震発生直後に出発したにもかかわらず、15 時頃に出発したとする回答も見られた(地震発生は 14 時 46 分)。そこで、著者らは 20 分ごとのフェーズに注目することで、上記の誤差を許容できる範囲で丸めることができると考えた。具体的には、[1] 地震発生 0 分~20 分後(地震発生直後のフェーズ)、[2] 地震発生 21 分~40 分後(地震発生から少し後のフェーズ)、[3] 地震発生 41 分~60 分後(津波氾濫開始のフェーズ)、[4] 地震発生 61 分~80 分後(津波氾濫中のフェーズ)に分類した。

また、空間解像度について、図-1(b)に示す志津川地区 2,200m 四方の空間を 200m 四方の領域(以下、メッシュ) 121 カ所に分割することにより、津波避難に関する状況の空間的な分布・広がりを考える。なお、空間解像度が 200m のため、数 10m 規模のブロック(道路に囲まれた区画)における状況の評価することはできない。しかし、復興支援調査アーカイブで得られたサンプル数では、数

10m 精度で地区の特徴を分析することが困難である。一方で、著者らが開発してきた避難者発生シミュレーションにおいて、避難を促す情報発信源の影響範囲に焦点を当てると、避難者の呼びかけが半径 30m、避難行動 (の目撃) が半径 110m であるため、空間解像度を 500m ほどにすると、これらの影響を十分に考慮することができない (シミュレーションに関する説明は次章にて行う)。200m の解像度であれば、メッシュを 2 名以上のサンプル数を用いて分析することができ、かつ、シミュレーションにおける避難行動の影響を考慮できる。以上の理由から、空間解像度を 200m とした。

(3) 住民の空間分布

a) 地震発生時および避難開始時にいた場所の種類

はじめに、住民の地震発生時および避難開始時にいた場所の種類に注目し、地震発生時を図-2(a)に、避難開始時を図-2(b)に示す。両図より、当時、自宅・近所にいた住民が全体の半数以上を占めていたことがわかる。また、地震発生時と避難開始時を比較すると、自宅・近所にいた住民が 9%増加する一方で、職場や店舗にいた住民の割合は半減しており、それぞれ 10%, 4%減少している。屋外の住民の割合は変化していない。したがって、地震発生時に職場や店舗にいた住民の多くが自宅に戻った後、避難を開始していたことが推測できる。なお、地震発生時に自宅・近所、職場、店舗、屋外のいずれかにいた住民は全体の 9 割を占めており、避難開始の特徴をこの 4

か所ごとに評価する。地震発生時の住民の分布を上記の 4 か所ごとに分類して図-3 に示す。自宅・近所にいた住民は対象地区の全体に広く分布しており、職場、店舗、屋外にいた住民は、志津川地区中心部である図の中央付近に集中していることがわかる。

サーベイリサーチセンター¹⁰⁾によると、地震発生時にいた場所の種類に関して、宮城県全体では 52.3%の住民が自宅に、23.1%が会社・学校に、11.1%がそれ以外の建物の中に、5.8%が屋外にいた。南三陸町では 52.2%の住民が自宅に、28.3%が会社・学校に、4.3%がそれ以外の建物の中に、10.9%が屋外にいた。これらは、復興支援調査アーカイブにおけるデータ⁸⁾と似た傾向を示しており、宮城県全体および南三陸町の平均的な特徴が対象地区に表れていることを示唆するものである。

b) 地震発生後最初の移動

次に、地震発生後、最初の移動の状況を図-4 に示す。図-4 の各図より、地震発生時にいた場所の種類ごとに傾向が異なることがわかる。対象地域全体 (図-4(a)) では、避難を行った住民が過半数 (67%) を占め、避難以外の行動が 30%であった。自宅・近所 (図-4(b)) にいた住民の大部分 (86%) は避難を開始している。屋外にい

図-5 避難以外の移動を行った住民の避難開始までの移動目的と移動場所（復興支援調査アーカイブ⁸⁾のデータを使用，地震後最初の移動目的が避難以外であった住民を対象，複数回答可）

た住民（図-4(e)）も，自宅・近所ほど顕著ではないが，過半数の住民（62%）が避難を開始し，残りは避難以外の行動をとっている．一方で，職場にいた住民（図-4(c)）に注目すると，避難を開始した割合，それ以外の行動をとった割合がともに半数ほどであった．店舗にいた住民（図-4(d)）は，避難以外の行動を行った住民が過半数を占めており（67%），宮城県全体および南三陸町における傾向¹⁰⁾と比較してかなり特異な傾向が見られた．したがって，自宅・近所にいた住民の多くは，直接，避難場所に移動していたことがわかる．対照的に，店舗にいた住民の多くは，避難を開始する前に別の場所へ移動していたことがわかる．

中央防災会議の調査報告¹¹⁾によると，対象とする宮

図-6 家族・親戚・知人を気遣う移動を開始した場所およびそれらの住民が避難を開始した場所（復興支援調査アーカイブ⁸⁾のデータを使用）

城・岩手・福島 の 3 県それぞれにおいて，半数以上の住民は揺れが収まった直後に避難を開始している．本分析において，地域全体の傾向は既往調査報告と類似しているが，地震発生時に店舗にいた住民の行動は特徴的なものであることがわかる．避難開始までの移動目的と移動場所を図-5 に示す．移動目的に注目すると，同図の目的1および2に該当する，家族・親戚・知人を気遣う行動が各場所で30%以上と多く，移動場所に注目すると，自宅・近所に移動する住民が各場所で30%以上と多いことがわかる．これは，図-2 から読み取れる，地震発生時に職場や店舗にいた住民の多くが自宅に戻り避難を開始するという推測と調和的である．

c) 避難以外の行動を行った住民の移動目的と移動先

続いて，避難以外の行動を行った住民の割合が多い場所（職場，店舗，屋外）に注目し，彼らが避難開始までにどのような目的で，どこに移動したのかを分析する．

ここで，家族・親戚・知人を気遣う行動に関する移動を開始した場所および，それらの住民が避難を開始した場所を図-6 に示す．図からは，家族等を気遣う移動を開始した場所が志津川地区の中心部に集中し，それらの住民が避難を開始した場所が地区全体に分布していることがわかる．したがって，当該地区では，家族等を気遣う行動のため，郊外の方へ向けた動きがあったことが推測できる．これは，図-3 から得られる，職場，店舗，屋外にいた住民は地区中心部に集中しており，自宅・近所にいた住民は対象地区の全体に広く分布していることと整合する．

避難開始までの行動に関して，サーベイリサーチセンターの調査¹⁰⁾によると，宮城県全体で18.4%，南三陸町で23.9%の住民が出先から自宅に戻っていたことがわかっている．また，宮城県を含む1道6県を対象としたウェザーニューズ調査結果¹²⁾では，避難したと推察される住民の2割ほどが家族や知人を迎えに行ったことが報告されている．これらの調査結果は，復興支援調査アーカイブ⁸⁾を用いた本分析結果と整合する．また，サーベイ

図-7 避難開始時の人数に注目した住民の分布 (復興支援調査アーカイブ⁸⁾ のデータを使用, 避難開始時に対象領域にいた人数を記載しているためプロットした人数はサンプルの総数 236 と異なる)

リサーチセンター¹⁰⁾が行った, 地震発生時の家族の居場所について, 宮城県全体では 62.7%, 南三陸町では 56.5%の回答者が自宅と回答している. これは, 本分析における, 職場・店舗から自宅に移動した住民が多く存在し, 家族を気遣う行動が多かったことと調和的である.

d) 避難開始時の人数

次に, 避難開始の人数について注目する. 復興支援調査アーカイブ⁸⁾では, 移動手段とともに 1 人での行動が複数人の行動が記載されている. 手段の中には「車 (自分で運転) », 「その他」という選択肢があるが, この選択肢では人数の単複がわからないため, 1 人, 複数とは別の項目で考える. それぞれの避難開始場所の分布を図-7 に示す. 図から, 1 人で避難を開始した住民は地区の中心部に集中しており, 複数人で避難した住民は地区全体に広く分布していることがわかる. これは, 上述の知見に照らし合わせて考えると, 自宅・近所にいた住民の多くが複数人で避難開始したことが推測され, 家族等と合流し, 複数人で避難を行う推測と整合する.

(4) 住民の時空間分布

a) メッシュごとの人数

はじめに, 対象地区における住民の分布の推移を図-8 に示す. 地震発生時 (図-8(a)), 住民は志津川地区中心部に比較的多くいるものの, 地区全体に分布している. 時間の経過とともに, 志津川地区の郊外, 特に標高が高い所に多く移動していることがわかる. 特に, 地震発生 61~80 分後における住民の分布に注目すると, 図-8(e)の濃い赤色で示される, 標高 30m 以上の志津川小学校や志津川高校に住民が多くいることがわかる. 一方で, 同図では中央下側に黄色で示される, 標高が低い地区中心部に住民が比較的多くいたこともわかる. このメッシュには, 4 階以上の高さを持つ高野会館や志津川病院がある. 当時, 当該建物にいた生存者の手記等をまとめた文献^{13), 14)}から, 高野会館には 300 人ほど, 志津川病院に 250 人ほどがそれぞれ建物の屋上や最上階にいたことが

わかっている.

b) 移動開始者の分布

次に, 移動開始者の分布の推移を図-9 に示す. 津波襲来までの移動を開始する住民の分布 (図-9(a), (b)) は, 図-8 に示した住民の分布と概ね一致している. 一方で, 津波襲来時の移動を開始する住民の分布 (図-9(c), (d)) は図-8 と少し異なる. このフェーズで移動を開始した住民がいるメッシュの多くが, 標高 10~20m ほどである. 当時, 当該メッシュから移動を開始した住民の体験談をまとめた文献¹⁵⁾によると, 「指定避難所の上の山都市緑地を目指しました. (中略) 誰かの『ここも危ない』という叫び声を合図に, さらに高台にある志津川保育所へ逃げました. 園庭にも濁流が迫ってきたので, みんなでやぶをかき分けて, 裏山伝いに志津川小まで逃げました. 」という証言がある. 復興支援調査アーカイブでは, 地震発生 41~80 分後に道路のない場所を志津川保育所付近から志津川小学校付近に移動する住民が複数おり, 証言に整合する.

(5) 地域で醸成される「逃げなければ」という雰囲気 に注目した考察

上述した分析結果から, 当該地区では時間の経過とともに, 郊外へと移動していく動きが見られた. これは津波避難を目的として標高が高い所に移動する住民に加え, 中心部から郊外へ, 家族・親戚・知人を迎えに行く, 自宅の様子を心配して帰宅する, あるいは逃げる意思があっても貴重品の持ち出しやペットの連れ出しのために戻る, という行動も含まれていると考えられる. これらの行動の多くが郊外への移動, つまり, より標高の高い所の近くへの移動であったため, 津波避難においては, 結果的に有利に働いたといえる. また, 住民の移動に伴い, 「逃げなければ」という雰囲気は時間の経過とともに, 志津川地区の中心部から郊外に向けて伝播していったことが推測できる. 図-1(a)より, 地区の郊外においては, 津波浸水予測エリアの外側に位置する場所が多い.

図-8 メッシュごとの住民の分布の時間変化 (復興支援調査アーカイブ®のデータを使用, (b)から(e)は1分ごとの時間平均しており, 図の左下の数字は, 対象領域にいた住民の合計人数を表す)

図-9 メッシュごとの移動開始人数 (復興支援調査アーカイブ®のデータを使用, 図の左下の数字は, 対象領域内で移動を開始した, 各フェーズの住民の合計人数を表す)

このため、当該地区では、津波浸水予測エリアの外側においても、住民の移動に伴う、「逃げなければ」という雰囲気伝播し、避難を開始しやすい状況に推移したと考えられる。

3. 避難者発生シミュレーションを用いた避難開始の実態分析

本章では、著者らが開発してきた避難者発生シミュレーション^{3,6,7)}を用いて、地域で醸成される「逃げなければ」という雰囲気の観点から、志津川地区の避難開始の特徴を時空間的に分析する。

(1) 手法

a) 避難者発生モデル

著者らはこれまで、住民が地域で醸成される「逃げなければ」という雰囲気を感じ避難を開始するという考え方に基づき、避難者発生モデルを開発してきた^{3,6,7)}。「逃げなければ」という雰囲気は、社会を構成する様々な人々や自然現象によって醸成され、住民一人ひとりの振る舞いも大きな役割を担っている。これは、専門家(行政など)が非専門家(住民など)に危険を知らせ、情報を受け取った非専門家は論理的な意思決定プロセスに基づき避難を開始するかどうかを判断するという従来の捉え方とは異なる。避難開始を個人レベルだけでなく、コミュニティレベルで捉えている点にも大きな違いがある。

著者らのこれまでの研究では、避難開始を避難開始前後の住民の一連の振る舞いに注目して定式化を行ってきた^{3,6,7)}。しかしながら、本モデルは上述の通り、避難開始を個人レベルだけでなく、コミュニティレベルで捉えている。そこで、避難開始前後の住民の一連の振る舞いとコミュニティにおける「逃げなければ」という雰囲気の醸成を明確に区別し、再度定式化を行った。具体的には、避難開始を、[1] 人々の行動や自然現象により「逃げなければ」という雰囲気(以下、避難開始リアリティ、Reality of Evacuation Start) RES が醸成される(式(1))、[2] 住民は周囲の避難開始リアリティ RES を感じ危機感(Awareness Level of Danger) ALD を高める(式(2))、[3] 危機感 ALD が上限(以下、閾値) θ を超えると避難を開始し避難開始リアリティ RES を醸成する一因(以下、ソース)となる(式(3))ことで表現している。

$$RES(x, y, t) = CB(n(x, y, t)) \sum_{i_s=1}^{n_s} (R_{i_s}(x, y, t) X_{i_s}(t) W_{i_s}(t)) \quad (1)$$

$$ALD_{i_p}(t) = \min \left\{ \theta_{i_p}, \int_{c_{i_p}} RES(x, y, t) ds \right\} \quad (2)$$

$$X_{i_p}(t) = \begin{cases} 0, & ALD_{i_p}(t) < \theta_{i_p} \\ 1, & ALD_{i_p}(t) \geq \theta_{i_p} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $RES(x, y, t)$ は時刻 t において座標 (x, y) で醸成される避難開始リアリティ、 $CB(n(x, y, t))$ は時刻 t において座標 (x, y) で避難開始リアリティ $RES(x, y, t)$ を醸成するソースの数 $n(x, y, t)$ に依存する集団同調性バイアス(Conformity Bias, Milgramら¹⁰⁾による観測値を用いて式(4)で定義)である。

$$CB(n(x, y, t)) = 1 + \frac{45.09}{45.68} \ln(n(x, y, t)) \quad (4)$$

n_s はソースとしてのポテンシャルを持つ因子の総数、 $R_{i_s}(x, y, t)$ は時刻 t において座標 (x, y) とソース i_s の位置関係を表す関数(式(5)で定義)である。

$$R_{i_s}(x, y, t) = \begin{cases} 0, & i_s(x, y, t) \text{ の影響範囲外} \\ 1, & i_s(x, y, t) \text{ の影響範囲内} \end{cases} \quad (5)$$

$X_{i_s}(t)$ は時刻 t におけるソース i_s のオン・オフを表す関数(式(6)で定義)である。

$$X_{i_s}(t) = \begin{cases} 0, & i_s(t) \text{ がソースとして機能していない(オフ)} \\ 1, & i_s(t) \text{ がソースとして機能している(オン)} \end{cases} \quad (6)$$

$W_{i_s}(t)$ は時刻 t におけるソース i_s の影響度(以下、重み)、 $ALD_{i_p}(t)$ は時刻 t における住民 i_p の危機感、 c_{i_p} は住民 i_p が避難開始までに通過する経路、 θ_{i_p} は住民 i_p の閾値であり、住民ごとにランダムに与えられる0~1の一樣乱数 r_{i_p} の逆数と定数 C の積で表現される(式(7)で定義)。 C は地域ごとの避難開始のしやすさを表し、本研究では $C = 1$ とする。

$$\theta_{i_p} = C/r_{i_p} \quad (7)$$

また、ソースの重みは、住民の避難開始に及ぼす影響力の大きさを表す、ソースごとの固有の数値として定義され、社会調査のデータを用いて図-10に示す手順で算定する。算出された重みは、対象とする津波災害におけるソースの影響度を表すパラメータとして、他の地域を対象とした津波避難の分析での活用が可能となる。

b) 避難行動モデル

本モデルは、清野らが開発した個別要素法(DEM)¹⁷⁾に基づく手法を用いた。本モデルの主たる特徴は、住民を円柱要素でモデル化し、住民間の物理的距離および心理的距離をバネとダッシュポットを用いることで表現できること、また、各要素に働く外力に対して運動方程式

図-10 ソースの重みの算定フロー

を解くことで、それぞれの挙動を表現できることである。障害物回避やすれ違い、追い越しといった基本的な人間行動を再現でき、屋内等の比較的狭い空間での避難行動分析に適した手法であるが、本事例のような屋外の広域における避難行動シミュレーションにも適用できる。詳しくは、清野らの研究¹⁷⁾を参照されたい。

(2) パラメータ

対象地域は、図-1(b)に示す領域でモデル化した。対象とする住民は5,351名で、国土地理院の基盤地図情報に基づき発災前の住宅に該当する場所に配置した。また、南三陸町で揺れの直後に避難をした住民の割合を13.0%とする調査報告¹⁰⁾および中央防災会議の調査報告¹⁸⁾を用いて本研究で使用するソースを表-1のように設定した。避難行動モデルで用いるパラメータを表-2、表-3に示す。

なお、住民は健常者を仮定し、避難を開始した住民全員が呼びかけを行い、かつ避難を開始していない住民全員が避難行動者を目撃できると仮定するとともに、最も近い避難場所に徒歩で向かうこととした。実際には、呼びかけを行わない避難行動者がいることや、屋内にいる住民は屋外の避難行動者を必ずしも目撃できないことが考えられる。本研究における仮定は、住民間の相互影響が十分になされ、避難開始において有利な状況であるといえる。また、東日本大震災の発災1か月前にあたる2011年2月末時点で、南三陸町における障がい者は全体の5.3%、高齢化率は29.3%であった²⁾ことを踏まえると、住民全員を健常者とした本研究における仮定は、避難行動において有利な状況であるといえる。また、復興支援調査アーカイブによると、南三陸町では45%の人が自動車を用いて避難している。なお、避難のきっかけに関する割合を記載した社会調査において、回答割合が多い項目の中に車避難による影響は見られない。そのため、本研究では、車避難が他者の避難開始に与える影響は小さいと考え、その影響を無視している。

表-1 ソースの特性

	地震の揺れ	大津波警報	行政の呼びかけ	住民の呼びかけ	避難者の目撃
重み	7.10×10^3	7.12×10^3	5.26×10^3	5.25×10^3	3.01×10^3
時間特性 (影響時間)	地震発生から10秒まで	地震発生から180秒後以降 ^{**}	地震発生から180秒後以降 ^{**}	地震発生から10秒後以降 [*]	地震発生から10秒後以降 [*]
空間特性 (影響範囲/位置)	—	—	—	影響半径30m / 避難者の位置	影響半径110m / 避難者の位置
空間特性 (カテゴリー)	全解析領域型	全解析領域型	全解析領域型	動く円形型	動く円形型
数	1	1	1	最大5351	最大5351
備考	—	受け取らない住民の割合13.0% ^{***}	受け取らない住民の割合23.9% ^{***}	—	—

*石巻市で震度4に相当する揺れが継続していた時間⁹⁾。揺れている間は動けないと仮定。

**地震発生から180秒後に津波警報が発令された²⁾

***南三陸町で大津波警報を受け取った人びとの割合87%、行政の呼びかけを聞いた人の割合76.1%¹⁾

表-2 移動速度に関するパラメータ²⁾

平均(m/s)	標準偏差(m/s)	最小値(m/s)	最大値(m/s)
1.21	0.30	0.67	2.40

表-3 避難者相互作用に関するパラメータ¹⁷⁾

個体要素半径(m)	2.59×10^1	個体要素減衰定数(N・s/m)	(法線方向) 1.35×10^3
個体要素仮想半径(m)	7.17×10^1		(接線方向) 3.02×10^2
単位高さ当たりの質量(N/m)	3.54×10^2	個体要素仮想バネ定数(N/m)	(法線方向) 6.62×10
個体推進加速度(m/s ²)	8.61×10^1		(接線方向) 3.31
個体要素バネ定数(N/m)	(法線方向) 1.26×10^4	個体要素仮想減衰定数(N・s/m)	(法線方向) 9.79×10
	(接線方向) 6.30×10^2		(接線方向) 2.19×10

図-11 避難開始および移動開始のタイミング

図-12 「逃げなければ」という雰囲気醸成度（避難者発生シミュレーション）と移動開始者の時空間分布（復興支援調査アーカイブ⁸⁾）の比較

(3) 解析結果・考察

a) 避難開始と移動開始のタイミング

図-11 は、避難者発生シミュレーションで得られた避難開始のタイミングと、復興支援調査アーカイブを用いて分析した避難開始および移動開始のタイミングを比較したものである。図より、シミュレーション結果と復興支援調査アーカイブによる実態が大きく異なっていることがわかる。シミュレーションの結果、99%の住民が地震発生 20 分後以内に避難を開始した。一方で、復興支援調査アーカイブによると、同じタイミングで移動を開始したのが 77%、そのうちの 49%が避難のためであった。シミュレーション結果は、対象地区の犠牲者率 3.5%~5.3%⁷⁾および南三陸町における揺れ開始直後の避難開始率 13.0%¹⁰⁾を再現できる場合の値であるが、復興支援調査アーカイブで得られた避難開始および移動開始のタイミングとは大きく異なっている。この差が生じる原因の 1 つとして危機感の閾値と避難開始に関する設定が挙げられる。本シミュレーションでは、危機感が閾値を超えるとすぐに避難行動を開始すると表現している。一方で、前節より、住民の 3 割ほどが避難以外の移動を避難行動よりも優先して行っている（図-4(a)）。この移動目的として、強い揺れのため自宅を心配することや家族等を気遣って移動したことが、復興支援調査アーカイブのデータなどから読み取ることができる。このような、自宅を

心配する、家族等の安否を確認する、家族等を迎えるに行く、地域の防災活動をするといった行動は、高い危機感ゆえに、避難よりも優先して行われた可能性がある。また、体が不自由であるため、危機感が高くとも、自ら移動できない住民も存在する。前述したように、発災 1 か月前の南三陸町における障がい者は全体の 5.3%、高齢化率は 29.3%であった²²⁾。以上を踏まえ、図-11 における地震発生 20 分以内に注目すると、シミュレーションにおける避難開始率（99%）と復興支援調査アーカイブにおける移動開始率（77%）の差 22%は、それぞれにおける避難開始率、移動開始率を同等と見なすことで、調和的であるといえる。

b) 「逃げなければ」という雰囲気醸成度と移動開始者の分布

次に、シミュレーションで得られた、「逃げなければ」という雰囲気醸成度の時空間分布と復興支援調査アーカイブ⁸⁾で得られた移動開始者の分布の推移を比較する（図-12）。シミュレーションにおいて、住民が避難行動を行う周囲では、危機感が醸成されやすく、避難開始しやすい状態となる。つまり、両図は対象とするものが異なる一方で、危機感の醸成度が高い場所と移動開始者が多く発生するメッシュを比較することで、シミュレーションと実態の比較となると考えることができる。地震発生直後のフェーズである、図-12(a), (d)では、空間分布

が似通っている。一方で、シミュレーションでは地震発生 20 分以降に避難を開始する住民が極めて少ないため、このフェーズにおける危機感の空間分布は、移動開始者の実態と異なっている。これを踏まえ、本シミュレーションでうまく再現できなかった地震発生 21~40 分のフェーズにおいて、避難開始に関するどのような状況が実際には生じていたのか、その実態を分析する。

c) 地震発生 21~40 分後における避難に関する状況

ここでは、復興支援調査アーカイブ⁸⁾を用いて、21~40 分のフェーズにおける住民の移動に注目する。分析の結果、地震発生 21~40 分後に初めて移動した住民のうち、84%が避難行動であった(地震発生後 20 分までは避難を目的とした移動は 64%)。対象フェーズにおける移動の多くが避難であったことがわかる。

また、対象フェーズに避難を開始した住民のきっかけについて、38%が「地震の揺れ」および「津波の接近」、20%が「津波警報」、13%が「家族・知人の勧め」と回答していた(複数回答可)。地震から 20 分以上が経過したにもかかわらず、避難のきっかけとして「地震の揺れ」と回答した住民が多い。この回答者の中には、地震発生直後に危険を感じて移動し、その後、当該フェーズで避難を開始したため、「地震の揺れ」を避難のきっかけとして回答した人が少なからずいると考えられる。この推測は、地震発生時に職場、店舗、屋外から、家族等を気遣う行動のため自宅に移動した住民が多く存在したことと調和的である。したがって、本フェーズでは、家族等と合流し、複数人で避難を行う状況が支配的であったことが推測される。

4. 結論

本研究では、復興支援調査アーカイブと避難者発生シミュレーションを用いて、東日本大震災時の南三陸町志津川地区における避難開始の実態を時空間的に明らかにした。得られた主要な結論を以下に記す。

- 1) 対象地域では、地震発生時にいた場所の種類によって、地震発生後、最初の移動の目的が大きく異なる傾向にあった。自宅・近所にいた住民の86%、屋外にいた62%が他の場所へ移動することなく、避難を行っていた。一方で、職場にいた住民の47%、店舗にいた67%は避難以外の行動をとっていた。その大部分は家族・親戚・知人を気遣う行動であり、自宅に戻った後、避難を開始していた。
- 2) 時間の経過とともに、住民の多くが郊外へと移動していた。これは津波避難を目的として、標高が高い所に移動する住民に加え、中心部から郊外へ、家族・親戚・知人を迎えに行く行動も含まれていると

考えられる。家族等を迎えに行く移動は、標高の高い場所に近い、郊外への移動であったため、津波避難において、結果的に有利に働いたといえる。

- 3) 対象地域では、上記の移動に伴い、志津川地区の中心部から郊外に向けて、「逃げなければ」という雰囲気や伝播していったことが推測できる。そのため、津波浸水予測エリアの外側においても、周囲の雰囲気に触れることで、避難を開始しやすい状況に推移したと考えられる。
- 4) 避難者発生シミュレーションは、危機感が閾値に達することで避難を開始すると仮定している。一方で、復興支援調査アーカイブのデータにおいて、避難開始前後の住民の行動に着目すると、家族を気遣うなどの避難以外の行動も多くみられた。家族などによる直接的な働きかけは、避難者発生シミュレーションが着目する「逃げなければ」という雰囲気による影響とは異なり、避難開始を考えるうえで重要な行動であるといえる。
- 5) 以上を踏まえ、避難者発生シミュレーションなどの数値解析によって避難開始の特徴を時空間的に分析する場合、以下を考慮する必要があるといえる。
  - [1] 地震発生時にいた場所ごとの割合はそれぞれどれほどであるのか。
  - [2] 危機感を高め直観的に行動した人々のうち、避難開始者の割合はどれほどであるのか。
  - [3] 家族等の直接的な働きかけによって避難を開始した人の割合はどれほどであるのか。

謝辞：本研究の一部は、JSPS 特別研究員奨励費(16J10657)による支援を受けて行った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 三上卓：東日本大震災の津波犠牲者に関する調査分析～山田町・石巻市～，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.70, No.4, pp.908-915, 2014.
- 2) 野地貴範：被災地は今。復興が進み、にぎわいが戻る 茨城県大洗町・笠間市，ジャフメイト 2014 年 3 月号，(株)JAF MATE 社，p.29, 2014.
- 3) 土肥裕史，奥村与志弘，小山真紀，湯浅亮，清野純史：コミュニティにおける津波避難初期過程のシミュレーションモデルの開発，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.70, No.2, pp.I_1356- I_1360, 2014.
- 4) 高橋邦典：「あの日」のこと 東日本大震災 2011・3・11，ポプラ社，2011.
- 5) 矢守克也：防災人間科学，東京大学出版会，2009.
- 6) 土肥裕史，奥村与志弘，小山真紀，清野純史：2011 年東北地方太平洋沖地震津波における避難者発生シミュレーション～石巻市門脇地区を対象として～，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.71,

- No. 4(地震工学論文集第 34 巻), pp.I_823-I_831, 2015.
- 7) 奥村与志弘, 小川夢斗, 土肥裕史, 清野純史: 津波避難者発生シミュレーションを用いた津波災害時における住民の危機感の高まりやすさの地域差分析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.72, No.2, pp.I_1603-I_1608, 2016.
  - 8) 国土交通省住宅局・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/>, 2016 年 1 月参照.
  - 9) 宮城県: 旧志津川町の津波ハザードマップ, <http://www.pref.miyagi.jp/soshiki/kasen/ki-hm-sizugawa-tsunami.html>, 2016 年 9 月参照.
  - 10) サーベイリサーチセンター: 宮城県沿岸部における被災地アンケート, http://www.surece.co.jp/src/research/area/pdf/20110311_miyagi.pdf, 2016 年 1 月参照.
  - 11) 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: 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, <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousaikai/tohokukyokun/7/pdf/1.pdf>, 2016 年 1 月参照.
  - 12) ウェザーニューズ: 東日本大震災 津波調査(調査結果), http://weathernews.com/ja/nc/press/2011/pdf/20110908_1.pdf, 2016 年 1 月参照.
  - 13) 中日新聞社会部: 備える! 3・11 から, 中日新聞社, 2012.
  - 14) 菅野武: 寄り添い支える 公立志津川病院 若き内科医の 3・11, 河北新報出版センター, 2011.
  - 15) 河北新報社: 私が見た大津波, 岩倉書店, 2013.
  - 16) Milgram, S., Bickman, L. and Berkowitz, L.: Note on the drawing power of crowds of different size, *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol.13, pp.79-82, 1969.
  - 17) 清野純史, 三浦房紀, 瀧本浩一, 中島庸一: 個別要素法を用いた群衆行動シミュレーション, 地域安全学会論文集, Vol.4, pp.322-327, 1994.
  - 18) 中央防災会議 防災対策推進検討会議 津波避難対策検討ワーキンググループ: 東日本大震災時の地震・津波避難に関する住民アンケート調査[主な調査結果], http://www.bousai.go.jp/jishin/tsunami/hinan/pdf/20121221_chousai_1.pdf, 2016 年 1 月参照.
  - 19) 気象庁: 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震時に震度計で観測した各地の揺れの状況について, <http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/25a/201103251030.html>, 2016 年 1 月参照.
  - 20) 南三陸町: 東日本大震災による被害の状況について, <https://www.town.minamisanriku.miyagi.jp/index.cfm/17,181,21.html>, 2016 年 1 月参照.
  - 21) 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, 鹿島出版社, 1977.
  - 22) 内閣府 障がい者制度改革推進会議: 第 37 回障がい者制度改革推進会議議事次第 参考資料 2, http://www8.cao.go.jp/shougai/suishin/kaikaku/s_kaigi/k_37/pdf/re-f2-2.pdf, 2016 年 9 月参照.

(2016. 11. 7 受付, 2017. 1. 30 修正, 2017. 2. 18 受理)

SPATIO-TEMPORAL ANALYSIS OF THE START OF TSUNAMI EVACUATION IN THE 2011 TOHOKU TSUNAMI IN SHIDUGAWA, MINAMISANRIKU

Yuji DOHI, Yoshihiro OKUMURA and Junji KIYONO

Many people could/did not evacuate from the 2011 Tohoku Tsunami. Solving problems of the evacuation start is very important to mitigate human losses due to tsunami disasters. In the present paper, we have been developing the evacuee generation simulation based on the viewpoint in which various agents in our society play an important role in the start of tsunami evacuation. In this research, using "Digital Archiving of the Great East Japan Earthquake Survey" and "Evacuee Generation Model", we analyzed the start of tsunami evacuation in the 2011 Tohoku tsunami in Shidugawa, Minamisanriku. The results revealed that (1) many residents in their offices or stores headed evacuation sites after they went back home, (2) most residents move outwardly from the center of the town, and (3) residents in the suburbs of the town could start evacuation easily because of the reality of imminent emergency which prompts the need for evacuation constructed by many residents.