

地形的要因を取り入れた津波による人的被害予測式の構築

四井 早紀¹・清野 純史²

Fatality Modeling of Tsunami Disaster Taking into Account Geographical Factors under the Great East Japan Earthquake

Saki YOTSUI¹ and Junji KIYONO²

Abstract

Fatality model can help with risk communication to the local communities and disaster management. Although there are many models of tsunami disaster at present, certainly none of them take into account characteristics of region. This study develops new explanatory variables to model based on equation of Central Disaster Management Council and UNDP. New explanatory variables indicate local features such as distance of evacuation route and elevation trend of evacuation route. We analyzed characteristics of distance and elevation trend of evacuation route in the case of Fukushima prefecture under the Great East Japan Earthquake as the first step. We carried out multiple regression analysis against new eight explanatory variables. This study proposes deaths in each 500 m grid using geographical factors based on new explanatory variables and demographic factors.

キーワード：東日本大震災，福島県，人的被害，ArcGIS

Key words： the Great East Japan Earthquake, Fukushima prefecture, Fatality model, ArcGIS

1. はじめに

国・社会・地域が自然災害の「リスク」を判断する際には、その自然災害によって生じる「死者数」が有用な指標の一つとして用いられる。この死者数を算出するためには、被害を予測する地域の状況を正確に表現できる予測式が必要となる。これまで地震や津波が起きる可能性が低いと考え

られていた地域においてすら、様々な自然災害が発生している現状を考えると、人的被害予測式に関する検討は、安心安全な社会を構築する上で不可欠な課題である。

現在、日本では津波災害に関する被害予測手法は複数提案されてはいるものの、それぞれ一長一短があり、統一された予測手法が存在するとは言

¹ 京都大学大学院地球環境学舎
Graduate School of Global Environmental Studies, Kyoto University

² 京都大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Kyoto University

えない。また、被害に影響を及ぼす地形の特徴や社会的要因それぞれに着目した式は提案されているものの、双方を組み込んだ予測式の研究例は少ない。さらに、国や県単位の予測式はあっても、地域レベルでの予測式はほとんど見当たらないのが現状である。これは、前述のような予測手法や予測式に組み込む変数が統一されていないこと、さらにこのような分析を行う際のデータの質・量がそれぞれの予測式によって大きく異なることも原因の一つである。

しかし、このような状況下においても、地域資料の整備が遅れているような国や社会に対して、他の地域の資料を用いることにより、その地域が有する危険度が推定できるような予測手法が必要であることは論を俟たない。ここに、被害を予測する地域の状況を表現でき、人的被害をできるだけ正確に予測できる式を構築する意義が存在する。

著者らはこれまで、死亡率が地形によって変動する要因を明らかにするために、死者の居住地が番地レベルで得られている福島県を対象として分析を行った¹⁾。平野部の地形であれば死亡率が高く、急峻な地形を有していれば、死亡率が低い傾向を示すことにより、地形すなわち標高分布により、死亡率に特徴があることを明らかにした。本論ではこの結果に基づき、標高の特性を地域の状況を表現できる重要な変数として捉え、人的被害予測式に組み込む。

一方、阿部ら²⁾は、自然災害は多様であり、社会的要因や経済状況にも依存する複雑な様相であると考え、日本国内の分析に留まらず、国際統計を用いて災害に関わるリスクを評価している。これより、人的被害予測式の提案に際しては、地形的要因だけでなく、地域を構成する社会的要因も組み込んだ式が求められていることが窺える。

世界に目を向けると、それぞれの国によって直面している災害が異なることは明らかであるが、EM-DAT³⁾によると、2000年から2015年の間の地震と津波被害による死者は、自然災害の全死者数のうち53%を占めることが報告されている。国際連合国際防災戦略 (UNISDR)⁴⁾の中にも、1980年

から2000年までに、世界人口の約75%の人々が、地震、台風、洪水または干ばつに見舞われた地域に居住していたと記述されている。ただし、このような災害リスクに対して、必ずしも回避不可能ではないとの主張も加えられている。このように、日本だけではなく、世界においても国際的なリスクアセスメントの重要性が述べられている。So⁵⁾は、人的被害の観点から、2011年東日本大震災のように、地震による直接的な人的被害は相対的に少なく、津波、地すべりなどの2次災害によって発生する人的被害の分析の必要性を述べている。たとえば、東日本大震災では、死因の約90%は、津波による溺死であった⁶⁾。これまでは、主に地震・火山などの直接的な災害に対する検討が多く行われてきたが、今後は2次災害に対する被害分析も急務となるであろう。

本研究の目的は、津波による人的被害低減に向けた検討を推進し、そのグローバルモデルの構築を目指すことであるが、ここではその第一段階として、データが揃っている日本の代表的な津波被害、すなわち2011年東北地方太平洋沖地震を対象とした人的被害予測式の提案を行う。まず、福島県の市町村の死者を対象とした「避難経路別距離・標高推移の特性分析」を行い、その特性を地形的要因として定量表現する。さらに上述の特性分析で得られた地形的要因に加え、個人属性を表す年齢と性別を組み込んだ式を新たに提案する。

2. データと人的被害予測式の手法論

2003年の中央防災会議の被害想定手法^{7,8)}は、式(1)に示すように死者数を浸水域内における滞留人口と浸水深の関係から算出するものである。滞留人口は、浸水深が1 m以上となるエリア内の人口であり、これを津波影響人口と定義している。

$$\begin{aligned} \text{死者数} &= \text{津波影響人口} \times 0.0282 \\ &\times \exp(0.2328 \times \text{浸水深}) \quad (1) \end{aligned}$$

河田⁹⁾は、マルチシナリオ型の被害想定の中核となるものが、人的被害の予測であると述べている。津波災害の人的被害予測には、津波高さと死

亡率との関係のグラフを用い、氾濫水深毎に住民数に死亡率をかけることで死者数を算出している。Suppasri ら¹⁰⁾は、過去の津波被害のデータと比較しながら、津波そのものの特徴、地形的特徴、地域の特徴と人間の特徴を考慮した分析を行っている。また今井ら¹¹⁾は、津波による人的被害、物的被害などの各種被害発生条件を整理し、合成地形モデルによる津波氾濫解析を行っている。人的被害について、津波以外の不確実性を考慮した確率的な評価も行い、犠牲者の居住地とその周辺の平均的な津波浸水深と人的被害の関係性を式で表現している。世界レベルで死者数を考慮できる分析結果として、Peduzzi¹²⁾らは式(2)に示すように、地震の人的被害予測式を各国の地震に対する曝露人口 ($PhExp40$)、都市群の成長率 (U_g)、国を占める森林の割合 ($WoodPc$) の3つの指標を用い、全世界を対象にした回帰式で地震の死者数 (K) を算出している。

$$\log(K) = 10.97\ln(PhExp40_{Eq.}) + 25.696U_g - 0.425\ln(WoodPc) - 17.344 \quad (2)$$

本研究では、これらの背景も踏まえながら津波に着目した新たな人的被害予測式を構築する。本研究で提案する式は、中央防災会議の被害想定手法^{7,8)}の考え方と Peduzzi¹²⁾らの式の回帰分析の方法を応用したものである。図1に研究のフローチャートを示す。2011年東北地方太平洋沖地震の被災地である福島県の浸水域内を対象として、さらに浸水域を死者が存在した地域と死者が存在しなかった地域の2つに分割し、分析を行う。各死者から非浸水地域に至るまでの避難経路別距離・標高推移の特性については、死者の具体的な情報が必要になるために、死者の住所が把握できている福島県を対象とした。具体的には、福島原子力発電所の事故による影響で福島県沿岸部の被災建物状況が把握されている地域である新地町、相馬市、南相馬市およびいわき市を対象とした。対象とした各市町村の死者数を表1に示す。

2.1 人的被害予測式の構築に用いたデータ

本研究では、津波による人的被害予測式の構築

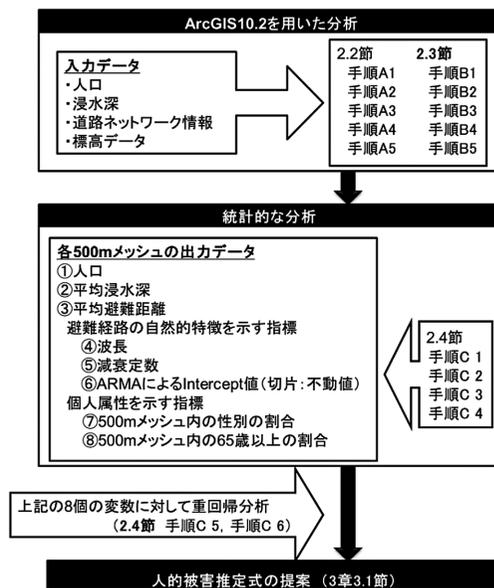


図1 研究のフローチャート

表1 死者数

地域名	新地町	相馬市	南相馬市	いわき市
死者数(人)	76	397	462	262

に向けて、空間的な分析には、ArcGIS10.2 (ESRI) (以下 ArcGIS と呼称) を用い、避難経路分析には、ArcGIS Network analyst (ESRI) を用いた。以下、使用したデータの概要を示す。

- 1) 福島県の平成22年国勢調査500 m メッシュ人口¹³⁾ (以下、500 m メッシュ人口と呼称) 国勢調査における人口は「常住人口」であり、すなわち、夜間人口と同等のものであり、昼間人口ではない。本データは、標準地域メッシュに基づく1/2地域メッシュ単位¹⁴⁾ごとに性別別5歳階級別の人口を集計したものである。
- 2) 2012年3月末までの福島県警による安否確認情報 (以下、安否確認情報と呼称) 福島県警が web サイト上で公開していた安否確認情報は、亡くなった方の名前、詳細な住所が含まれている。
- 3) 国土交通省による浸水域ポリゴン¹⁵⁾ (以下、

浸水域ポリゴンと呼称)

国土交通省の浸水域ポリゴンは、国土交通省都市局が作成したデータで、国土地理院による津波浸水範囲図や震災後の航空写真を参考に、どこまで津波が到達したのか(浸水範囲)について、現地確認に基づいて作成されたものである。

- 4) 復興支援調査アーカイブによる浸水5mメッシュ¹⁶⁾(以下、浸水5mメッシュと呼称)

国土交通省の都市局が、国土地理院の津波浸水範囲図や震災後の航空写真を基に現地確認を行い、どこまで津波が到達したかを把握したものを復興支援調査アーカイブに掲載している。

- 5) 国土地理院による数値地図(国土基本情報)の道路中心線¹⁷⁾(以下、道路ネットワークと呼称)

地図情報の位置精度は、都市域では縮尺2500分の1相当以上、その他の地域では縮尺25000分の1相当以上である。道路中心線はポリラインデータとして提供されているが、これをArcGIS Network Analystによってネットワークデータに変換して利用した。

- 6) 国土地理院による基盤地図情報数値標高モデル10m¹⁸⁾(以下、標高モデル10mメッシュと呼称)

国土地理院が基本測量として作成し、5000分の1及び10000分の1火山基本図の等高線から約10mメッシュの中心点の標高地を内挿処理により作成されたものである。

2.2 死者が存在した地域での分析

死者の情報としては、安否確認情報を用いた。福島県警がwebサイト上で公開していた安否確認情報は、亡くなった方の名前、詳細な住所が含まれているため、これを用いて死者の住所に基づく地形的な分析を行った。これは、福島県の新地町、相馬市、南相馬市およびいわき市の死者を対象とした標高に基づく避難経路別の距離・標高推移の特性分析を行ったものである。分析に使用したメッシュ数を表2に示す。以下に分析手順を示

表2 死者が存在する地域の対象メッシュ数

地域名	新地町	相馬市	南相馬市	いわき市
対象メッシュ数	18	21	75	34

す。

手順A1：福島県の安否確認情報を基に浸水域内で死者が存在した500mメッシュを抽出し、メッシュ内の人口を抽出する。

手順A2：死者の住所を避難のスタート地点と定義する。さらに、道路ネットワークを用い、浸水域と道路ネットワークの重なるポイントを抽出する(浸水域から抜け出す道路上の地点を意味し、すなわちゴール地点と考える)。これを図2(a)に示す。

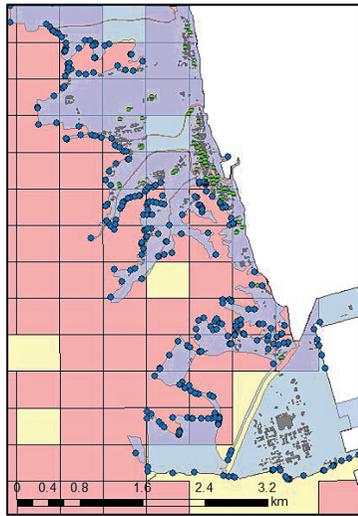
手順A3：福島県の安否確認情報と浸水域ポリゴンを基に、死者の住所における浸水深を特定する。

手順A4：道路ネットワークを通じて、ArcGIS Network Analystの最寄りの施設検出ツールを使用し、スタート地点からゴール地点に至るまでの避難経路の距離を算出する。また各死者に対応する避難経路に対して、標高モデル10mメッシュを用い、標高分布を抽出する。これを図2(b)に示す。

手順A5：2010年国勢調査を基に、死者が存在したメッシュ内の年齢と性別を整理する。

2.3 死者が存在しない地域での分析

2.2節の分析では死者を対象としたが、実際には浸水域内であっても死者が存在しない地域も存在する。今回は、津波による人的被害予測式を構築することを目的としているので、福島県の新地町、相馬市、南相馬市およびいわき市の浸水域全体を対象とし、浸水した地域で死者が存在しなかった地域でも2.2節と同様な分析を行う。図3にArcGIS上の例を示し、分析に使用したメッシュ



(a)



(b)

凡例

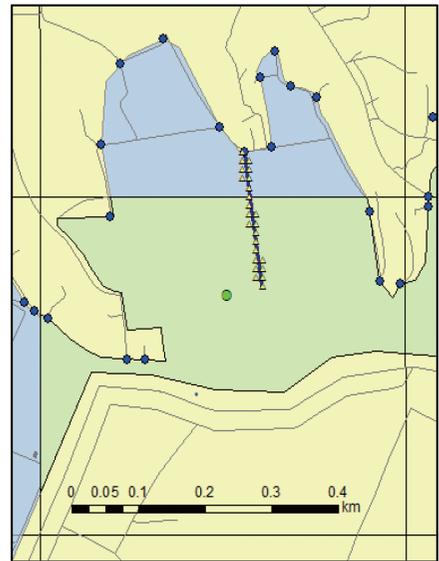
- 避難経路
- スタート地点 (死者住所)
- ゴール地点
- ▲ 標高
- 平成22年国勢調査500mメッシュ人口
- 浸水域
- 被災建物

図2 (a) ArcGISによる浸水域と平成22年国勢調査500mメッシュ人口の位置関係の例と (b) ArcGISによる死者住所からゴール地点までの避難経路上の標高分析例

数を表3に示す。以下に分析手順を示す。

手順 B1: 福島県の安否確認情報を基に浸水域内で死者のいない500mメッシュを抽出し、メッシュ内の人口を抽出する。

手順 B2: 2010年国勢調査と浸水域ポリゴンの重なる部分を抽出し、浸水域ポリゴンによって切り取られた500mメッシュに対して、重心ポイントを求め、



凡例

- 道路ネットワーク
- スタート地点
- ゴール地点
- ▲ 各避難経路に対する標高モデル
- 平成22年国勢調査500mメッシュ人口
- 浸水域
- 500mメッシュと浸水域が重なるエリア

図3 死者が存在しない地域のArcGIS上での分析例

表3 死者が存在しない地域の対象メッシュ数

地域名	新地町	相馬市	南相馬市	いわき市
対象メッシュ数	16	61	87	92

スタート地点と定義する。また、道路ネットワークを用い、浸水域と道路ネットワークの重なるポイントを抽出する（浸水域から抜け出す道路上の地点を意味し、すなわちゴール地点と考える）。ここで、ArcGIS上の分析により浸水域外に重心が設定されている箇所が数箇所あることに留意されたい。

- 手順 B3： 手順 B2の結果を基に、浸水 5 m メッシュを用いスタート地点の浸水深を抽出する。
- 手順 B4： 道路ネットワークを通じて、ArcGIS Network analyst の最寄りの施設検出ツールを使用し、スタート地点からゴール地点に至るまでの避難経路の距離を算出する。各避難経路に対して、標高モデル 10 m メッシュを用い、標高分布を抽出する。
- 手順 B5： 2010年国勢調査を基に、死者が存在しないメッシュ内の年齢と性別を整理する。

2.4 統計的な分析

ここでは、2.2節と2.3節で得られた避難経路別標高推移を、時系列解析で用いられている自己回帰移動平均 (ARMA) 過程を用いたモデルで定量化する。この避難経路別標高推移パターンに着目することで、標高特性の違いについて定量的に分類することが可能となる。さらに、この ARMA 過程を用いたモデルで表現した避難経路別標高推移は、等価な線形 1 自由度の振動系に置換できるので、物理的な意味がわかりやすい線形 1 自由度系の周期（本研究では空間を扱うので波長 L ）と減衰定数 h で表現する。以下にこの手順を示す。

- 手順 C1： 2.2節と2.3節で得られた結果を基に、非浸水地域に至るまでの避難距離、標高を整理する。
- 手順 C2： 各避難経路に対応する標高分布を次式 (3) の ARMA 過程でモデル化する。

$$y_n = \sum_{i=1}^m a_i y_{n-i} + v_n + \sum_{i=1}^l b_i v_{n-i} \quad (3)$$

ここに、 y_n は標高 (m)、 v_n は $N(0,1)$ のホワイトノイズ、 m 、 a_i はそれぞれ自己回帰の次数と自己回帰係数、 l 、 b_i はそれぞれ移動平均の次数と移動平均係数である。この他に ARMA 過程の係数算出時に Intercept 値 (切片：不動値) も算出される。今回は、自己回帰の次数を 2、移動平均の次数を 2 とし、2 次の ARMA 過程を用いる。

- 手順 C3： 手順 C2で得られた結果を 1 自由度の振動系でモデル化し、式 (4) を用いて線形 1 自由度系の周期に対応する波長 L と減衰定数 h を定める。

$$\lambda^2 + a_1 \lambda + a_2 = 0$$

$$\left. \frac{\lambda}{\lambda^*} \right] = \exp \left(\frac{-2\pi h x}{L} \pm \frac{-2\pi \sqrt{1-h^2} x}{L} \right) \quad (4)$$

ここで、 a_1 、 a_2 は式 (3) によって得られた自己回帰のパラメータ、 x はデータサンプリング間隔 (10 m)、 λ 、 λ^* は共役複素数を示す¹⁹⁾。

- 手順 C4： 死者が存在する地域では、人口、浸水深、避難距離、波長 L 、減衰定数 h および 2 次の ARMA 過程による Intercept 値に対して、各 500 m メッシュ内の平均値を求める。死者が存在しない地域においては、死者が存在した地域と同様に、波長 L と減衰定数 h 、人口、浸水深、避難距離、波長 L 、減衰定数 h および 2 次の ARMA 過程による Intercept 値を整理する。図 4 に実際の避難経路、ARMA により実際の避難経路を数値化した結果と避難経路の特徴を示す。ここで、算出された波長 L と減衰定数 h は、具体的には、避難経路の起伏の激しさと地形の上り下りに対応すると考えられる。Intercept 値は陸地の方が海岸の標高よりも高い傾向にある場合に正の値を取る場合が多い。

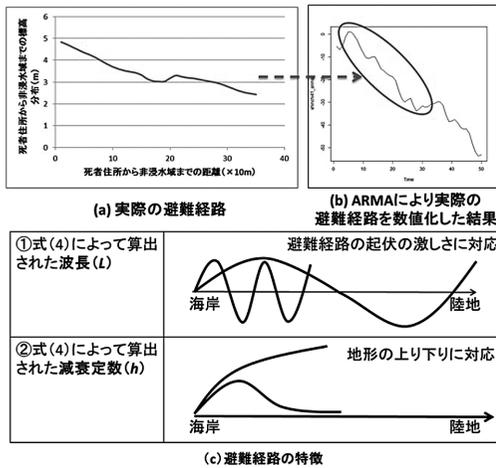


図4 統計的な分析によって求めた避難経路の特徴

手順 C5: 各市町において、各500 m メッシュに定まる平均人口、平均浸水深、平均避難距離、波長 L 、減衰定数 h 、2 次の ARMA による Intercept 値、500 m メッシュ内の男性の割合および500 m メッシュ内の65歳以上の割合の8つの変数に対して重回帰分析を行う。

手順 C6: 最終的に、以下の式(5)に示す回帰式が提案できる。

$$D = a_1 P + a_2 x_1 + a_3 x_2 + a_4 x_3 + a_5 x_4 + a_6 x_5 + a_7 x_6 + a_8 x_7 + C \quad (5)$$

ここで、 D は500 m メッシュ内の死者数、 P は500 m メッシュ内人口を示し、 x_1 は500 m メッシュ内の平均浸水深 (m)、 x_2 は500 m メッシュ内の平均避難距離 (m)、 x_3 は500 m メッシュ内の平均波長 (L)、 x_4 は500 m メッシュ内の平均減衰定数 (h)、 x_5 は500 m メッシュ内の平均 Intercept 値 (切片: 不動値)、 x_6 は500 m メッシュ内の男性の割合、 x_7 は500 m メッシュ内の65歳以上の割合、 C は定数を示す。

3. 結果と考察

3.1 人的被害予測式について

(1) 手法について

本研究では、まず死者全員が自宅にいて亡くなったと仮定し、非浸水域に至るまでの分析から得られた結果を基に回帰式を構築した(表4)。しかし、実際には全員が自宅で亡くなったとは限らない。特に死亡率の高かった高齢者に関しては、小山ら²⁰⁾は内閣府の国民生活白書による時間帯および属性別起床在宅率における平日14時ごろの専業主婦の在宅率から、高齢者の在宅率が専業主婦と同様かそれ以上である可能性を指摘している。また金井ら²¹⁾は、岩手県釜石市の全世帯を対象としたアンケート調査で、自宅外へ避難することなく、自宅で被災した人が約58%であったと述べている。すなわち、実際の死者数とは、異なる場合も考えられるという点には留意する必要がある。また、今回使用した国勢調査における人口は「常住人口」であり、すなわち、夜間人口と同等のものであり、昼間人口ではない。しかし、東日本大震災は実際には日に発生したため、本来ならば昼間人口を利用して死亡率を算出するべきである。そのため、平成22年国勢調査による市区町村別昼夜間人口について検討を行った。昼間人口とは、常住市区町村人口から他市町村への通勤通学人口を除き、他市区町村からの通勤通学人口を加えたものである。福島県新地町、相馬市、南相馬市およびいわき市の夜間人口に対する昼間人口の比率は、新地町(89.3%)、相馬市(100.1%)、南相馬市(99.5%)、およびいわき市(99.5%)となり、100%以下の市区町村が多いものの、100%を超えている地域も存在し、全体的に見るとその差はそれほど大きくはない。これを踏まえると、多くの地域で夜間人口より昼間人口の方が少ないため、本研究で使用した人口は、昼間人口で算出したものよりも若干低く見積もられているものと考えられる。

今回の重回帰分析によって提案する式は、中央防災会議の被害想定手法と Peduzzi らの式を応用したものである。500 m メッシュ内の死者数を、地形的特徴の指標として取り上げた避難経路別の波

長、減衰定数および Intercept 値と避難経路の距離、浸水深、500 m メッシュ内人口、また、地域の人口構成を示す指標として取り上げた性別の割合と65歳以上の割合の8つの変数で表現した。福島県の浸水地域である新地町、相馬市、南相馬市およびいわき市において、式(5)を用いた人的被害予測式の結果を表4に示す。また、本研究で構築した人的被害予測式で算出した500 m メッシュ内の死者数(●印と■印)と中央防災会議の式を用いて算出した500 m メッシュ内の死者数(×印)を比較した結果を図5に示す。まず図5の●印は、表4の式を基に500 m メッシュ内の死者数を算出したものであるが、どの地域においても予測死者数が10人程で予測値が頭打ちになっていることが分かる。この原因として、死者10人以上のデータ数が十分に揃っていないことや、死者発生の傾向がここを境に異なってくる可能性があることなどが考えられる。したがってここでは、各地域において、予測死者数が10人超のデータのみを取り出し、再度重回帰分析(式(5)と同じ形)を行った。最終的に $D \leq 10$ の結果と $D > 10$ の結果を合わせて死者数を算出したものが図5の■印である。その結果を示したものが表5である。すなわち、予測された死者が10人以下の場合は表5の各地域の上段の係数を用い、予測された死者が10人超の場合は表5の各地域の下段の係数を用いることになる。また、表4と表5に関して、想定した有意水準を超えるP値を有する説明変数が散見されるが、全体を通してみた場合には、9つの説明変数のうち地形要因を含む5つの説明変数が有意として判断されており、またこれらはずつか4つのサンプル地域を対象とした結果である。さらに、Yun²²⁾らの論文では、東日本大震災で得られた情報を基に、津波による死因に影響を及ぼす要因について分析を行っており、年齢と避難開始時間が大きな影響を及ぼすとの指摘がある。よって本研究では、現時点では有意と判断されない説明変数を含め、当初より想定していた説明変数9つで回帰式を構成することとした。予測死者算出のフローを図6に示す。

次に、実際の死者数と本研究で構築した人的被

害予測式で算出した死者数にどれほどの差異が存在するのかを評価するために、平均予測誤差(人) E_a を求める式を以下のように定義する。

$$E_a = \frac{1}{N} \sum_i^N |Y_{ai} - y_{ei}| \quad (6)$$

ここで、 N はメッシュ数、 Y_{ai} 、 y_{ei} はそれぞれ500 m メッシュ内における実際の死者数と本研究で構築した人的被害予測式で算出した死者数を示す。図5中の表は、 E_a は式(5)を用いた予測死者数と実値の平均予測誤差、 E_{ac} は中央防災会議を用いた死者数と実値の平均予測誤差を示す。各地域の結果も、福島県全域(4市町)の結果も、ともに中央防災会議の式で算出した予測誤差を大きく下回っていることがわかる。中央防災会議の式は、東北地方太平洋沖地震の死者数において、被災地全体で約2,700人と想定していたが、実際にはその約7.6倍にあたる死者が発生し、実際の災害のレベルとは大きく異なっていたという事実^{23,24)}からも判断できるように、今回提案する式は、中央防災会議の式よりも高い精度で死者数を評価できるものと考えられる。

(2) 人的被害予測式と地形的特徴の関係

さらに、上記の結果より、地域によって人的被害予測式(表4と表5)に差異がみられる。この違いの原因として、地形の差異が考えられる。ここでは、地形の影響を考える際に、著者らの論文¹⁾で取り上げた「地形による地域区分」を基に考察を加える。地形による地域区分とは、ArcGIS場での標高と基本単位区の領域から、目視によって4市町をさらに小さい地域区分に分割したものである。それを、福島県における「地形による地域区分」として、北から新地町2、新地町1、相馬市2、相馬市1、南相馬市6、南相馬市5、南相馬市4、南相馬市3、南相馬市2、南相馬市1、いわき市12、いわき市11、いわき市10、いわき市9、いわき市8、いわき市7、いわき市13、いわき市6、いわき市5、いわき市4、いわき市3、いわき市2、いわき市1の23地域に区分した。図7に上記の23地域の地形を示す。横軸は「地形による地域区分」

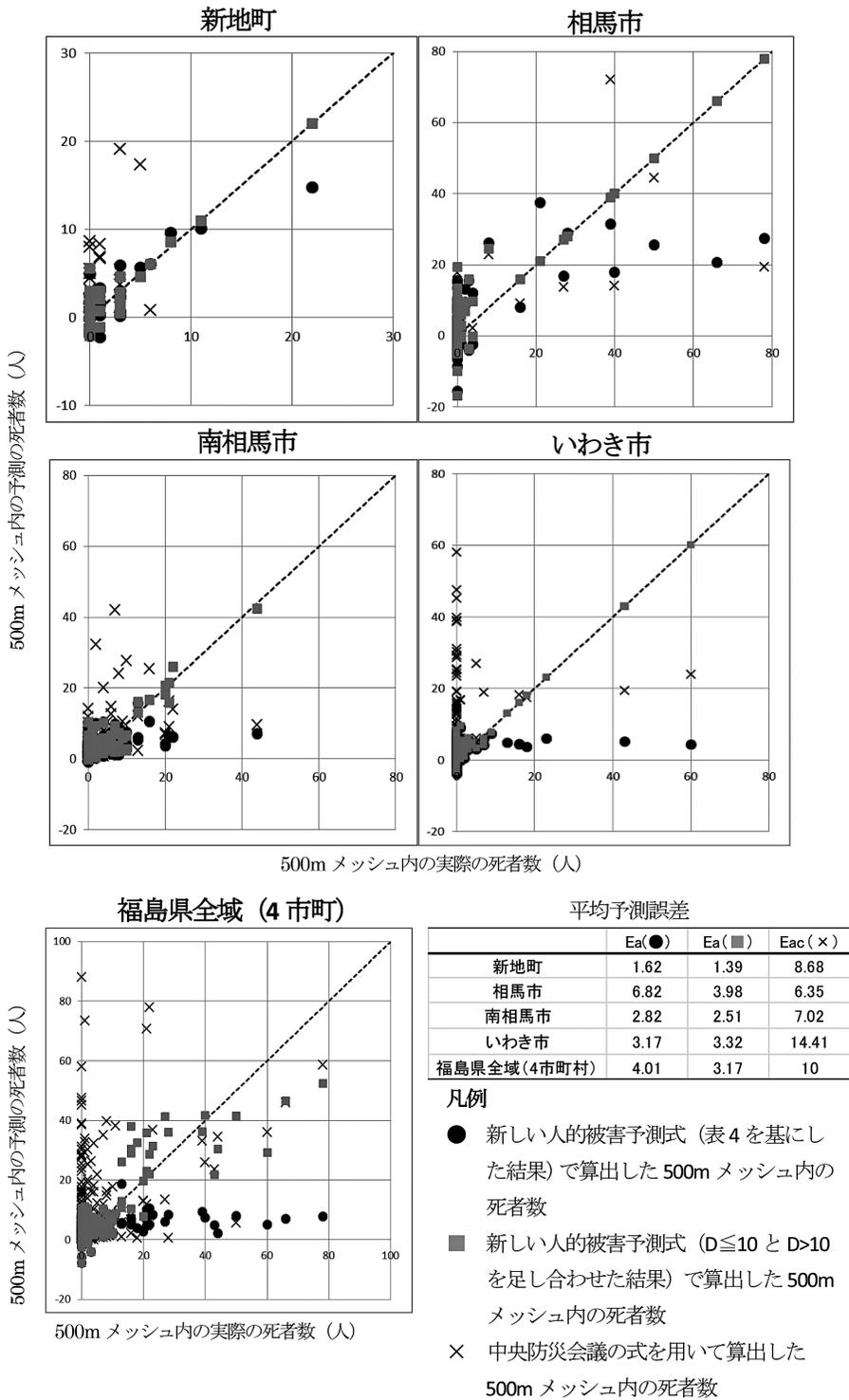


図 5 人的被害予測式の結果

表4 人的被害予測式(式(5))の結果

新地町					相馬市				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)		Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
人口	0.030150	0.005623	5.363000	0.000017***	人口	0.054310	0.010750	5.052000	0.000004***
平均浸水深	0.695800	0.238100	2.923000	0.007450**	平均浸水深	0.533500	0.499100	1.069000	0.288970
平均避難距離	0.000663	0.003701	0.179000	0.859290	平均避難距離	0.021580	0.006413	3.365000	0.001270**
平均 Intercept 値	-0.030340	0.139900	-0.217000	0.830100	平均 Intercept 値	-0.226400	0.288100	-0.786000	0.434870
平均波長	0.000030	0.000015	2.053000	0.051140+	平均波長	-0.000026	0.000153	-0.171000	0.864840
平均減衰定数	-0.085590	0.117800	-0.727000	0.474510	平均減衰定数	-0.060480	0.207100	-0.292000	0.771190
男性の割合	0.001148	0.006762	0.170000	0.866580	男性の割合	0.121700	0.171700	0.709000	0.480820
65歳以上の割合	0.032870	0.035190	0.934000	0.359650	65歳以上の割合	0.105700	0.103600	1.020000	0.311380
定数	-4.517000	1.711000	-2.640000	0.014360*	定数	-15.740000	8.919000	-1.765000	0.082120+

南相馬市					いわき市				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)		Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
人口	0.033529	0.007930	4.228000	0.000043***	人口	0.001476	0.002158	0.684000	0.495390
平均浸水深	0.462083	0.180806	2.556000	0.011700*	平均浸水深	1.359000	0.477000	2.849000	0.005290**
平均避難距離	0.001875	0.002047	0.916000	0.361300	平均避難距離	-0.000086	0.002423	-0.035000	0.971780
平均 Intercept 値	-0.011047	0.089265	-0.124000	0.901700	平均 Intercept 値	-0.378500	0.249400	-1.518000	0.132120
平均波長	0.000495	0.000523	0.947000	0.345200	平均波長	-0.000004	0.000362	-0.012000	0.990670
平均減衰定数	0.000349	0.000998	0.350000	0.727100	平均減衰定数	0.042710	0.056310	0.759000	0.449860
男性の割合	-0.018507	0.050049	-0.370000	0.712100	男性の割合	-0.126600	0.149500	-0.847000	0.399040
65歳以上の割合	0.009574	0.008494	1.127000	0.261700	65歳以上の割合	-0.000129	0.028850	-0.004000	0.996440
定数	-0.810978	2.743391	-0.296000	0.768000	定数	7.105000	7.552000	0.941000	0.348970

福島県全域(4市町)				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
人口	0.005791	0.001931	2.999000	0.002900**
平均浸水深	0.704900	0.174200	4.047000	0.000064***
平均避難距離	0.003337	0.001758	1.898000	0.058400+
平均 Intercept 値	-0.242800	0.092700	-2.619000	0.009200**
平均波長	0.000001	0.000040	0.029000	0.976900
平均減衰定数	0.000451	0.001584	0.284000	0.776200
男性の割合	-0.009686	0.012610	-0.768000	0.443000
65歳以上の割合	0.003878	0.011640	0.333000	0.739200
定数	0.766400	1.303000	0.588000	0.556000

***P<0.001, **P<0.01, *P<0.05, +P<0.1

表5 各地域における係数

係数		a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	C
		(人口)	(平均浸水深)	(平均避難距離)	(平均 Intercept 値)	(平均波長)	(平均減衰定数)	(男性の割合)	(65歳以上の割合)	(定数)
新地町	D ≤ 10	0.0302***	0.6958**	0.0007	-0.0303	0.00003+	-0.0856	0.0011	0.0329	-4.5170*
	D > 10	-	-	-	-	-	-	-	-2.6650	97.6240
相馬市	D ≤ 10	0.0543***	0.5335***	0.0216**	-0.2264	-0.00003	-0.0605	0.1217	0.1057	-15.7400*
	D > 10	0.1782	-40.6152***	-0.0619	-99.7969	-0.0140	0.2662	3.8122	2.3065	-133.4540
南相馬市	D ≤ 10	0.0335***	0.4621*	0.0019	-0.0110	0.0005	0.0003	-0.0185	0.0096	-0.8110
	D > 10	0.2411	0.8168	-0.0219	1.0842	-0.0025	-0.8617	1.1306	0.0381	-59.5698
いわき市	D ≤ 10	0.0015	1.359**	-0.0001	-0.3785	-0.000004	0.0427	-0.1266	-0.0001	7.1050
	D > 10	-	-39.2030***	-0.4111	42.0880	-0.0912	43.9320	-	23.1737	-733.7588
福島県全域 (4市町村)	D ≤ 10	0.0058**	0.7049***	0.0033+	-0.2428	0.000001	0.0005	-0.0097	0.0039	0.7664
	D > 10	0.0099	-1.8641***	0.0386	0.1713	-0.0017	-2.2986	-0.1067	-0.0111	33.1758

*** P<0.001, **P<0.01, *P<0.05, +P<0.1

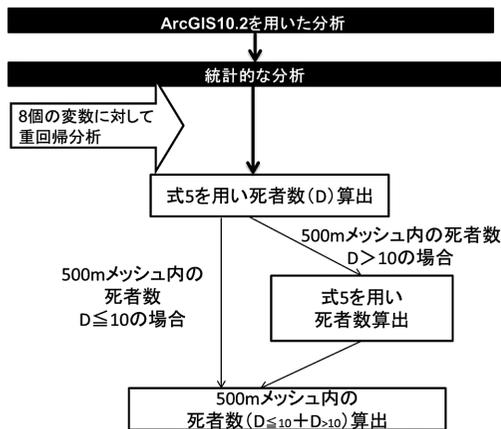


図6 予測死者数算出のフロー

の標高モデル10 m メッシュを低い方から昇順に並べたものであり、縦軸は標高を示す。ここで横軸は、ある特定の断面図を示したものではないものの、「地形による地域区分」の地域全体を対象とした標高特性を示したものと位置づけられる。図中で示された線の傾きが小さければ、海岸から平坦な地形で高台に向かうような地形であることを意味し、傾きが大きければ海岸から急激な標高上昇で高台に向かうような、急峻な地形を有していることを意味する。したがって、地形特性と今回の津波による人的被害予測式の関係は、新地町は、緑線で示すように、リアス式海岸のような地形を有している地域での人的被害予測が可能であると考える。一方で、赤線で示す相馬市は、比較的海岸線から遠くなるにつれて、徐々に標高が上昇する地域を有する場所において人的被害予測が可能である。さらに、南相馬市といわき市(図7:それぞれ青線と橙線)の人的被害予測式は、リアス式海岸のような地域と平野を有する地域の両方を含んだ地域の式として利用できるものと考えられる。

4. おわりに

既往の研究では取り上げられていなかった、各死者の住所と非浸水地点に至るまでの避難経路に対する標高と距離分析を行い、時系列解析で用いられている ARMA 過程を採用することにより、

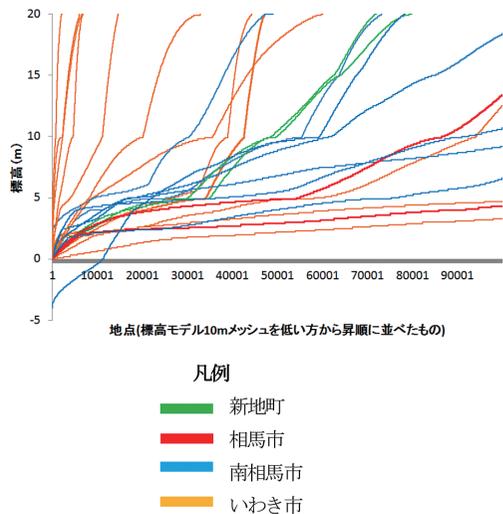


図7 地形による地域区分ごとの標高特性

地形要因を定量化するとともに、個人属性を表す年齢と性別を組み込んだ式を提案することができた。

死者数を算出できる精度の高い式が構築されれば、被害を予測し、災害に対してどこが弱点となるのか、それをどのように克服すれば災害に対する強靱な社会が築けるのかを明らかにすることに繋がる。今回提案した式は、人口、浸水深、道路ネットワーク情報および標高データを入力することで、県レベル、または市町村レベルで各500 mメッシュ内の死者数を算出することができる。これまでより、地域の状況を具体的に表現できる指標を取り入れた式で、人的被害を予測することが可能になったものと考えられる。すなわち、表5と図7から、県レベル、市町村レベルで各地域の地形特性ごとに人的被害予測式を使い分けることが可能となり、この結果を利用することで、他の地域に対しても、人的被害が推定できるような予測手法が提案できた。今後はさらにその精度を高めるべく、東北地方太平洋沖地震で被害を受けた岩手県、宮城県や2004年スマトラ沖地震などの海外の事例に対しても同様な方法で分析を行う予定である。

参考文献

- 1) 四井早紀・小山真紀・古川愛子・清野純史：東日本大震災における福島県内市町村を対象とした避難ルート特性と死亡率の分析，地域安全学会論文集 No.27, pp.85-93, 2015.
- 2) 阿部雅人・藤野陽三：自然災害リスクの特性に関する統計的分析，土木学会論文集 A Vol. 64, No. 4, pp.750-764, 2014.
- 3) EM-DAT, <http://www.emdat.be/>, 2016年9月1日
- 4) 国際連合国際防災戦略 (UNISDR), <概要> 世界報告書 災害リスクの軽減に向けて－開発に課せられた課題－, http://www.undp.or.jp/publications/pdf/RDR_ES_J.pdf, 2017年3月1日
- 5) E, So.: Estimating Fatality Rates for Earthquake Loss Models, SpringerBriefs in Earth Sciences, 2016
- 6) 警察庁：東日本大震災と警察, <https://www.npa.go.jp/archive/keibi/syouten/syouten281/pdf/ALL.pdf>, 2017年3月1日
- 7) 内閣府：南海トラフの巨大地震 建物被害・人的被害の被害想定項目及び手法の概要 http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/2_2.pdf, 2017年3月1日
- 8) 信岡尚道・鍋谷泰之・住岡直樹・北野利一：極値統計法に基づく極低頻度までを対象とした津波リスクマップの基礎的研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.1351-1355, 2013.
- 9) 河田恵昭：大規模災害による人的被害予測，自然災害科学 JJSNDS 16-1, pp.3-13, 1997.
- 10) A, Suppasri, N, Hasegawa, F, Makinoshima, F, Imamura, P, Latcharote and S, Day.: An analysis of fatality ratios and the factors that affected human fatalities in the 2011 Great East Japan Tsunami, Earthquake Engineering, a section of the Journal, 2016.
- 11) 今井健太郎・今村文彦・岩間俊二・サッパシーアナワット：人的・物的軽減に向けた実用的な津波ハザード・被害予測評価手法の提案，自然災害科学 JJSNDS33特別号1-12, 2014.
- 12) P. Peduzzi, H. Dao, C. Herold, and F. Mouton: Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: the Disaster Risk Index, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, pp.1149-1159, 2009.
- 13) 総務省統計局，福島県の平成22年国勢調査500mメッシュ人口, <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2010/>, 2017年3月1日
- 14) 総務省統計局，地域メッシュ統計の特質・沿革，標準地域メッシュに基づく1/2地域メッシュ単位, <http://www.stat.go.jp/data/mesh/pdf/gaiyo1.pdf>, 2017年3月1日
- 15) 復興試験アーカイブ，国土交通省による浸水域ポリゴン, <http://fukkou.csis.u-tokyo.ac.jp/dataset/show/id/1110>, 2017年3月1日
- 16) 復興支援調査アーカイブ，浸水5mメッシュ, <http://fukkou.csis.u-tokyo.ac.jp/>, 2017年3月1日
- 17) 国土地理院，数値地図 (国土基本情報) の道路中心線, <http://www.gsi.go.jp/kibanjoho/kibanjoho40027.html>, 2017年3月1日
- 18) 国土地理院，基盤地図情報数値標高モデル10m, <http://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php#>, 2017年3月1日
- 19) 土岐憲三・佐藤忠信・清野純史・若林治郎：統計的手法による模擬地震波の最大加速度と断層の位置との関係について，京都大学防災研究所年報 B, 京都大学防災研究所, pp.1-11, 1985
- 20) 小山真紀・石井儀光・三谷智子・吉村晶子：東北地方太平洋沖地震における浸水域と死者発生状況について，地震工学研究発表会講演論文集 31巻, 論文番号5-130, 2011.
- 21) 金井昌信・片田敏孝：“津波から命を守るための教訓”の検証～岩手県釜石市を対象とした東日本大震災における津波避難実態調査から～，災害情報 No.11, pp.114-124, 2013.
- 22) N.Y. Yun and M. Hamada: Evacuation Behavior and Fatality Rate during the 2011 Tohoku-Oki Earthquake and Tsunami, Earthquake Spectra, Volume 31, No.3, p1237-1265, August 2015.
- 23) インターリスク総研，東日本大震災特集 < No.13 > 東日本大震災を教訓とした地震、津波対策の見直しについて－中央防災会議専門調査会報告から－, 2011.
- 24) 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，従来の被害想定と東日本大震災の被害 (概要), 資料 5, 2011.

(投稿受理：平成29年4月6日)

訂正稿受理：平成29年7月13日)

要 旨

国・社会・地域が自然災害の「リスク」を判断する際には、その自然災害によって生じる「死者数」が有用な指標の一つとして用いられる。この死者数を算出するためには、被害を予測する地域の状況を正確に表現できる予測式が必要となる。これまで地震や津波が起きる可能性が低いと考えられていた地域においてすら、様々な自然災害が発生している現状を考えると、人的被害予測式に関する検討は、安心安全な社会を構築する上で不可欠な課題である。本研究の目的は、津波による人的被害低減に向けた検討を推進し、そのグローバルモデルの構築を目指すことであるが、ここではその第一段階として、データが揃っている日本の代表的な津波被害、すなわち2011年東北地方太平洋沖地震を対象とした人的被害予測式の提案を行う。まず、福島県の市町村の死者を対象とした「避難経路別距離・標高推移の特性分析」を行い、その特性を地形的要因として定量表現する。さらに上述の特性分析で得られた地形的要因に加え、個人属性を表す年齢と性別を組み込んだ式を新たに提案する。最終的に、地形的特徴の指標として取り上げた避難経路別の波長、減衰定数および Intercept 値と避難経路の距離、浸水深、500 m メッシュ内人口、また、地域の人口構成を示す指標として取り上げた性別の割合と65歳以上の割合の8つの変数で、500 m メッシュ内の死者数算出することができた。