想定を超える津波からの避難の特徴と対策 －宮城県志津川地区の事例分析－

Evacuation Behavior from Unexpected Huge Tsunami : a Case Study of the 2011 Tohoku Tsunami in Sizugawa

奥村与志弘¹・中道尚宏²・清野純史³

Yoshihiro OKUMURA, Naohiro NAKAMICHI and Junji KIYONO

The 2011 Tohoku tsunami was 2 to 3 times higher than the existed expectations. Many people were unexpectedly attacked by this devastating tsunami. In this study, the authors focused on an elderly care facility in Minami-sanriku town, Miyagi Pref., Japan, which was located outside the expected inundation zone. 41 users per 69 were killed by this unexpected tsunami. This study finds out the reasons why 28 users could evacuate, using an evacuation simulation, interviews, and a tsunami simulation. As a result, it was clarified that the unexpected huge tsunami shortened the usable time for evacuation because of the drastically delayed start time of evacuation. Quickly wide-spreading sense of crisis, assembly places after shaking, and so on should be considered for a safer society, able to cope with unexpected large tsunami events.

1. 緒 論

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴い発生した巨大津波（以下、2011年東北津波）は、浸水が想定されていなかった地域にまで津波が到達したために不意を突かれる形で被害が拡大した。政府による南海トラフ沿いの巨大地震に関する新想定は、二度と想定外の災害を繰り返さないために、極めて低頻度で巨大な外力想定を新たに用意し、そうした規模の津波に対しても避難の意識を持たせることを狙っている。一方で、想定を超える規模の津波に遭遇しても柔軟に避難できるように、その柔軟性を高める地域づくりを推進していくことも重要である。

そこで本研究では、「想定を超える津波からの避難」の特徴を明らかにし、さらに避難の観点から津波の規模に対して高い柔軟性をもった地域づくりを実現するため

の方策を提案することを目的に、2011年東北津波において、想定になかった津波到達という事態に直面しながらも関係者の約6割が助かった宮城県南三陸町志津川地区にある高齢者施設（以下、高齢者施設A）（図-1）の職員と利用者の避難行動に注目して分析する。具体的には、まず当時の様子を撮影したビデオ映像と津波の再現計算から彼らを襲った津波の特徴を明らかにする。次に、施設職員への聞き取り調査を実施し、発災後の関係者の行動の時系列を整理し、得られた断片情報に基づき避難行動の再現計算を実施することで、本事例における「想定を超える津波からの避難」の全体像を明らかにする。さらに、パラメータスタディによる対策効果の評価を実施し、津波の規模に対して柔軟性の高い津波避難対策を検討する。

2. 手 法

(1) 対象施設の特徴

本研究で注目する高齢者施設Aは、標高12～13m程度の比較的高所にある。最大津波高が6.7mとされていた想定津波の浸水予測エリアの外側にあったため、津波発生時の避難場所にも指定されていた（宮城県、2012）。図-1

図-1 高齢者施設Aの位置関係

図-2 高齢者施設Aの周辺環境と施設建物内の聞き取り

1 正会員 博(情報) 京都大学大学院助教 工学研究科
2 関西テレビ放送株式会社
3 正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科

に示すように、鉄道盛土を挟んで海岸から約1km離れており、また南西に70段の階段を上げれば標高約30mの高台には高校Bがある。

図-2は、施設Aの敷地及び建物内の空間的な特徴を図示している。トータルステーションを使った現地での測量の結果と同施設の職員から提供を受けた建物の平面図を基にして作成した。建物の南側面にある3つの引戸からは隣接する公園に出ることができる。また、東側にある駐車場からは中心市街地を一望できる。建物内のA、B、C、D、Eの空間は、グループ毎に使用されていた利用者用の共有スペースで、余震に伴う落下物による怪我の心配がいらないとして津波到達までの間、Aを除くスペースは関係者の待機場所となった。

(2) 津波の再現手法

志津川地区を氾濫する2011年東北津波の特徴を明らかにするため、津波数値計算と当時の様子を撮影した映像の分析を行った。

a) 津波数値計算

計算は、非線形長波理論をstaggered・leap-frogスキームで解いた。地形、堤防、粗度の各データは、中央防災会議資料によるデータを使用した。空間格子間隔は、1350m、450m、150m、50mの4段階の領域を接続し、計算時間間隔は0.6秒、計算時間は6時間とした。志津川地区の市街地を縦断している鉄道盛土は、測量で高さを調べたところ約3mであったため、計算の中では3mの堤防とみなした。また、2011年東北津波の波源モデルには、東北大モデルver.2（今村ら、2012）を用いた。

b) 映像分析

2011年東北津波は日中に発生したため、市街地を氾濫する津波の映像が地域住民や報道関係者により多数記録された。そうした映像を基に目視で把握できる範囲で時々刻々と変化する津波到達ラインを抽出した。

(3) 避難の再現手法

2011年東北津波で、想定になかった津波到達という事態に直面した高齢者施設Aにおける「想定を超える津波からの避難」の特徴を明らかにするため、聞き取り調査と避難数値計算を行った。

a) 聞き取り調査

聞き取り調査は、南三陸町内にある同施設の仮設事務所で、60歳、30歳、28歳の男性職員と51歳の女性職員に対して実施した。彼らは皆、地震発生時は勤務中で施設にいた。調査の実施が地震から1年6ヶ月後の2012年9月13日であったため、4名の記憶を照らし合わせることで可能な限り記憶の曖昧さを排除した。

b) 避難数値計算

計算は、清野ら（1994）によって開発された個別要素法（DEM）に基づく避難数値計算モデルを用いた。この

図-3 DEMによる人間のモデル化（清野ら、1994）

表-1 避難数値計算に使用するパラメータの諸元

要素半径 (m)	0.259
仮想半径 (m)	0.717
個体要素の単位高さあたりの質量 (N/m)	0.354×10^3
個体推進加速度 (m/s^2)	0.861
要素バネ定数 (法線方向) (N/m)	1.26×10^4
要素バネ定数 (接線方向) (N/m)	0.630×10^3
要素減衰定数 (法線方向) ($\text{N} \cdot \text{s/m}$)	1.35×10^3
要素減衰定数 (接線方向) ($\text{N} \cdot \text{s/m}$)	0.302×10^3
要素仮想バネ定数 (法線方向) (N/m)	0.662×10^2
要素仮想バネ定数 (接線方向) (N/m)	0.331×10
要素仮想減衰定数 (法線方向) ($\text{N} \cdot \text{s/m}$)	0.979×10^2
要素仮想減衰定数 (接線方向) ($\text{N} \cdot \text{s/m}$)	0.219×10^2

表-2 移動速度の平均、標準偏差、最小値、最大値（岡田ら、1977）

平均 (m/s)	標準偏差	最小値 (m/s)	最大値 (m/s)
1.21	0.3	0.67	2.4

モデルは、人間が障害物を滑らかに回避したり、他の人間とすれ違ったり、前方の人間を追い越したりする基本的な人間行動を再現でき、比較的狭い空間での避難を検討する本研究において有効である。

人間は円柱要素としてモデル化し、要素間の心理的距離の効果を表すため図-3に示すような要素半径とは別に要素仮想半径が導入されている。各要素には、要素が他の個体や壁から影響を受けずに目標点に向かおうとする個体推進力、接触する他の個体要素から受ける抗力、接触する壁などの境界から受ける抗力、コーナーを曲がる際に働く遠心力に対する抗力が作用する。これらの外力に対して運動方程式を解くことで、各要素の移動が求められる。計算に使用する力学的なパラメータは表-1の通りで、清野らの一連の研究（清野ら、1994；清野ら、1995；八木ら、1995）に従って設定した。計算時間間隔は0.1秒とした。

各要素の移動速度には個人特性を考慮した。職員の移動速度には、群衆歩行を観察した過去の調査結果（岡田

図-4 志津川を氾濫する2011年津波のスナップショット

図-5 映像から判別した津波到達ラインの時間変化

ら, 1977) を参考に表-2 に示す平均, 分散および最小値, 最大値を用いて正規乱数により求めた。2011 年東北津波来襲時の彼らの避難が徒歩だけであった可能性は低い, 文部科学省 (2011) によると, 持久走における 20 歳から 64 歳までの男女の平均移動速度が 1.97 (m/s) であることから概ね妥当な設定であると判断した。

(4) 津波規模に対して柔軟性の高い避難対策の検討

津波の規模に対して柔軟性の高い避難対策を検討するため, 本研究により明らかになった「想定を超える津波からの避難」の特徴を踏まえて, パラメータスタディによる避難数値計算を実施した。

3. 高齢者施設 A に来襲した 2011 年東北津波の特徴

図-4 は数値計算によって得られた志津川を氾濫する津波のスナップショットである。計算では, 津波は地震発生から 45 分後に海岸堤防を越え始め沿岸付近を襲い, その 2 分後に鉄道盛土を超え, さらにその 2 分後には高齢者施設 A にまで到達している。一方で, 図-5 は志津川を氾濫する津波の映像 (TBC 東北放送, 2011) から, 時々刻々と変化する津波の到達ラインを目視で判別して抽出したものである。図中の時間は, 用いた映像に振られていたものである。映像では, 沿岸付近に砂煙が確認されたから 2 分後に津波は盛土を越え始め, さらにその 2 分後には高齢者施設 A 付近にまで達している。

これらの結果を津波到達ラインで比較すると, 河川付近を氾濫する津波の様子を除き, 両者は概ね一致している。河川付近の不一致は, 本研究では河川を水域としてモデル化していないために生じていると考えられる。

また本研究では, 鉄道盛土のない場合の氾濫計算も実施し, 氾濫する津波に対する鉄道盛土の影響を評価した。その結果, この鉄道盛土が同地区を氾濫する津波に及ぼす影響はほぼなく, 高齢者施設 A への津波の到達時間や

高さはほぼ同じであった。その原因としては, 2011 年東北津波が鉄道盛土の高さに対して非常に高かった上に, 海岸堤防と盛土の間の容量に対して市街地に流入した海水のボリュームが非常に大きかったためと考えられる。2011 年東北津波以後, 志津川の鉄道盛土のような市街地にある線形構造物を念頭に, 海岸構造物との津波多重防御の有効性が注目されているが, その効果はある程度までの外力に対しては有効であっても, 規模が大きくなり過ぎるとほとんど効果が期待できなくなると考えられる。

4. 高齢者施設 A における「想定を超える津波からの避難」の特徴

表-3 は聞き取り調査によって得られた証言の要約である。避難場所に指定されていた施設からさらに高所を目指すことの困難さを示唆する証言が得られた。「電柱が倒れる様子や砂煙が舞う様子からは一步を踏み出せなかった (30 歳男性職員)」ものの, 「JR の盛土を越えて自分たちの方へ迫ってくる津波を目撃 (60 歳男性職員)」したり, 「スーパーマーケットの看板が水平方向に動く様子に異変を感じる (51 歳女性職員)」などして, ようやく避難を開始できたとある。ちなみに, このスーパーマーケットは鉄道盛土沿いの海側で市街地の中央を流れる河川の西側にあった。浸水予測エリア内にいれば大きな危機感をもたらすような現象も, 指定避難場所にいたために, その情報の作用力は大きく低下してしまっていたと考えられる。これは「想定を超える津波からの避難」では, 避難開始のトリガーとなりうる現象の影響力が低下し, 避難に使える時間が短くなることを示唆している。2011 年東北津波の再現と映像分析の結果から, 本事例で避難に使えた時間は 160 秒程度であったと推察される。

図-6 は, 高齢者施設 A における避難の再現計算の結果である。数値計算では, 図-2 の実際の地図を単純化した。職員は赤のドットで表し, 利用者は人数のみを共有スペース毎に右側に記している。また, 駐車場付近にいた職員の避難開始を 0 秒とする。本事例の計算では, 実現象をうまく再現できるように 2 つの工夫を加えた。

1 つ目は, 避難開始のタイミングに関する工夫である。関係者の避難は, 一部の職員から始まり, その職員らの呼びかけによって次第に他の職員へ拡大していった。そこで数値計算における個体要素の避難開始は, 最初に避難を開始した施設外にいた職員は, 計算の開始を避難の開始とし, 施設内にいた職員は先に避難を開始した職員の接近を受けて避難を開始させた。

2 つ目は, 施設利用者の移動に関する工夫である。施設利用者の移動に関しては, 例外なく職員の補助が必要であったという事実と「偶然目のあった利用者の手を引き」逃げたという証言を踏まえ, 数値計算の中では, 職

表-3 当時の関係者の行動に関する情報

【全体的な情報】地震当日は、職員30人、利用者69人が施設にいた。利用者は自力で移動できない。本震の後、一度皆、公園に避難したが、非常に寒かったため、再び屋内に戻った。いつでも外に逃げられるように、戸を開けた状態でスペースB、C、D、Eに分かれて待機。利用者数はそれぞれ15人、15人、17人、22人。建物の外側の駐車場のあたりには避難してきた近隣の住民がいた。

【男性職員（60）の行動】利用者を屋内に戻した後、駐車場から他の2人の職員と津波の様子を見ていた。津波がJR盛土を越えてくる様子を目撃して危機を感じ避難を開始。3人は散り散りに屋内の人に避難を促しながら高台を目指した。スペースDで偶然目のあった利用者の手を引き屋外に出た。その利用者は歩行速度が極めて遅く移動に補助が必要だった。一度高校を目指したが、既に階段下まで津波が迫っていたため、山側の道へ引き返した。しかし、そこも津波が迫っていたため、数日前に登っていた裏山の斜面を咄嗟に登った。

【男性職員（30）の行動】利用者を屋内に戻した後、スペースBの外から市街地の様子を見ていた。JR盛土の向こう側で、電柱が倒れ、砂煙があがるのが見えた。しかし、それは地震によるものだと感じており、まだここまで津波が来るとは想像できなかった。津波が盛土を越え始めたときに周辺の職員とともに「ここにいても大丈夫か」迷い始めた。そのとき、別の職員に促され避難を開始した。スペースBにいた車いすの利用者を二人がかりで高校の階段のふもとまで連れていった。階段横スロープの土の道で車いすのタイヤがとられたため、車いすを捨て、利用者を抱えて駆け上がった。第一波が引いた後、他の利用者の救助に戻った。

【女性職員（51）の行動】海岸近くの自分の家が心配で、駐車場から様子を見ていた。スーパーマーケットの看板が横に動く様子を目撃し、異変を感じ、避難を開始した。施設の外側からスペースBに向かい、ゆっくりしか歩けない利用者を転ばせないように注意しながら避難した。第一波が引いた後、消防団の人に戻るなと言われたが、救助を求める利用者の声が聞こえ、救助に戻った。

【男性職員（28）の行動】スペースCで利用者の面倒を見ながら、上司の指示を待っていたところ、別の職員の「逃げろ」という声を聞き、避難を始めた。避難の妨げになりそうなベッドに寝た切りの利用者がいたので、他の職員とベッドごと押して高校への階段下まで運んだ。その後、他の利用者を救助するために建物に戻ったが、そこで津波に飲まれ、足を負傷した。第一波目が引いたあと、自力で高校への階段から高台を目指した。

【その他職員と利用者】第一波に飲まれずに津波から逃れられたのは職員10人ほどと、その職員とともに避難した利用者数人だった。スペースEにいた職員と利用者は外の様子が伝わりにくく、動けなかった。第一波に飲まれた後も生存していた職員、利用者がおり、階段下まで利用者を連れていくと、高校生たちがそこから高校まで運んでくれた。結果的に、職員29人と利用者28人が助かった。

員は利用者に接近した際に必ずその利用者をピックアップすることとし、利用者はそれによってのみ移動できるとした。実際には1人で同時に2人の利用者を補助するという例も確認されているが、数値計算の中では職員1人あたりの補助対象は最大1人とした。利用者を補助しながらの移動速度は、単独で移動する場合の3分の1とした。各個体の避難経路は、経路を特定できた職員を除き、ランダムに選択されるようにしている。

再現計算におけるその他の留意事項としては、制約条件に用いた次の情報がある。すなわち、(1) 4名の職員の避難ルート（図-6中の赤の破線）、(2) 施設利用者69人の待機場所、職員30人の概ねの待機場所、(3) 避難の目標地点に関する情報である。

図-6に示すように、関係者の待機場所であったスペースB、C、D、Eのうち、Eにいた関係者は津波が施設に

図-6 避難の再現計算のスナップショット（上：避難を開始する前の待機態勢、下：避難開始から160秒後）

到達した時点においてもまったく動けていない。一方で、B、C、Dにいた関係者は職員の補助を受けられなかった利用者を除き、目的地付近にまで到達できており、9人の職員と補助を受けた4人の利用者が避難に成功する計算結果となった。聞き取り調査によると、津波の第一波が来襲するまでに高台に到達できた職員が10人弱だった。建物横の公園内のルートが簡略化されていたり、一旦避難を完了した職員が再度利用者を救出に向かうといった動きが再現できていないなど、用いた避難数値計算には実際に厳密に表現できていない部分も多々あるが、現状のレベルでも比較的良好一致を示していると言える。

本研究では、想定を大きく超える津波からの避難という過去にあまり例のない状況下での避難行動に注目し、その特徴を明らかにすることを目指している。そこで約6割の関係者が逃げ切ることができた要因を考察することで、その特徴を検討する。

本事例における「想定を超える津波からの避難」では、初期に行動を開始した職員による呼び掛けが比較的多くの関係者に伝わりやすい待機態勢であった。このことは、それが余震対策であったとはいえ、結果として多くの生存者を生んだ要因であったと言える。また、建物の出入り口まで遠回りしなくても、B、Dのスペースに設置されていた引戸から公園へ出ることができたこと、施設から高校へ向かう階段が整備されていたことも無視できない。聞き取り調査によると、こうした施設環境、周辺環境は、高齢者施設Aと高校Bの間の世代間交流が目的で整備されてきたものであった。しかし、結果として想定を超える津波に対する柔軟性をもたらしたと言える。

なお、計算結果は前述の通り良好な再現性を有しているが、第一波到達までに避難できた推定関係者数は13人であり、最終的に実際に助かった57人という数字との間には大きな隔りがある。その原因についても言及して

おく必要がある。聞き取り調査によると、第一波の津波の高さが建物の一階の天井にまでわずかに達しなかったために、第一波で溺死せず、第一波が引いた後、救助された関係者が少なかったという。こうした事実も生存者が関係者の約6割に達した大きな要因となっている。

5. 津波規模に対して柔軟性の高い避難対策の検討

前章で述べた関係者の約6割が助かった要因の多くは、津波規模に対して柔軟性の高い避難対策を検討する上で参考にできる。本章では、さらに危機感が伝わりにくかったスペースEにいた関係者をAに待機させた場合の対策効果を検討した。図-7は得られた結果である。待機場所をB-C-D-EからB-C-D-Aにすることの効果は、避難に使える時間によって大きな差があることが分かる。例えば、実際に避難に使えた160秒の場合には、避難に成功できる職員は1人増えるのみであったのに対し、220秒あれば8人も避難に成功できる職員数が増える。この60秒の差は、津波が鉄道盛土の海側を氾濫している段階で行動を起こせるかどうかで生み出せる時間スケールである。本章で検討したような待機体制に加え、この段階で「ここも危ないかもしれない」と認識できる方策を考えれば、それらを考慮しない場合に比べて2倍以上にあたる職員24人が避難に成功でき、津波規模に対して柔軟性を高めることができると言える。

6. 結 論

2011年東北津波において、想定になかった津波到達という事態に直面しながら関係者の約6割が助かった南三陸町志津川地区にある高齢者施設の関係者の避難行動を分析することで、「想定を超える津波からの避難」の特徴を明らかにし、避難の観点から津波の規模に対して高い柔軟性をもった地域づくりを実現するための方策を検討した。得られた主要な結論を以下に示す。

- (1) 指定避難場所にいた関係者には、浸水予測エリア内にいれば大きな危機感をもたらすような現象も、作用力の小さな情報として受け止められていた可能性が高い。「想定を超える津波からの避難」では、避難開始のトリガーとなりうる現象の影響力が低下し、避難時間が短くなる。本事例では160秒程度しか使えなかったと推察された。
- (2) 避難の再現計算では、第一波が到達するまでに職員30人中9人が避難に成功した。実際の10人弱という証言と概ね一致している。
- (3) 危機感の伝わりにくいEの関係者をAに変えて避難計算を実施し、さらに60秒避難時間を追加すると約2.7倍の職員が逃げ切れる結果となった。「想定を超える津波からの避難」では、わずかな時間の確保や

図-7 待機場所を変えることによる対策効果

待機態勢の違いが避難の成否を大きく左右する。少しでも避難を早く開始するために、建物の外で市街地の様子をみていた職員がいたことも重要である。

- (4) 想定では浸水しないとされていたエリアであるにも関わらず、公園や建物の引戸、高校に繋がる階段などの津波避難に有利に働いた条件が整えられていた。その原因は、福祉対策の結果であることが分かった。浸水予測エリア外での防災対策の優先順位は当然低くなるため、津波の規模に対して柔軟性の高い地域づくりを進めるためには、観光や介護福祉などの対策に避難対策効果の機能をいかに付与しているかが重要になってくると言える。

謝辞：本研究の一部は、京都大学防災研究所特別推進拠点研究費を受けて行った。

参 考 文 献

- 今村文彦・越村俊一・馬淵幸雄・大家隆行・岡田清宏 (2012)：東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施 東北大学モデル version1.2, http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/tohoku_2011/model/drcr_ver1.2.pdf.
- 岡田光正・吉田勝行・柏原士郎・辻 正矩 (1977)：建築と都市の人間工学，鹿島出版社，pp.16-23.
- 清野純史・三浦房紀・瀧本浩一・中島庸一 (1994)：個別要素法 (DEM) を用いた群集行動シミュレーション，地域安全学会論文報告集，pp.321-327.
- 清野純史・三浦房紀・末松美香 (1995)：DEMを用いた被災時の群衆挙動に関する研究，土木学会中国四国支部研究発表会講演演説概要集，pp.3-4.
- 国土地理院 (2011)：平成23年 (2011年) 東日本大震災2.5分1浸水範囲概況図 (宮城県版)，<http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku40017.html>.
- 宮城県 (2012)：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-tunami.html>.
- 文部科学省 (2011)：平成23年度体力・運動能力調査結果の概要及び報告書について，http://www.mext.go.jp/b_menu/toukei/chousa04/tairyoku/kekka/k_detail/1326589.htm.
- 八木宏晃・清野純史・三浦房紀 (1995)：すれ違いや追越を考慮に入れたDEMによる人間行動シミュレーション，地域安全学会論文報告集，pp.449-456.
- TBC 東北放送 (2011)：東日本大震災の記録～3.11宮城～[DVD]，竹書房。