

三陸地方における東北地方太平洋 沖地震による津波犠牲者率と素因 の関係

牛山 素行*・本間 基寛**・横幕 早季*・杉村 晃一***

Relationship between Primary Causes and Rate of Victim caused by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake in Sanriku District

Motoyuki USHIYAMA^{*}, Motohiro HONMA^{**},
Saki YOKOMAKU^{*} and Kouichi SUGIMURA^{***}

Abstract

We analyze relationship between primary causes and rate of victim based on data of the Great East Japan Earthquake. The address lists of 5485 victims were collected by five local government offices, and a victim rate for the population every 0.5km mesh was calculated. This victim rate and correlation with some primary causes were analyzed. The primary causes that a statistical significance was recognized were at tsunami inundation depth, tsunami arrival time, elevation, relief energy, population and predicted tsunami inundation area. The primary causes that a statistical significance was not recognized were distance from coast, the number of households more than the third floor, elderly person rate. In other words, the victim rate was high in low land apart from the hill, a populous city area and tsunami inundation forecast area. The measures in these areas are important to reduce casualty figure effectively.

キーワード：東日本大震災の津波，素因，四次メッシュ，犠牲者率

Key words：The Great East Japan Earthquake and tsunami disaster, primary causes, 0.5km mesh, victim rate

* 静岡大学防災総合センター
Center for Integrated Research and Education of Natural
hazards, Shizuoka University.

** 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University.

*** 静岡市役所
Shizuoka City Office.

本論文に対する討論は平成27年5月末日まで受け付ける。

1. はじめに

津波による人的被害、建物被害の規模は、外力としての津波波高などによって説明、推定されることが一般的である(越村ら, 2009など)。外力規模が被害規模を決める大きな要因であることは確かだが、災害は素因に誘因が作用して発生するとよく説明されるように(水谷, 2002), 外力(誘因)だけで被害規模が決まるものではなく、様々な要因(素因)の組み合わせの結果が被害規模となって現れる。東日本大震災は、高精度な地理情報が整備された現代日本で発生した災害であり、津波被害に関わる誘因、素因の関係を詳細に検討することが期待できる。東日本大震災に関わる津波犠牲者の特徴については、国土交通省(2011)、牛山・横幕(2012)などがあるが、犠牲者に関する基礎情報が入手しにくいこともあり、まだ十分解明されているとは言い難く、今後様々な角度からの検討が必要である。本研究では、平野の少ない三陸地方(リアス部)を対象として、東日本大震災時の死者・行方不明者(以下本稿では犠牲者と呼ぶ)の居住地情報を用い、犠牲者居住地の津波災害に関わる素因・誘因と、犠牲者の発生状況の関係について、その特徴を検討することを目的とする。

2. 調査手法

調査対象地は、三陸地方沿岸部で、津波による人的被害が特に多かった岩手県陸前高田市、大槌町、山田町、宮古市、宮城県気仙沼市の5市町である(図1)。東日本大震災に伴う市町村別の死者・行方不明者数(2012年1月現在の値)としては、陸前高田市は石巻市に次いで2番目に多い1852人、気仙沼市は3番目の1373人、大槌町は4番目の1307人である。浸水域の人口に対する犠牲者数の割合で見ると、陸前高田市は女川町(11.63%)に次いで2番目の11.13%、大槌町は3番目の10.97%である(牛山・横幕, 2012)。いずれも、大局的には平地が少なく、海岸に山地が迫った地形である点が共通している。国土交通省(2011)の津波被災現況調査などでは、石巻以南の「平野部」に対して、「リアス部」と呼ばれている

地域である。これら5市町を調査対象とした理由は、人的被害が多い地域であったこと、地形的特徴が共通していること、市町役場から資料提供に関わる協力が得られたことによる。

犠牲者に関する情報としては、各市町役場から提供を受けた犠牲者個別の住民登録上の住所(番地まで)、年齢、性別(一部市町では欠落)である。住所は緯度・経度に変換した。犠牲者の種類は市町によって若干異なり、以下のようになっている。おおむね、「関連死を除く死者・行方不明者」であり、5市町の合計は5485人である。

- ・陸前高田市: 認定死者を含み災害関連死を除く。2012年7月20日現在, 1723人。
- ・山田町: 死者, 認定死者, 関連死者。2012年5月14日現在, 771人。
- ・大槌町: 認定死者を含み災害関連死を除く。2012年5月21日現在, 1241人。
- ・宮古市: 認定死者を含み災害関連死を除く。

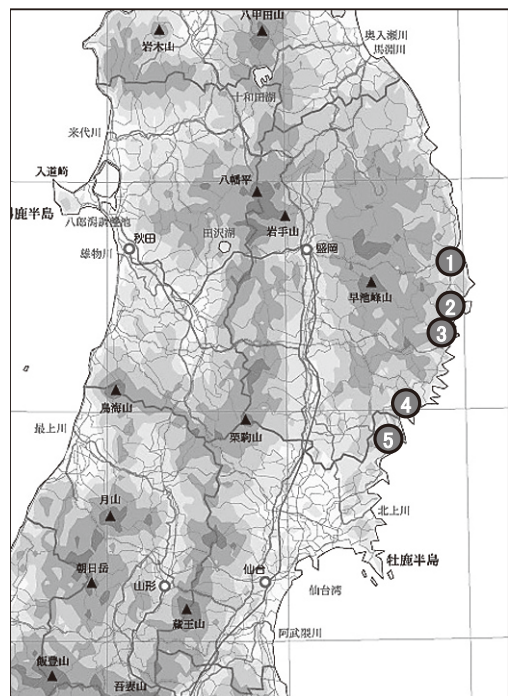


図1 調査対象地
①古市, ②山田町, ③大槌町, ④陸前高田市, ⑤気仙沼市

2012年7月9日現在, 517人。

- ・気仙沼市: 認定死者を含み災害関連死を除く。2012年7月17日現在, 1233人。
- ・津波浸水範囲の判別は, 国土地理院が2011年4月18日に公表した「浸水範囲概況図」および「浸水範囲の土地利用」を用いた(国土地理院, 2011)。「浸水範囲の土地利用」では, 100mメッシュ単位で浸水の有無が数値データとして得られる。犠牲者の集計は四次メッシュ(500mメッシュ)で行い, 四次メッシュの人口は2005年国勢調査を用いた。

津波の規模を表すデータとしては, 表1に示す解析条件で行った津波シミュレーションの結果を用いた。津波シミュレーション結果を使用するにあたっては, 各種の観測データとの比較を行い, 精度検証を行った。津波シミュレーションより得られた最大浸水深分布と国土地理院によって得られた浸水実績範囲(国土地理院, 2011)を比較したものを図2に示す。津波により犠牲者が分布する範囲においては, 概ね浸水範囲が一致する結果となっている。

東北地方太平洋沖地震津波の痕跡データ(東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ, 2012)と津波シミュレーションのデータを比較した散布図と精度指標を図3, 表2にそれぞれ示す。なお精度指標の幾何平均値Kと幾何標準偏差 κ は, 相田(1977)の定義によるものである。いずれの遡上領域でも相関係数はほぼ0.7以上であった。大

槌町では幾何平均値Kが1.131とシミュレーションにおいてやや過小評価, 宮古市, 陸前高田市, 気仙沼市で幾何平均値Kが0.85~0.92とやや過大評価の傾向がある。幾何標準偏差 κ はいずれの遡上領域でも1.45以下であり, 概ね精度良く再現されていると思われる。

津波到達時間の精度を検証するため, GPS波浪計での観測波形と津波シミュレーションの計算波形を比較したものを図4に示す。岩手中部沖(宮古市の沖), 岩手南部沖(山田町, 大槌町の沖), 宮城北部沖(陸前高田市, 気仙沼市の沖)のいずれにおいても第一波の波形は非常によく一致しており, 市街地への津波到達時間の精度は良いと言える。

また, 陸前高田市街地における津波遡上到達時間の詳細な検証のため, 牛山ら(2011)によってデジタルカメラのタイムスタンプデータから推定された津波到達時刻との比較を行った。その結果を図5に示す。図中の○は, タイムスタンプデータの計測地点, 数字はタイムスタンプデータより得られた津波到達時間を示す。なお, ○内の色はタイムスタンプデータより得られた津波到達時間を図右のキャプション(津波シミュレーション結果)と同一の配色で示している。全体的に整合性がとれており, 市街地における津波到達時間に関しては概ね2分以内の精度で再現されていると思われる。

以上の結果から, 本研究で使用する津波再現シ

表1 津波シミュレーションの解析条件

項目	設定
断層モデル	藤井・佐竹(2011)のVer.4.2
地盤変動量	Mansinha & Smylie(1971)の方法
支配方程式	非線形長波理論
差分スキーム	Staggered Leap-frog法(後藤・小川, 1982)
遡上解析範囲	図2のとおり
計算メッシュ	岩手県10m(一部20m, 40m), 宮城県10m(一部50m)。沖合の波源域から市街地周辺までをネスティング方式で接続。
構造物条件 (海岸・河川堤防)	「構造物あり」と設定し, 津波越流(線流量0.05m ² /s以上)により構造物が破損すると仮定
粗度係数	土地利用条件に応じて設定
潮位条件	T.P.+0.0m
計算時間間隔	最小 $\Delta t=0.5$ 秒
計算対象時間	津波発生後6時間

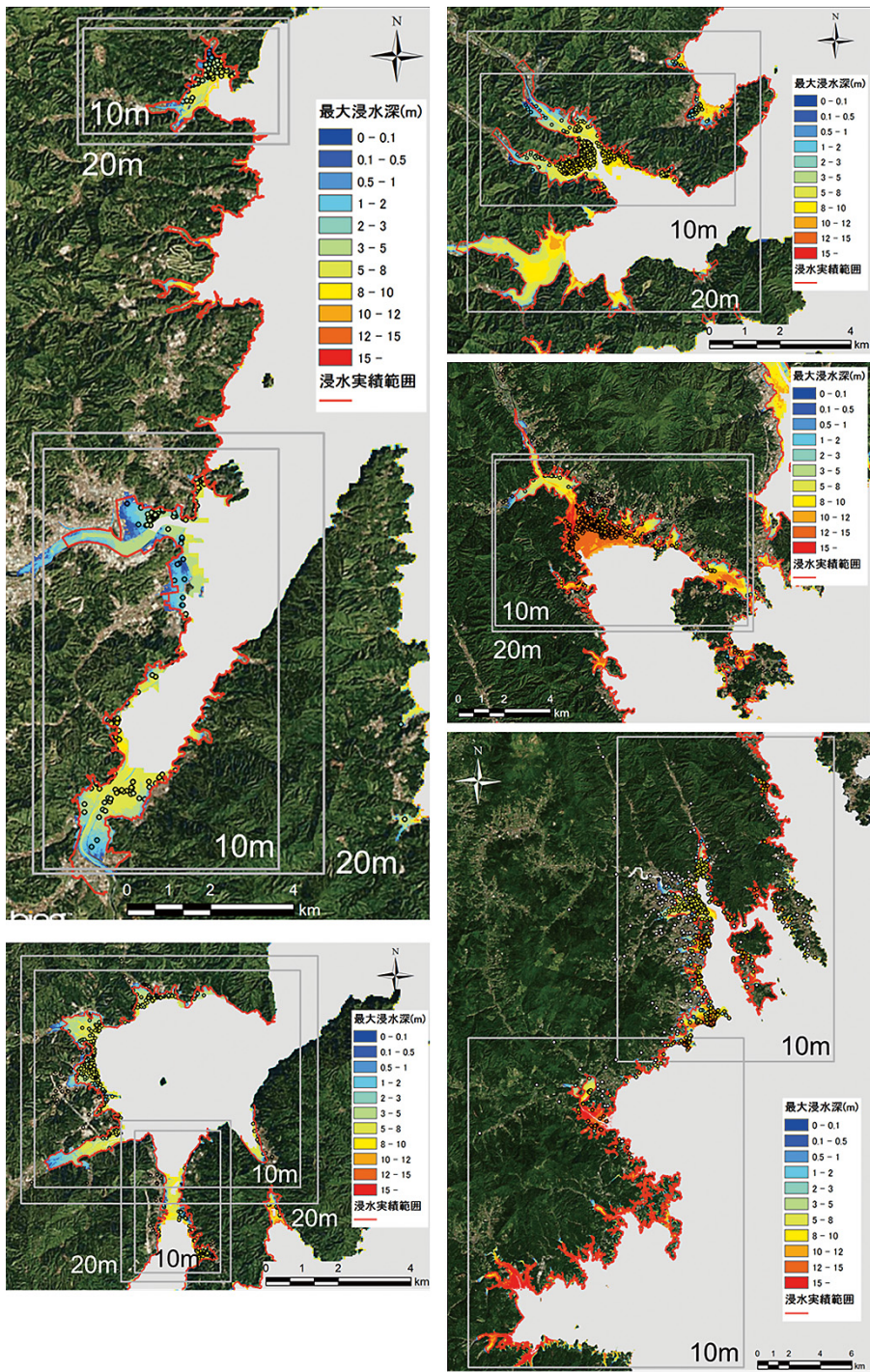


図2 津波シミュレーションの週上解析領域と最大浸水深分布
 図中の赤線は国土地理院によって得られた浸水実績範囲。丸印は本調査で使用した犠牲者データの位置。

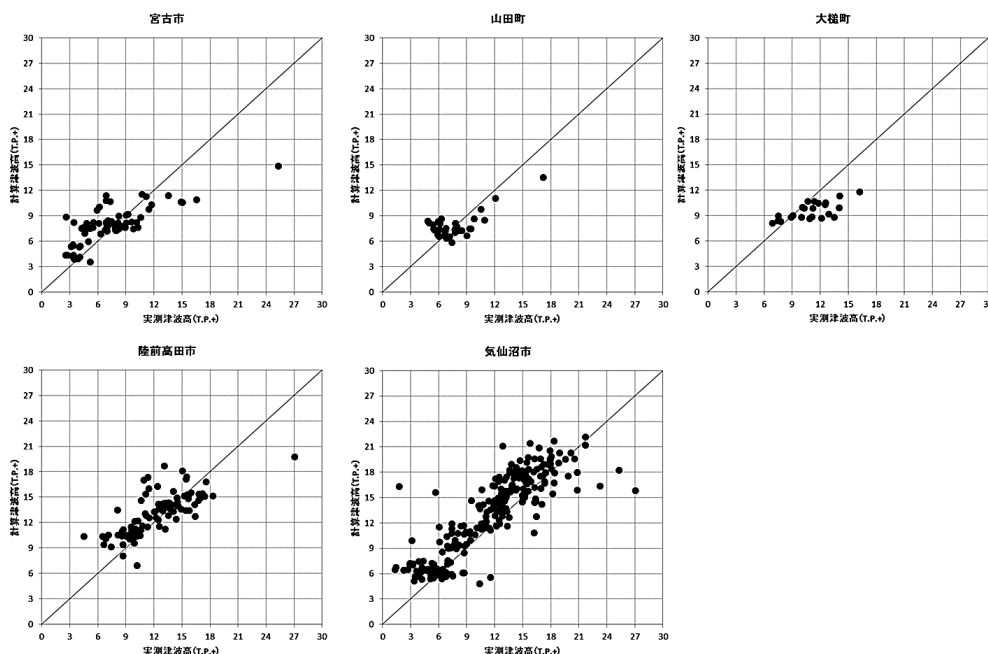


図3 実測津波高と計算津波高の散佈図
 実測津波高の痕跡データは、信頼度 A で、浸水高のものを使用

表2 各週上領域での津波高の精度指標

市町名	相関係数	幾何平均値 K	幾何標準偏差 κ
宮古市	0.753	0.883	1.361
山田町	0.719	0.965	1.240
大槌町	0.693	1.131	1.182
陸前高田市	0.756	0.917	1.213
気仙沼市	0.864	0.852	1.349

ミュレーションのデータは、浸水範囲、浸水深、到達時間の面で議論に耐え得る精度を有しているものとする。

計算結果は、主に四次メッシュごとの平均浸水深、平均流速として解析に用いている。集計に当たっては、当該四次メッシュ内に含まれる浸水深が0mより大の全データの合計値を、浸水深が0mより大となった計算メッシュ数で割った値を、当該四次メッシュの「平均津波浸水深」とした。つまり、浸水面積を分母とした平均値であり、当該四次メッシュ内に非浸水域が含まれる場合、その面積分は分母には含まれない。なお、四次メッ

シュ領域内に異なるメッシュサイズの浸水深データが存在する場合は、全てのメッシュサイズのデータを10mメッシュにリサンプル（内挿補間などの補正なし）し、その上で4次メッシュ領域内の浸水深平均値を算出した。同様に、10mメッシュでの最大流速の合計値を計算メッシュ数で割った値を「平均流速」とした。

また、四次メッシュ単位の集計とは別に、個々の犠牲者居住地住所の緯度・経度地点における浸水深、流速も計算した。

その他、個々の素因に関して用いた資料については、次章の各節で挙げる。

3. 結果

3.1 犠牲者居住地と浸水域

津波シミュレーション結果をもとに、犠牲者居住地の津波浸水深が0mより大の場合を「浸水域内」、それ以外を「浸水域外」として、市町ごとに集計した結果が図6である。市町により若干異なるが、全体では87.1%の犠牲者居住地が「浸水域

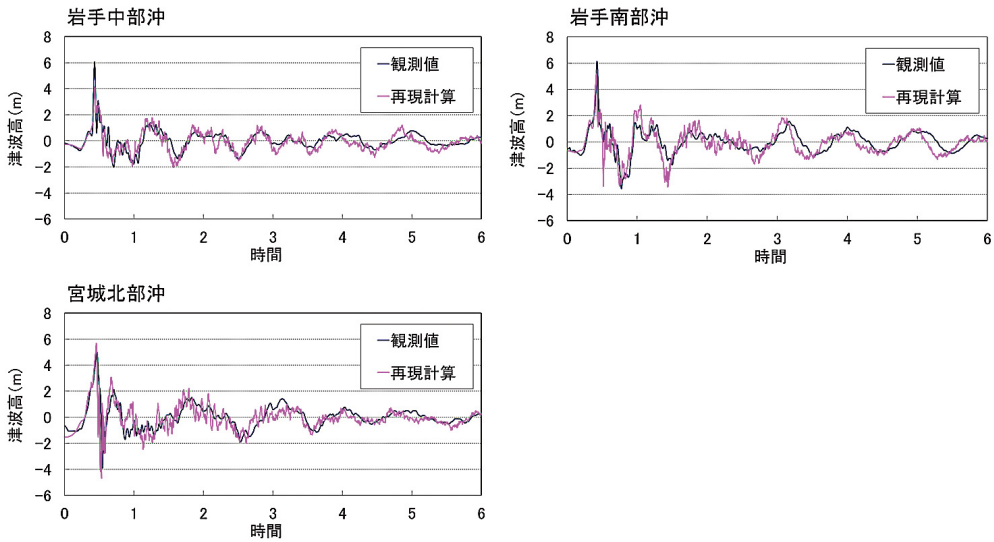


図4 GPS 波浪計での観測波形と津波再現計算波形の比較

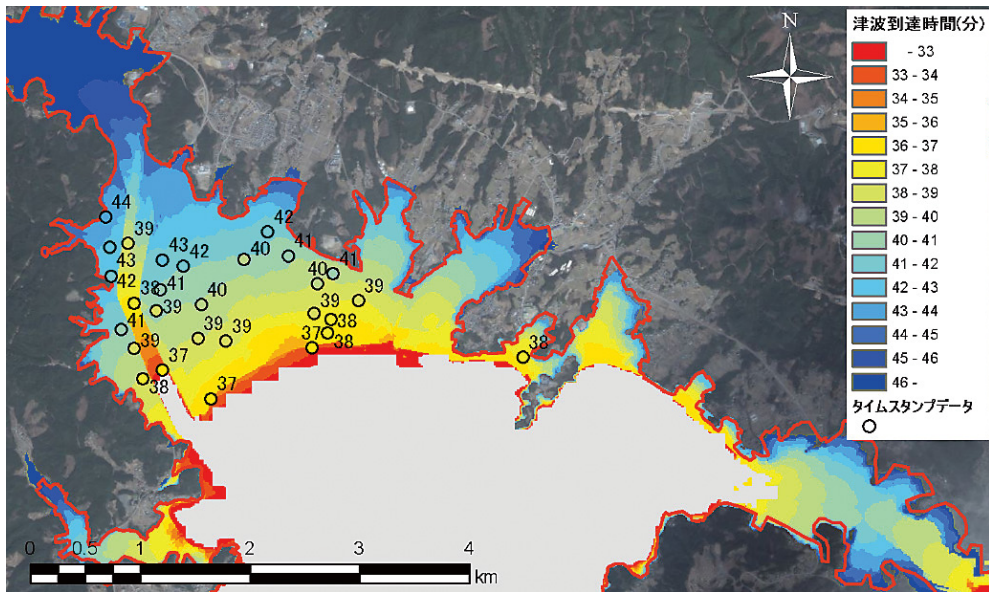


図5 津波シミュレーションより得られた陸前高田市における津波到達時間（地震発生からの経過時間）

内」に所在している。大局的には、犠牲者のほとんどは今回の津波浸水域内の居住者であったといえる。

以下本研究では、犠牲者のうち、津波浸水域内居住者を対象として解析を進める。津波浸水域内

の居住者であっても、地震発生から津波到達までの間に津波浸水域内に所在していたかどうかは分からず、本事例において推測するための有効な情報も得られていない。しかし、犠牲者のうち浸水域外居住者は1割前後にとどまっていることか

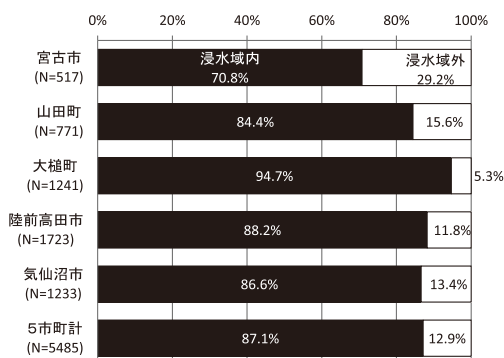


図6 犠牲者居住地と浸水域の関係

ら、対象地域では浸水域内外での人の移動は限定的なものであったことが示唆される。確定的なことはいえないが、本論文では、犠牲者の多くが「津波浸水域内に居住し、かつ津波到達時に津波浸水域付近に所在していた」と推定した上で検討を行うものとする。

3.2 津波浸水深と犠牲者率

本節以降は、四次メッシュ単位での集計結果を示す。四次メッシュ単位としたのは、国勢調査データの最小分解能が四次メッシュであるという制約による。集計対象は、5市町内の四次メッシュのうち、国土地理院(2011)による今回の津波浸水域を含み、かつメッシュ内人口が100人以上の四次メッシュとした。まず四次メッシュごとの犠牲者率を求めた。ここで犠牲者率とは、四次メッシュ内の人口に対する犠牲者数の比である。人口100人以上を集計対象としたのは、少数の犠牲者数で犠牲者率が極端に大きくなることを防ぐためである。犠牲者数ではなく犠牲者率を用いているのは、四次メッシュごとの「津波による犠牲者の生じやすさ」を検討する目的からである。集計対象メッシュ数は291で、集計対象犠牲者数は4709人(情報を入手した犠牲者数の85.9%)となった。

四次メッシュ平均津波浸水深(以下単に浸水深という)と犠牲者率の関係を図7に、平均流速(以下では流速という)との関係を図8に示す。図中の直線は一回帰式を求めて表記した線、 R^2 は決定係数である。浸水深と犠牲者率は正の比例関係

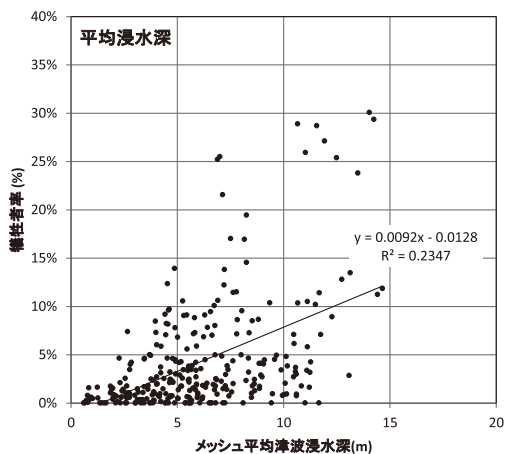


図7 四次メッシュ平均津波浸水深と犠牲者率

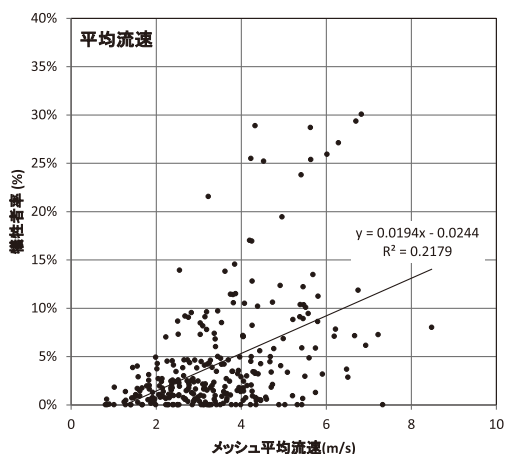


図8 四次メッシュ平均流速と犠牲者率

にあると認められ、流速と犠牲者率の関係も同様である。相関係数は浸水深と犠牲者率の間で0.4845、流速との間で0.4668と、比較的高い。浸水深と犠牲者率の関係は、国土交通省(2011)に示されている簡単な集計図表のうち「リアス部」(石巻市牡鹿半島以北)の結果と図7の回帰式が示す値がおおむね整合している。従来の津波被害(河田, 1997)ともおおむね同傾向だが、浸水深の小さいメッシュでは犠牲者率がやや高く、浸水深の大きいメッシュでは犠牲者率がやや低い傾向が見られる。河田(1997)では、人的被害を与える

津波高さは2m以上とされるが、今回の集計では浸水深2m以下で犠牲者率0%より大が15メッシュ、1%以上が6メッシュ確認された。また、津波高さ5m以上では最小死亡率が0%より大とされているが、今回の集計では、浸水深5m以上かつ犠牲者率0%が17メッシュ確認された。犠牲者率0%のメッシュは、全体では38であり、集計対象メッシュの13.1%に相当する。

次に、犠牲者率と素因・誘因の関係を単純なクロス集計により検討した。ここで犠牲者率は2%をしきい値とし2階級に分類した。これは、全メッシュの犠牲者率の中央値が2.08%であることを参考とした。素因・誘因となる要素は、各階級に含まれるメッシュ数が過少とならずかつ偏りが生じないように2～4階級に分類することとした。浸水深については幅のある数値変数であることから4階級とした。犠牲者率と浸水深をそれぞれ階級化してクロス集計した結果が図9である。図からも浸水深が大きいほど犠牲者率の高いメッシュの比率が高くなる傾向が読み取れる。犠牲者率と浸水深の間について独立性の検定(カイ二乗検定)を行ったところ、危険率5%で有意な関係が認められた。

3.3 津波到達時間と犠牲者率

地震発生から津波到達までの時間を津波到達時間とし、四次メッシュ平均津波到達時間と犠牲者率の関係を示したのが図10である。おおむね到達時間が短いほど、犠牲者率が高くなる傾向が見られ、相関係数は-0.2694である。津波到達時間と

犠牲者率のクロス集計結果が図11である。津波到達時間は、最小時間、最長時間を参考に4階級とした。階級化した結果からも到達時間が短いほど犠牲者率の高いメッシュの比率が高くなる傾向が読み取れる。犠牲者率と津波到達時間の間について独立性の検定を行ったところ、危険率5%で有意な関係が認められた。

対象メッシュでの津波到達時間は最短27.4分、最長65.3分だった。犠牲者率の高いメッシュは到達時間45分未満のメッシュが目立ち、犠牲者率10%以上のメッシュはすべて45分未満である。

3.4 平均標高・起伏量と犠牲者率

四次メッシュ内の平均標高と犠牲者率の関係を

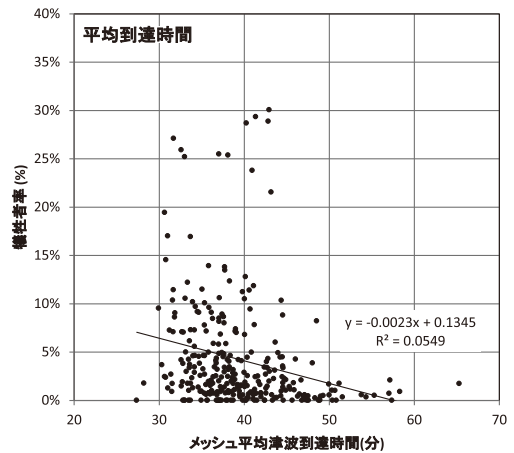


図10 四次メッシュ平均津波到達時間と犠牲者率

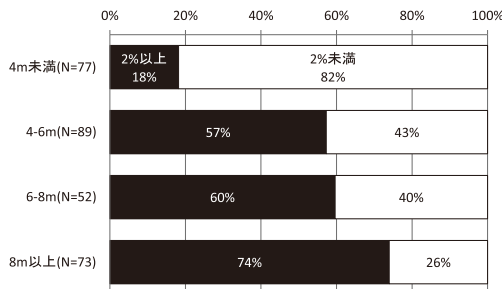


図9 階級化した四次メッシュ平均浸水深と犠牲者率

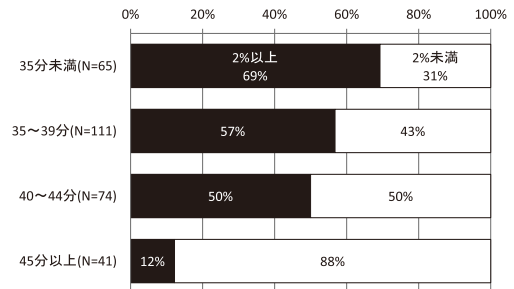


図11 階級化した四次メッシュ平均津波到達時間と犠牲者率

示したのが図12である。標高の値は、国土数値情報の「標高・傾斜度4次メッシュデータ」を用いている。おおむね平均標高が低いほど、犠牲者率が高くなる傾向が見られ、相関係数は-0.2212である。平均標高と犠牲者率のクロス集計結果が図13である。平均標高は最小値1.1, 中央値16.6であることを参考に、10m区切りの4階級とした。ここからも平均標高が低いほど犠牲者率の高いメッシュの比率が高くなる傾向が読み取れる。犠牲者率と平均標高の間について独立性の検定を行ったところ、危険率5%で有意な関係が認められた。

四次メッシュ内の地形の凹凸を表す簡易な指標として、起伏量（メッシュ内最高標高と最低標高

の差）を用いて、起伏量と犠牲者率の関係を示したのが図14である。起伏量が小さいほど、犠牲者率が高くなるようにもみえるが、相関係数は-0.0917と高くない。起伏量と犠牲者率のクロス集計結果が図15である。起伏量は最小値0.4, 中央値46.4であることを参考に、20m区切りの4階級とした。ここからは起伏量20m未満のメッシュで犠牲者率の高いメッシュの比率が明瞭に高いことが読み取れる。犠牲者率と平均標高の間について独立性の検定を行ったところ、危険率5%で有意な関係が認められた。

大局的には、標高が低く、起伏量の小さいメッシュ、すなわち高台から離れた低地で犠牲者率が高くなる傾向が読み取れる。ただし、起伏量が

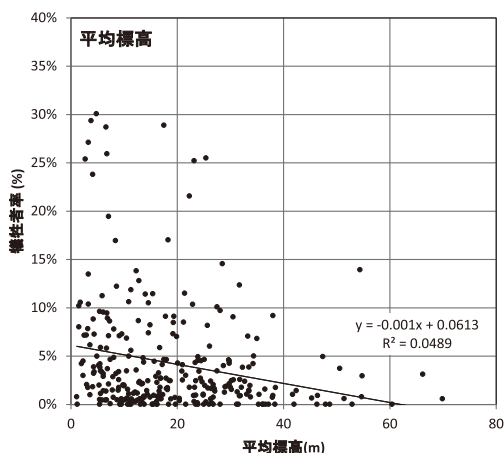


図12 四次メッシュ平均標高と犠牲者率

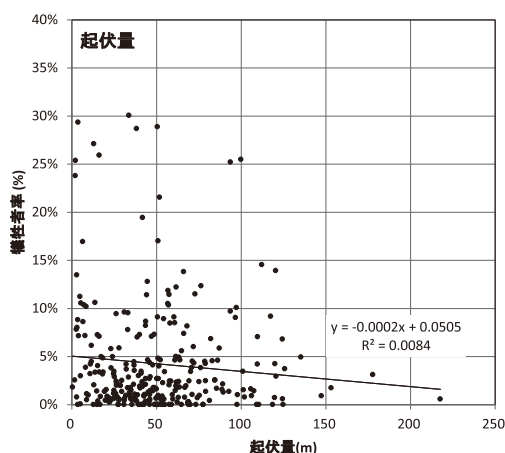


図14 四次メッシュ内の起伏量と犠牲者率

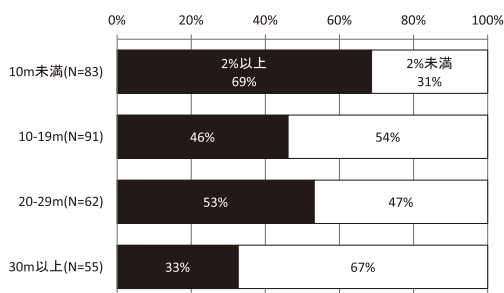


図13 階級化した四次メッシュ平均標高と犠牲者率

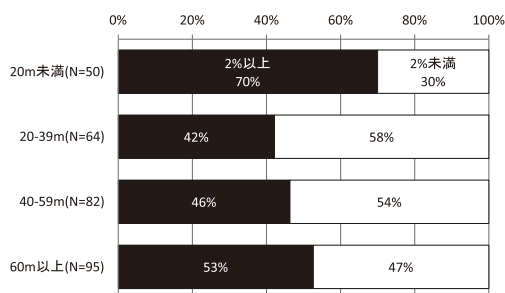


図15 階級化した四次メッシュ内の起伏量と犠牲者率

きい、すなわち高台と低地が混在していると思われるメッシュで犠牲者率が高いケースも認められる。起伏量60m以上で犠牲者率10%以上のメッシュは9メッシュ確認され、うち8メッシュが大槌町中心市街地である。このような場所では、高台が近くにあったものの、積極的な避難が行われなかった、または避難路となる道が少なかったことなどから避難が難しかった可能性がある。

3.5 海岸線との距離と犠牲者率

四次メッシュから海岸線までの距離を、GISソフトMANDARAを用いて計算した。海岸線データは、国土地理院の数値地図25000（行政界・海岸線）を用い、四次メッシュの中心点を代表点として、この点から直近の海岸線を探索し、直線距離を計算した。海岸線からの距離と犠牲者率の関係を示したのが図16である。相関係数は-0.0012と、関係は不明瞭である。海岸線との距離と犠牲者率のクロス集計結果が図17である。海岸線との距離は、中央値が0.41kmであることを参考に、0.2km区切りの4階級とした。この集計でも、海岸線との距離と犠牲者率の関係は不明瞭で、独立性の検定を行ったところ、危険率5%で有意な関係は認められなかった。

不明瞭ではあるが、少なくとも、海岸から離れた場所の方が、犠牲者が生じやすい（犠牲者率が高い）傾向は認められない。

3.6 人口と犠牲者率

四次メッシュの人口と犠牲者率の関係を示したのが図18である。どちらかというとも人口が多いほど、犠牲者率が高くなる傾向が見られるが、相関係数は0.1250で、関係は不明瞭である。人口と犠牲者率のクロス集計結果が図19である。ここでは、市街地的なメッシュと、非市街地的メッシュを分ける目的で階級化した。「市街地」の定義はいろいろあり得るが、一つの考え方としては、人口密度4000人が目安となる。これは、人口集中地区の定義が「人口密度が4000人/km²以上の基本単位区が隣接して人口5000人以上」であることを参考にしたものである。四次メッシュの面積は

0.25km²なので、四次メッシュ人口に換算すると1000人となる。しかし、調査対象地では4次メッシュ人口1000人以上のメッシュは、陸前高田市では0メッシュ、山田町では1メッシュなどで、合計でも11メッシュしか存在しない。そこでここでは便宜的に500人以上（人口密度2000人/km²以上）をしきい値として2階級化した。図19に見るように、「市街地」（500人以上）の方が「非市街地」（500人未満）より犠牲者率の高いメッシュの比率が高くなっている。ただし、独立性の検定を行ったところ、危険率5%で有意な関係は認められなかった。図19では、参考のため人口100人未満のメッシュについても集計して示している。人口の

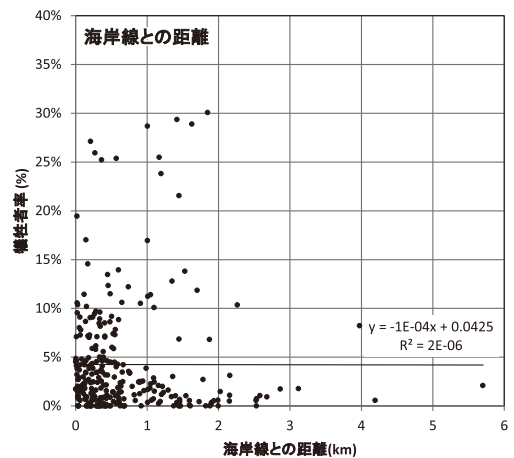


図16 四次メッシュごとの海岸線との距離と犠牲者率

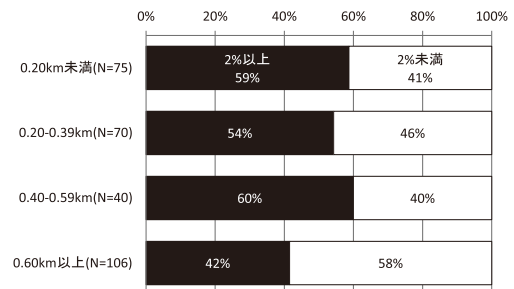


図17 階級化した四次メッシュごとの海岸線との距離と犠牲者率

少ないメッシュでは、たとえば人口2名のメッシュにおいては1名死亡するだけで犠牲者率が50%となってしまうなど、犠牲者率が大きく変動しやすい可能性があるにもかかわらず、人口100人未満のメッシュでは犠牲者率の高いメッシュの比率が他に比べて低くなっている。この3階級で独立性の検定を行ったところ、危険率5%で有意な関係が認められた。

人口のごく少ないメッシュまで含めて検討すると、「市街地」の方が「非市街地」に比べ、相対的に高い犠牲者率（2%以上）のメッシュが生じやすい傾向があったと認められる。

3.7 年代構成と犠牲者率

高齢者を65歳以上の人と定義して、四次メッシュ内の高齢者率と犠牲者率の関係を示したのが

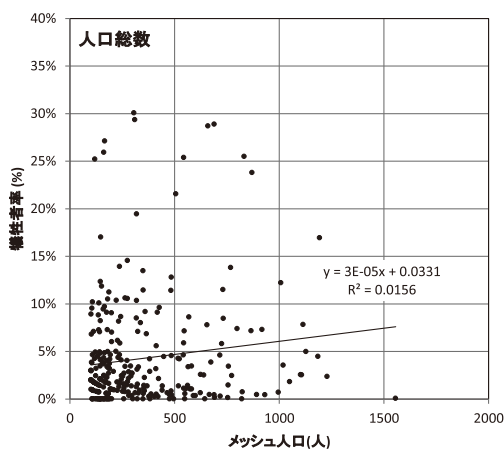


図18 四次メッシュごとの人口と犠牲者率

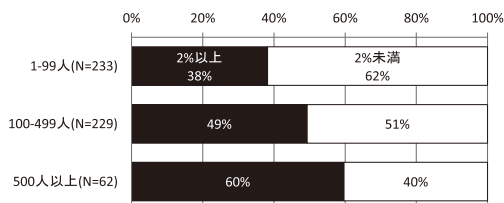


図19 階級化した四次メッシュごとの人口と犠牲者率

図20である。相関係数は0.0612で、関係は不明瞭である。高齢者率と犠牲者率のクロス集計結果が図21である。高齢者率の中央値が0.29であることを参考に、0.5区切りの4階級とした。図からは、どちらかという高齢者率が高いほど犠牲者率の高いメッシュの比率が高くなるようにも読み取れるが、独立性の検定を行ったところ、危険率5%で有意な関係が認められなかった。調査対象地は高齢者率が全般的に高い地域であり、年代構成の大きな違いが無く、年代に関わる傾向が生じにくかったのかもしれない。

3.8 建物構造と犠牲者率

津波被害に関わる可能性がある建物構造に関する情報として、2005年国勢調査をもとに、四次

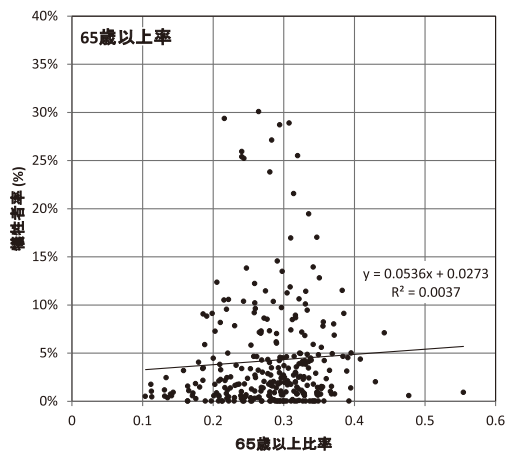


図20 四次メッシュごとの高齢者率と犠牲者率

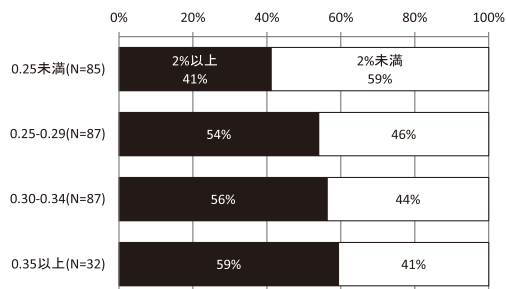


図21 階級化した四次メッシュごとの高齢者率と犠牲者率

メッシュごとの「3階建て以上の世帯数」を用いた。調査対象地で、「3階建て以上の世帯数」は238世帯で、全調査対象メッシュ内の34607世帯に対して極めて少数である。そこで本節では、メッシュごとの「3階建て以上の世帯」の有無で2階級化したクロス集計結果のみを示す(図22)。「3階建て以上の世帯なし」メッシュの方が、犠牲者率の高いメッシュの比率が高くなっている。ただし、独立性の検定を行ったところ、危険率5%で有意な関係は認められなかった。

堅牢な建物が所在する地域で犠牲者率が低くなる可能性が示唆されたとも読み取れるが、得られた情報が限られており、明確な傾向については議論できない。

3.9 津波浸水想定区域と犠牲者率

今回の調査対象地では、岩手県(2004)、宮城県(2004)により地震、津波シミュレーションが行われ、その結果が津波浸水予測図などの形で公表されていた。この資料を用いて、調査対象四次メッシュが、津波浸水想定区域に含まれていたかどうかを判定した。まず、25000分の1地形図上に四次メッシュ区画を表示し、この図と、津波浸水予測図を目視で比較した。その上で、当該四次メッシュ内の集落(地形図上の建物等の記号)が浸水予測範囲に全く含まれていない場合を「浸水想定区域外」、一部の建物等が浸水予測範囲に含まれている場合を「一部区域内」、ほぼすべての建物等が浸水予測範囲に含まれている場合を「全域区域内」と、計3階級に判定した。この3階級と犠牲者率のクロス集計結果が図23である。「全域区域内」で犠牲者率の高いメッシュの比率が高く、「浸水想定区域外」では低くなっている傾向が認められる。独立性の検定を行ったところ、危険率5%で有意な関係が認められた。

3.10 各素因間の関係

最後に、これまでに上げた各素因間の関係について検討するため、犠牲者率(%)を目的変数、各素因を説明変数として重回帰分析を行った。説明変数として用いたのは、平均浸水深、平均流

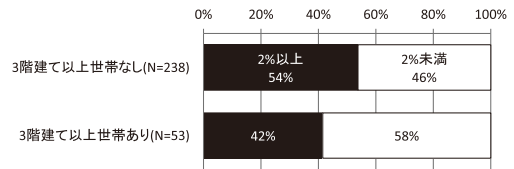


図22 四次メッシュごとの3階建て以上世帯の有無と犠牲者率

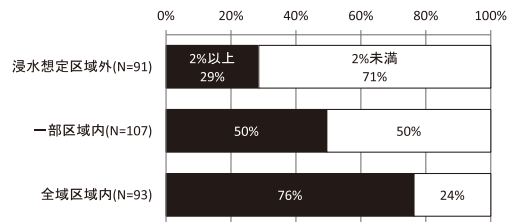


図23 四次メッシュごとの浸水想定区域と犠牲者率

速、平均到達時間、平均標高、起伏量、海岸線との距離、人口総数、65歳以上の比率、3階建て以上世帯の有無、浸水想定区域内外の10種類である。このうち、3階建て以上世帯については「なし」を1、「あり」を0としたダミー変数に変換した。浸水想定区域については、「浸水想定区域外」を1、「一部区域内」および「全域区域内」を0とするダミー変数に変換した。

分析結果を表3、表4に示す。なお、重相関係数は0.625、決定係数は0.390だった。回帰式のP値は 3.34×10^{-25} であり、危険率1%で有意な回帰式と考えられる。VIF(分散拡大要因)値は最大でも平均標高の4.478と10以下であり、多重共線性については特に考慮の必要はないものと思われる。有意な回帰係数が得られたのは、平均浸水深、平均流速、平均到達時間、平均標高、起伏量、海岸線との距離、人口総数の7素因だった。65歳以上の比率、3階建て以上世帯の有無、浸水想定区域内外の3素因は、重回帰分析の結果からは犠牲者率との関係が相対的に不明瞭であることが示唆される。偏相関係数が最も大きいのは平均浸水深であり、以下、人口総数、平均流速、海岸線との距離といった順序となっている。

表3 犠牲者率を目的変数とした重回帰分析結果（相関行列）

	犠牲者率 (%)	平均浸水深 (m)	平均流速 (m/s)	平均到達時間 (分)	平均標高 (m)	起伏量 (m)	海岸線との距離 (km)	人口総数 (人)	65歳以上比率	3階建て以上世帯	浸水想定区域
犠牲者率 (%)	1.000	0.484	0.467	-0.234	-0.221	-0.092	-0.001	0.125	0.061	0.019	-0.192
平均浸水深 (m)	0.484	1.000	0.639	-0.426	-0.317	-0.283	-0.279	-0.163	0.137	0.069	-0.359
平均流速 (m/s)	0.467	0.639	1.000	-0.250	-0.468	-0.404	-0.087	-0.045	-0.051	-0.081	-0.227
平均到達時間 (分)	-0.234	-0.426	-0.250	1.000	-0.028	0.008	0.742	0.189	-0.206	-0.284	0.532
平均標高 (m)	-0.221	-0.317	-0.468	-0.028	1.000	0.838	-0.002	-0.245	0.103	0.260	0.305
起伏量 (m)	-0.092	-0.283	-0.404	0.008	0.838	1.000	0.070	-0.177	0.134	0.229	0.192
海岸線との距離 (km)	-0.001	-0.279	-0.087	0.742	-0.002	0.070	1.000	0.155	-0.160	-0.188	0.574
人口総数 (人)	0.125	-0.163	-0.045	0.189	-0.245	-0.177	0.155	1.000	-0.036	-0.489	-0.085
65歳以上比率	0.061	0.137	-0.051	-0.206	0.103	0.134	-0.160	-0.036	1.000	0.224	-0.223
3階建て以上世帯	0.019	0.069	-0.081	-0.284	0.260	0.229	-0.188	-0.489	0.224	1.000	-0.047
浸水想定区域	-0.192	-0.359	-0.227	0.532	0.305	0.192	0.574	-0.085	-0.223	-0.047	1.000

表4 犠牲者率を目的変数とした重回帰分析結果（回帰係数の有意性）

	回帰係数	回帰係数の有意性	標準誤差	偏相関係数	VIF
平均浸水深 (m)	0.655	**	0.127	0.294	2.082
平均流速 (m/s)	1.016	**	0.280	0.212	2.078
平均到達時間 (分)	-0.244	**	0.079	-0.181	2.882
平均標高 (m)	-0.092	*	0.044	-0.124	4.478
起伏量 (m)	0.049	**	0.016	0.186	3.679
海岸線との距離 (km)	1.966	**	0.595	0.194	2.739
人口総数 (人)	0.006	**	0.001	0.255	1.484
65歳以上比率	-1.261		4.412	-0.017	1.164
3階建て以上世帯	1.601		0.851	0.112	1.504
浸水想定区域	0.042		0.834	0.003	2.082
定数項	1.502		3.940	0.000	0.000

4. まとめ

本研究では、三陸地方における東日本大震災に伴う津波犠牲者を対象に、「津波による犠牲者の発生しやすさ」を、四次メッシュごとの犠牲者率として指標化し、当該メッシュにおける津波災害に関わる素因・誘因との関係を検討した。犠牲者率ともっとも明瞭な関係が認められたのは、誘因である津波浸水深および流速であり、外力としての津波の規模が「犠牲者の発生しやすさ」に明確に影響していることが確認された。従来から、津波の被害想定などでは浸水深を主に用いて検討がなされており、このような検討が妥当であることがあらためて示された。

本研究で検討した津波災害に関わる素因・誘因のうち、犠牲者率の高低と明瞭な関係が、階級化したクロス集計の結果および重回帰分析の双方で

認められた要因は、上記の浸水深（誘因）、流速（誘因）のほかに、津波到達時間（誘因）、平均標高（素因）、起伏量（素因）、人口（素因）であった。整理すると、

- a) 大きな津波が到達したところ
- b) 津波が早く到達したところ
- c) 高台から離れた低地
- d) 人口の多い市街地

などで、相対的に高い犠牲者率のメッシュの比率が高くなる傾向が確認された。

クロス集計、重回帰分析のいずれかで犠牲者率との関係が認められた要因は、海岸線との距離（素因）、浸水想定区域（素因）だった。クロス集計、重回帰分析の双方で犠牲者率との関係が認められなかった要因はいずれも素因で、65歳以上の高齢者率、3階建て以上世帯の有無だった。

a), b), c) は容易に想像できる結果であるが, d) は従来指摘されていなかった特徴である。原因としては, 交通渋滞等の避難阻害要因があったこと, ハード構造物がよく整備されていて津波の様子がわかりにくかったことなどが考えられるが, 明確には分らない。

高齢者率や, 3階建て以上世帯の有無については, 不明瞭な関係は読み取れており, 判断のための材料が不足しているとも言える。

海岸線との距離や, 浸水想定区域の内外については注意が必要である。現地での聞き取りや, メディア報道 (たとえば産経新聞社, 2011) などでは, 「海から離れた場所や『想定外』の場所にいた人が油断して多数遭難した」という趣旨の話が聞かれる。無論そういった事実は確かにあったと筆者も考えるが, それはどちらかといえば例外的な事象であり, 大局的には a), b), c), d) のような, 一般的に外力としての津波の影響を受けたメッシュで犠牲者率の高いメッシュの比率が高くなるのが本研究で確認された。犠牲者を大きく減らすためには, こういった場所での様々な対策がまず重要である。

なお, 本論文では平野部の少ない三陸地方 (いわゆる「リアス部」) を解析対象地とした。石巻市以南の平野部における津波犠牲者については, ここで挙げた特徴とは異なる傾向があると予想されることには注意が必要である。

謝 辞

本研究の実施に当たっては, 宮城県気仙沼市役所, 岩手県陸前高田市役所, 同大槌町役場, 同山田町役場, 同宮古市役所から多大なご協力をいただいた。また, 岩手県県土整備部の岩館晋氏からは, 現地調査に当たってのご協力をいただいた。また, 本研究で使用した津波痕跡値は, 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによって調査・整理された貴重なデータを使用させていただいたものである。なお, 本研究の一部は, 環境省環境研究総合推進費 (S-8), 科学研究費補助金「客観的根拠に基づく津波防災情報及び豪雨防災情報のあり方に関する研究」(研究代表者・牛山素

行), 科学技術戦略推進費地域再生人材創出拠点形成事業「災害科学的基礎を持った防災実務者の養成」の研究助成によるものである。

参考文献

- 相田 勇：三陸沖の古い津波のシミュレーション, 東京大学地震研究所彙報, Vol.52, pp.71-101, 1977.
- 藤井雄士郎・佐竹健治：2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の津波波源 (暫定結果, Ver. 4.2と Ver. 4.6), http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii.OffTohokuPacific2011/tsunami_ja.html, 2011 (2012年7月10日参照).
- 後藤智明・小川由信, Leap-frog法を用いた津波の数値計算法, 東北大学工学部土木工学科資料, 52p, 1982.
- 岩手県：岩手県地震・津波シミュレーションおよび被害想定調査に関する報告書, 2004.
- 河田恵昭：大規模地震災害による人的被害の予測, 自然災害科学, 16, 1, pp.3-13, 1997.
- 国土地理院：平成23年(2011年)東日本大震災に関する情報提供, http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohoku.html, 2011年5月17日参照.
- 国土交通省：東日本大震災の津波被災現況調査結果 (第2次報告)平成23年10月4日公表, http://www.mlit.go.jp/report/press/toshi07_hh_000056.html, 2011.
- 越村俊一・行谷佑一・柳澤英明：津波被害関数の構築, 土木学会論文集B, 65, 4, pp.320-331, 2009.
- Mansinha, J. and Smylie D.E.: The displacement field of inclined faults, BSSA, Vol.61, No.5, pp.1473-1492.
- 宮城県：宮城県地震被害想定調査に関する報告書, 2004.
- 水谷武司：自然災害と防災の科学, 東京大学出版会, 2002.
- 産経新聞社：死者・不明の6割超 津波想定区域外だった釜石市など調査, 避難抑制か (2011年6月21日付け記事), 2011.
- 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ：痕跡調査結果 (2012年12月29日リリース版), <http://www.coastal.jp/tjtf/>, 2012.
- 牛山素行・横幕早季：タイムスタンプデータによる津波到達直前の陸前高田市内の状況推定, 日本災害情報学会第13回研究発表大会予稿集,

pp.297-300, 2011.

牛山素行・横幕早季：特集 東日本大震災と災害情報 人的被害の特徴, 災害情報, No.10, pp.7-13, 2012.

(投稿受理：平成25年7月5日
訂正稿受理：平成26年6月24日)