

東北地方太平洋沖地震津波の人的被害に関する 地域間比較による主要原因分析

A Preliminary Critical Causal Analysis on the Mortality
Caused by the 2011 East Japan Earthquake Tsunami

鈴木 進吾¹, 林 春男¹

Shingo SUZUKI¹ and Haruo HAYASHI¹

¹ 京都大学防災研究所

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

The tsunami accompanied by the 2011 East Japan Earthquake Disaster killed many people in the 37 municipalities of Iwate, Miyagi and Fukushima Prefectures. Inundated areas' topography, exposure, estimated tsunami and demographic change is vary considerably from one region to another. This paper analyzes the causes of the mortality rates of each municipality comparing those inundated area's characteristics where similar height of tsunami attacked. As the result of this preliminary analyses, we found the municipalities whose mortality rate were higher than others in proportion as tsunami height. And we also found the potential field investigation sites where we should intensive field survey on the critical cause of damage.

Keywords: FORIN, mortality rate, the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami, field investigation

1. はじめに

2011年3月11日14:46（日本時間）、三陸沖から房総沖にかけての日本海溝で発生した我が国の地震史上最大規模となるマグニチュード9.0の東北地方太平洋沖地震は、東北から関東にいたる太平洋沿岸の広範囲にわたって巨大な津波を発生させ、特に岩手、宮城、福島各県の沿岸市町村に氾濫し未曾有の被害をもたらす結果となった。

東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ（2011）がこの津波の浸水高および遡上高を計測しまとめた2011年5月10日現在の速報値によると、来襲した津波の高さは、岩手、宮城、福島各県の沿岸37市町村のうち、半数に上る18の市町村で20mを越え、そのうちの6市町村では30mを越えるものであった。津波高が10m以下にとどまったのはわずか5市町村だけであった¹⁾。この広域にわたる巨大な津波により発生した死者および行方不明者数は、各県の災害対策本部が2011年5月14日現在でまとめたところによると、宮城県石巻市が最も多く5,734名であったのをはじめとして3県37市町村で24,015人に上った²⁾³⁾⁴⁾。

この東北地方太平洋沖地震津波災害（東日本大震災）の特徴として、広域にわたって多数の市町村が同じ地震津波により同時に被災したことがあげられる。それぞれの市町村は、異なった位置にあり、異なった海岸地形条件を持っており、また、居住地、人口、住まい方や津波に対する知識・意識、自治体の津波対策状況も多様であ

ると考えられる。そして、このような事情が少なからずそれぞれの自治体での被災過程に影響を及ぼし、次章以降で詳述するが、この災害における各市町村ごとに計算した市町村人口に対する死者・行方不明者の割合が、0%であった岩手県洋野町から、岩手県大槌町や宮城県女川町では10%を超えるなど、市町村によって大きく異なる結果となったと考えられる。

このような今回の震災の特徴を考えると、被災地域の被災過程に影響を及ぼす様々な条件の差異が、どのように最終的な人的被害率に影響したかを、多分野、多方面から多角的に検証することが、この災害による教訓を得るために重要となる。そこでは、たとえば、津波高は軒並み高くなったが、湾の地形や陸地の地形条件によって、津波の流速が緩和されたり、あるいは逆に勢いが増した地域はないか、平地と急傾斜地での被害率に差はないか、津波防波堤や防潮堤はどのように破壊され、あるいは、どのように機能したか、ほとんどの市町村では想定されていた津波を超える事態となったが、そのような事態において、被害が急激に拡大した地域、あるいは被害が抑えられた地域はないか、それにはどのような要素が効いていたかなどの問いについて調査することになる。今回の被災地域がどのように再生するか、また、将来別の場所で発生する同様の津波において同様の被害拡大を繰り返さないためには、今回被災したそれぞれの地域での様々な因果関係に関する分析を行い、被害の差が生じる

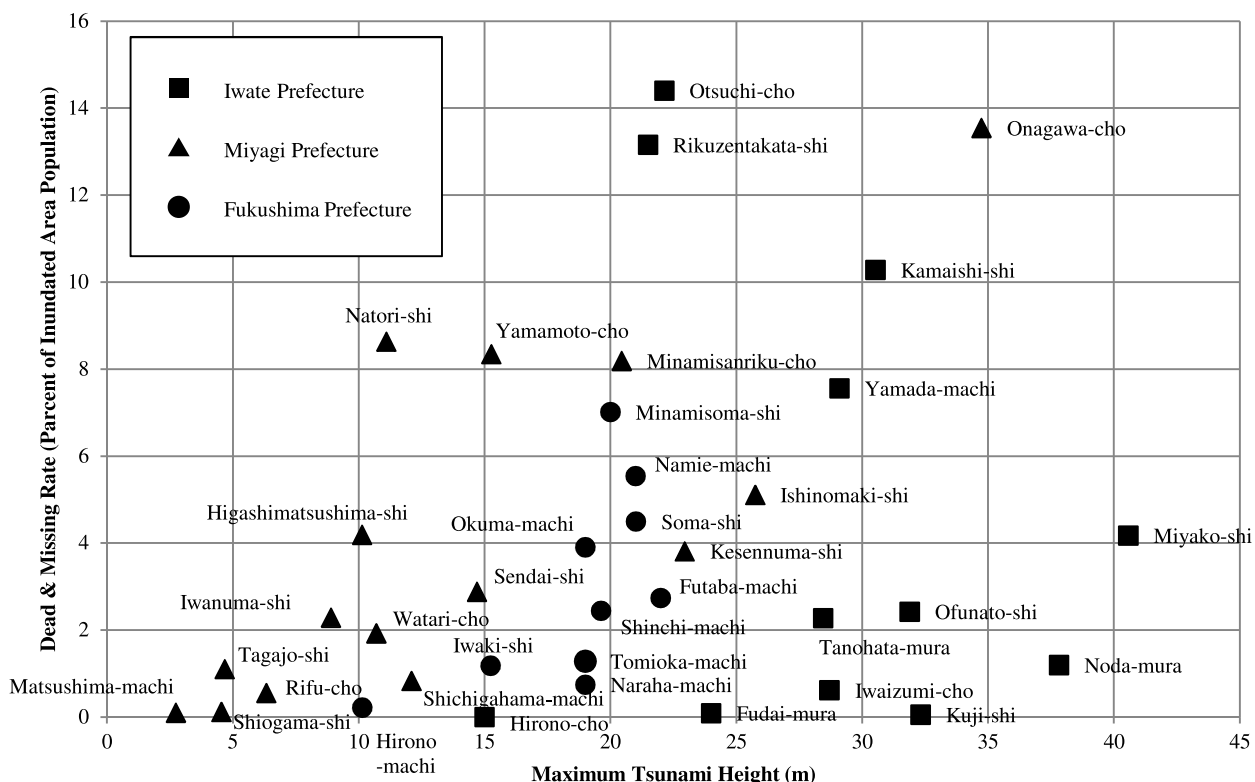


図1 各市町村の最大津波高さと浸水域内死者・行方不明者率

に至った大きな原因を同定し、その因果関係を一般化していくことが、重要であると考えられる。

2008年に国際科学会議（ICSU）は「科学は進んでも災害被害が減らないのはなぜか」を科学的課題として、国際社会科学会議（ISSC）、国連防災統合戦略（UNISDR）と共催で、「災害リスク統合研究（IRDR：Integrated Research for Disaster Reduction）」を立ち上げた。IRDRでは、現在、大規模な災害後の調査が特定の分野に集中しがちで、災害の全容を明らかにして災害の根本的原因まで深く掘り下げられることは稀であるという状況に対して、防災の統合的なアプローチの実践研究例として、

「災害の科学捜査（FORIN: Forensic Investigations）」を提案した。これは、過去に起きた実際の災害事例をとりあげ、防災関連の理工学分野、人文・社会科学分野および生命科学分野の連携によって、なぜそのような災害が発生したのかの原因を明らかにし、将来の災害発生を未然に防ごうとするもので、各分野が協力して、災害の発生原因調査にあたって活用する標準的な問診票を作成している。

本研究では、FORIN手法を用いて東日本大震災の検証を行うための、被災地域で発生したハザードと被害の関係およびそれに関係した地域の諸条件に関する基礎的な知見を得ることを目的として、津波外力と人的被害率及びいくつかの条件指標について、その関係性を調べる。そして、今後詳細に比較して調査すべき地域に関する検討を行う。具体的には、まず、市町村ごとに被害程度を特定し、それをもたらしした主要原因としてハザードを設定して、ハザードと被害の関係の分析を行う。そして、同程度のハザードが発生している市町村群を特定し、その市町村群の中で特に被害率が異なる結果となった市町村群を抽出し、この被害率の差異をもたらしした主要原因として、リアス式海岸や平地などといった海岸における津波の特性に関わる、あるいは避難の困難性に関わる地

形的条件を表す指標（自然条件）、津波によって浸水した地域の広さやそこに居住していた人口の多さを表す指標（曝露条件）、各県がこれまで想定してきた津波高など津波に対する備えに関わる指標（防災対策条件）、および、津波によって浸水した地域のこれまでの人口変動状況を表す指標（社会条件）を仮定して、これらから被害率の差を生み出すことになった要因を検討する。

2. 津波高と人的被害率の関係分析

まず、地域間比較を実施するために、津波強度（ここでは津波高さを津波強度にとる）と人的被害率の関係について分析する。津波高さ及び人的被害率にはいくつかの種類が考えられるが、ここでは、下記のものを算出して用いる。

- ・最大津波高さ
- ・平均津波高さ
- ・市町村人口に対する人的被害率
- ・浸水域人口に対する人的被害率

津波高さについては、東北地方太平洋沖地震合同調査グループ（2011）によって沿岸各地での津波高さが測量されているので、この測量結果データを利用するが、執筆時点現在では速報値であることに注意されたい。また、南相馬市の南半分、浪江町、双葉町、大熊町、富岡町、楡葉町では立ち入りが制限された福島第一原子力発電所から20kmの圏内になっているためこれらの市町村では測量データがない。そこで、この各地域においては、国土地理院（2011）が作成した浸水範囲概況図を利用して、浸水域境界付近の標高を50mメッシュ標高から一定間隔でとり、それを津波高（参考値）とした⁵⁾。

一方で、人的被害率については、市町村人口と浸水域

人口に対する死者・行方不明者数の割合を用いている。ここで、市町村人口は総務省統計局による 2010 年国勢調査人口速報による市町村人口⁶⁾を、浸水域人口も同じく総務省統計局が算出した国土地理院（2011）による浸水範囲概況に重なる国勢調査の基本単位区の人口集計結果⁷⁾を使用した。死者・行方不明者は岩手・宮城・福島各県の災害対策本部発表の 5 月 14 日 18 時現在の市町村別死者数、行方不明者数を使用した²⁾³⁾⁴⁾。ここで、仙台市については、海岸部から山間部まで広域にわたることと、人口が多いことから、本来は区ごとに取り扱うのが適当である。しかしながら、市人口に対する死者・行方不明者率等、市全体の値に対する指標等については過小評価する恐れがあるが、区ごとでの死者・行方不明者は公開されていないこともあり、本論文では仙台市で一市町村として全区を合計して分析している。

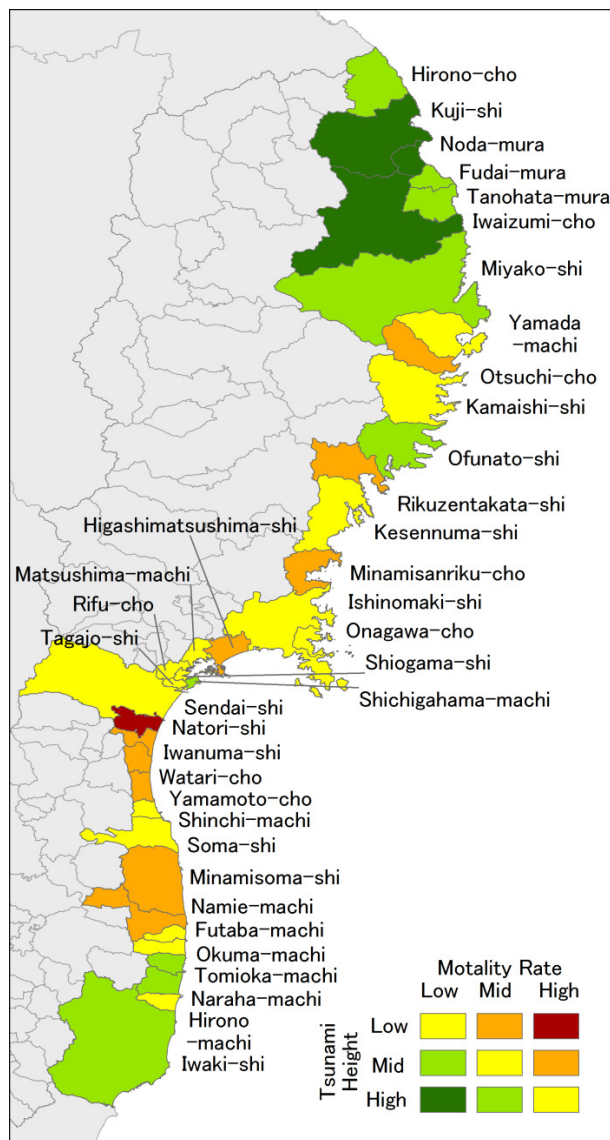
各市町村の津波高さと人的被害率の関係をプロットしたものを図 1 に示す。市町村内の最大津波高が高くなるにつれて浸水域内人口に対する人的被害率は大きくなる傾向がある。その傾向から逸れて、津波高に対して人的被害率が大きくなっているのは、大槌町、陸前高田市など岩手県中南部の一部、名取市、山元町など宮城県平野部の一部である。反対に、津波高に対して人的被害率が小さかったのは、宮古市、野田村、久慈市など岩手県北部が多かった。

また、それぞれの市町村を津波高（最大津波高）と人的被害率（浸水域人口に対する死者・行方不明者率）の高低で 3 段階に分け、地図上に色分けで示したのが図 2 である。津波高は比較的低かったのに対して人的被害率が大きかった市町村を赤、橙で、津波高は高かったが人的被害率は低かった市町村を緑で表示した。黄色は今回の津波で被災した岩手・宮城・福島の沿岸市町村の中では、比較的津波高に応じた被害率となった市町村を示している。それぞれの高低による分類は Jenks⁸⁾の自然分類を利用した。この分類方法については 3.(6)で説明する。これによると、名取市が、津波高に対して被害率が大きくなったことがわかる。また、仙台平野の市町村や相双地区、南三陸、陸前高田、大槌といった市町村で津波高に対して被害率が比較的高かった。一方で、岩手県北部沿岸の自治体や大船渡市、福島県南部沿岸の自治体で津波高に対して比較的被害率が抑えられた。この傾向は特に岩手県久慈市、野田村、岩泉町で顕著であったことがわかる。

3. 被害率の差異が生じた主要原因の分析のための評価指標の導入

前章の結果、津波高に対して、被害率が大きい地域、被害率が小さい地域があることが分かった。このように人的被害に大きな差が生じる原因となったものには、避難行動の成否に関わる様々な条件が考えられる。本章では、このような避難行動の成否に関わる諸要素を考え、その各市町村における値を算出する。

本研究では避難に関わる要素として、避難が必要な人口等の曝露量条件、避難路等傾斜や距離等の避難をする上での地形条件、これまでの浸水域への人口流入流出等の住民の防災意識に関する条件、これまで想定されてきた津波の高さなどの津波対策の水準に大きく影響する条件を考えた。ここでは、以下に示す指標をそれぞれ市町



分類の区間上限値は次の通りである。

Mortality Rate: Low 1.92%, Mid 5.54%
Tsunami Height: Low 12.1m, Mid 25.8m

図 2 各市町村の津波高と人的被害率の関係

村単位で計算し、被害率の差異を生じる原因となった度合いを検討するための指標とした。すなわち、

- ・浸水域の平均高低差
- ・浸水域の人口密度
- ・浸水域の面積
- ・想定されていた津波高さ
- ・浸水域・非浸水域の人口割合の変動状況

である。本章では、それぞれを提案した理由およびそれぞれが避難にどのように関係するかと、算出方法について論じる。

(1) 浸水域の平均高低差

津波が来襲した各市町村における地形的特徴は、避難行動の難易や地域に来襲し氾濫する津波の特性に影響すると考えられる。

すなわち、仙台平野のような平坦な地形では高台が少なく、また水路が多いことから橋など津波避難上のボトルネックが存在する。津波の氾濫流はその水深は大きく

ならないが容易には遡上が止まらないため、高い建物等が無ければ内陸へ向かって長距離を避難しなければならなくなる。一方で、三陸海岸のような急峻な地形では高台は比較的近くにあることが多いが、津波の遡上高はリアス式海岸の特性により津波エネルギーが湾奥部に集中するため浸水深は容易に大きくなりうる。避難は近くの高台に避難するとしても、勾配の非常に大きい坂道を上らなければならなく、勾配の小さい道を利用しようとすると危険な河川沿いを長距離にわたって上流へ移動しなければならぬという条件を持っている。

東北地方太平洋沖地震の津波が来襲した市町村はリアス式海岸から平野部まで多様な地形条件となっており、この地形的条件が避難しないし人的被害率に及ぼした影響を精査しておくことは、今後の当地の津波対策や同様の地形を有する東海・東南海・南海地震津波の想定被災域の防災対策に重要な示唆を与えるものである。

ここでは各市町村の地形的特徴が被害率に及ぼした影響を検討するため、各市町村における浸水域の起伏量の程度を表す指標として、浸水域の平均高低差を導入する。浸水域の平均高低差は、まず浸水域に重なる4次メッシュ（約500mメッシュ）内の最大標高と最少標高の差を高低差として求め、各市町村単位で各市町村に含まれる4次メッシュの高低差の平均値を求めたものである。もともとなる標高値は数値地図50mメッシュ標高を使用した。

この値が高ければ、その市町村の浸水域の4次メッシュ内で大きく標高が変化しているため、浸水域では地形が急峻であり、急こう配であることを示している。

(2) 浸水域の人口密度

これは曝露量に関する指標である。地域に来襲した津波に対してどの程度の人口がさらされていたかを測る指標で、被害の多ささに直接関係してくる。浸水域の人口密度が大きい場合、津波が一旦氾濫すると氾濫域の面積に対して危険にさらされる人口が大きくなる。すなわち、少し氾濫に対してでも大量の人口の避難が必要となる。大量の人口が避難するとなれば、避難時の混雑や、津波避難ビルの容量等により避難ができない人口が発生し、被害率を押し上げることが予想される。

2011年東日本大震災で被災した沿岸市町村のそれぞれの浸水面積はそれぞれの市町村の地形的影響や津波高の影響を受けて異なり、またそこに居住する人口も市町村によって異なる。これらの影響を除去しつつ、当該地域の今回の津波に対する曝露特性を的確に表示する指標としては、浸水域の人口密度が適当であると考えられる。

本研究では、浸水域人口は総務省統計局により算出された2010年国勢調査の浸水概況に係る基本単位区集計値を利用し、市町村ごとに合計値を集計したのち、これを国土地理院の浸水概況による市町村の総浸水面積で除することにより算出した。

(3) 浸水域の面積

どれだけ広範囲にわたって津波が浸水したか、浸水域の面積は、前述の浸水域の平均高低差や人口密度と関係してくるが、これらを補完する指標として分析に入れた。

浸水域の平均高低差が小さい平野部では浸水域の面積は大きくなる傾向にある。反対に平均高低差が大きいリアス海岸では浸水域の面積は小さくなる。浸水域の面積が大きければ人口密度は小さくなるが、避難を考えた場合、浸水域が大きければ容易に浸水域外に逃げられない。したがって近くの高い建物に避難することになるが、高

い建物が無い場合や、建物より高い津波が来襲した場合、建物が津波により破壊された場合には被害が拡大する。

(4) 想定津波高

各県で今回の東北地方太平洋沖地震発生までに想定されていた津波の高さを市町村ごとにまとめる。避難対策も含めた各種対策は、多くのものが対象となる津波の想定津波高の値に基づいて実施されている。しかし、一旦津波高が想定値を超えれば、防潮堤を津波が越え、津波が氾濫すると想定されていない地域に氾濫する。また、想定に対して対策・施設整備水準に余裕のない地域では想定より津波高が大きくなることにより、有効であると考えていた避難施設や防潮対策が使えなくなり、地域では大きく被害が拡大することになると考えられる。

ここでは、岩手県（2004）、宮城県防災会議地震対策専門部会（2004）、福島県（2007）より、沿岸の市町村内の想定津波高の最大値を想定津波高として求めた⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。各県では過去、1986年明治三陸地震津波、1933年昭和三陸地震津波、1960年チリ地震津波という大被害をもたらした津波に関して、その残っている記録を利用していたり、再現計算による当該地震の再来を想定した場合の数値を想定している。また地震発生時に向こう30年間の発生確率が99%であった宮城県沖地震の連動を想定したM8.0のケースが各県で想定されている。ただし、各県、各市町村では想定された複数の津波のうち、どの津波が当該市町村で最も高くなるかは異なってくる。ここでは、当該地域の対象津波の影響を見るため、津波の想定ケースに関わらず、市町村ごとに津波高が最大となるケースの値を使用した。

(5) 浸水域の人口変動

最後に浸水域のこれまでの人口変動状況を考える。各市町村では、今回浸水域となった地域が、人口が増加する地域であったのか、あるいは人口が減少する地域であったのかで分類してみた。このような浸水域の人口変動状況は、当該地域の津波に対する防災知識の普及状況や、土地の危険性の認識状況、避難経路や避難施設等の整備状況と住民の認知状況等にも関連し、当該地域が人口増加地域であれば、人的被害率の増加に関係してくると思われるためである。

指標は、2000年の国勢調査結果の地域メッシュ統計と1985年の国勢調査結果の地域メッシュ統計を用いた。すなわち、この間15年間の変動状況を示すものである。値は、2000年と1985年の国勢調査結果の地域メッシュ統計より、それぞれの年の浸水域人口と市町村人口を求めて、それぞれの年で浸水域人口を市町村人口で除した浸水域居住率を算出し、2000年の値から1985年の値を引いて、各市町村住民の浸水域居住率の増加を求めた。この値が大きい市町村では、海側への居住が進む傾向にあったことを示し、マイナスの市町村では、山側の人口のほうが多くなる傾向にあったことを示している。

(6) 各指標に基づく沿岸市町村の分類手法

本研究では、同程度の津波外力であっても、異なる被害率となった市町村群において、被害率に影響したと考えられる要素を考察する。

その方法としては、当該市町村の間に差異が存在するかどうかを、本章で述べた指標群のそれぞれで、沿岸市町村をグループに分類し、当該市町村が別のグループに属するか否かで判断する。

表1 各市町村の津波高さ、死者・行方不明者率と各評価指標値

市町村	死者・行方不明者率（市町村人口％）	死者・行方不明者率（浸水域人口％）	最大津波高（m）	平均津波高（m）	浸水域の平均高低差（m）	浸水域の人口密度（人/km2）	浸水域面積（km2）	想定津波高（m）	浸水域・非浸水域人口比の変動
岩手県洋野町	0.00	0.00	15.0	9.8	27.8	2429.3	1.1	15.0	0.2
久慈市	0.01	0.06	32.3	11.3	26.7	2024.8	3.5	22.2	0.4
野田村	0.82	1.20	37.8	18.1	28.9	1525.0	2.1	21.0	-0.7
普代村	0.03	0.09	24.0	15.0	35.0	2432.7	0.5	28.0	-0.1
田野畑村	0.94	2.28	28.5	21.6	35.0	1265.6	1.3	24.8	0.0
岩泉町	0.06	0.62	28.7	16.4	32.4	1049.5	1.1	23.2	-0.2
宮古市	1.29	4.17	40.6	19.2	31.8	1917.7	9.6	19.8	-2.3
山田町	4.63	7.56	29.1	11.4	35.1	2209.9	5.2	15.2	-2.3
大槌町	11.23	14.40	22.1	13.4	36.4	2776.3	4.3	14.6	-2.8
釜石市	3.42	10.28	30.5	14.2	35.3	1987.0	6.6	20.6	-0.1
大船渡市	1.13	2.42	31.9	14.1	32.6	2543.1	7.5	31.2	-0.5
陸前高田市	9.39	13.16	21.5	14.3	34.5	1305.1	12.7	17.6	1.1
宮城県気仙沼市	2.09	3.81	23.0	10.5	32.2	2355.1	17.1	18.6	-0.8
南三陸町	6.76	8.19	20.5	15.0	36.2	1438.9	10.0	14.4	-0.7
女川町	10.84	13.54	34.7	16.0	35.8	3388.6	2.4	5.9	-1.5
石巻市	3.57	5.11	25.8	5.8	24.5	1566.6	71.7	12.6	3.1
東松島市	3.32	4.19	10.1	4.1	14.9	925.6	36.8	3.3	1.5
松島町	0.03	0.10	2.7	1.7	27.0	1648.7	2.5	1.8	-0.5
利府町	0.01	0.55	6.3	4.4	33.7	1182.6	0.5	1.7	-0.8
塩釜市	0.04	0.12	4.6	2.9	21.3	3509.6	5.3	2.2	-0.8
七ヶ浜町	0.37	0.83	12.1	6.1	20.1	2071.5	4.4	4.2	1.8
多賀城市	0.30	1.10	4.7	2.5	9.2	2637.5	6.5	2.5	-0.9
仙台市	0.08	2.88	14.7	3.6	1.2	595.3	50.3	3.2	0.2
名取市	1.43	8.63	11.1	3.1	1.4	449.5	27.0	3.4	-5.5
岩沼市	0.42	2.29	8.9	3.7	0.8	277.2	29.0	3.4	-4.8
亘理町	0.78	1.92	10.7	3.0	0.8	412.1	34.2	2.9	-3.4
山元町	4.49	8.34	15.3	5.2	10.0	385.3	23.3	4.4	5.4
福島県新地町	1.39	2.44	19.6	9.8	15.8	466.6	10.0	5.3	-1.9
相馬市	1.24	4.49	21.0	9.6	12.2	370.5	28.2	6.6	-1.6
南相馬市	1.32	7.01	20.0	9.7	16.2	352.8	37.9	6.7	-0.1
浪江町	0.89	5.54	21.0	9.6	12.0	563.2	6.0	6.4	0.3
双葉町	0.50	2.74	22.0	9.4	19.1	420.2	3.0	6.2	-0.2
大熊町	0.38	3.90	19.0	10.7	22.9	772.8	1.5	6.7	-1.5
富岡町	0.11	1.28	19.0	13.4	27.3	1084.7	1.3	7.4	-0.7
楢葉町	0.17	0.74	19.0	11.1	29.6	675.9	2.6	7.3	1.3
広野町	0.06	0.22	10.1	8.6	29.2	810.7	1.7	8.6	-1.6
いわき市	0.11	1.18	15.2	5.7	19.4	2211.0	14.7	8.1	-0.5
各指標のJenksの自然分類による区間上限値									
低	0.42	1.28	6.33	4.13	3.0	595.3	3.5	3.4	-3.4
	0.94	2.88	15.27	6.06	16.2	1084.6	7.5	5.9	-1.5
中	2.09	5.54	24.00	11.63	22.9	1648.7	17.1	8.6	0.4
	6.76	10.28	32.32	16.44	29.6	2776.3	37.9	19.8	3.1
高	11.23	14.40	40.57	21.61	36.4	3510.0	71.7	31.2	5.5

すなわち、当該市町村群がある指標で同一グループに属していれば、その指標に関するところでは当該市町村群に差異は見られないとし、別のグループに属していれば、その指標に関するところでは当該市町村群に差異があると考え、差異があれば、それが被害率に何らかの影響を及ぼしたと考えられるので、そこから、被害率を左右した原因に関する仮説を検討する。

前章の最大津波高、平均津波高、市町村人口に対する人的被害率、および浸水域人口に対する人的被害に加え、本章で提案した4つの指標を各市町村ごとに算出したものをまとめて表1に示す。表1は北から沿岸に沿って沿岸自治体を隣接する順に並べている。各セルは、次の基準に従ってそれぞれのセル値の全市町村内における高低の程度によって分類されて、色分けされており、その分類の基準となった値はそれぞれの指標について表1の最

下部に示している。

全市町村の分類は、各指標について、Jenksの自然分類（Natural Breaks Classification）で行った。自然分類では、ある区間に属する値とその区間平均との平均偏差を最少にし、かつ、別の区間の区間平均との平均偏差を最大にするように、各区間の閾値が最適化される。すなわち、様々な指標がある場合、分布が偏っている場合や突出した値がある場合でも、同じコンセプトでグループ化できる。また、分析する個人が区間の閾値を設定する必要がないため、区間設定に関する個人の裁量の影響を受けにくく、客観的に分類することが可能である。

(7) 各種指標の傾向

浸水域の平均高低差は、北から北上山地丘陵、リアス海岸低地、北上低地平野、仙台平野、阿武隈山地低地と地形区分が異なるところで傾向がわかる。

人口密度は浸水域の平均高低差の大きい海岸で大きな傾向にある。また浸水域面積は平野部で大きくなる。想定津波高は岩手県、宮城県の三陸海岸で高く、次いで福島県沿岸であり、宮城県南部の平野部で小さい。浸水域・非浸水域人口比の変動は、浸水域人口割合が増加する地域が分散して見られるが、ほとんどの地域では非浸水域人口割合が増加する傾向であった。

4. 津波強度による市町村の分類と被害率の相違に影響したと考えられる要因の分析

本章では、最大津波高が同程度である地域に対して、被害率の差異を特定し、それに対して、前章で導入した各種指標がどのように対応しているかを分析する。

(1) 最大津波高 35m～40m

宮城県女川町と岩手県の宮古市、野田村は最大津波高が 35m～40m と今回の地震津波では最大級の津波が来襲した地域である。平均津波高で見ると、それぞれ 16.0m, 19.2m, 18.1m となっており、平均津波高 16m 以上の地域は、他に岩泉町、田野畑村がある。

これに対して、各市町村の市町村人口に対する人的被害率は、女川町で 10.84%であったのに対して、宮古市、野田村、田野畑村はそれぞれ 1.29%, 0.82%, 0.94%と 1%程度であり、岩泉町では 0.06%と非常に小さくなっている。浸水域人口を考慮し、浸水域人口に対する人的被害率を考えた場合でも、それぞれ、13.54%, 4.17%, 1.20%, 2.28%, 0.62%となっておりこちらも女川町とその他ではオーダーが違う。

この被害率の差を生み出した原因を仮定するために、そのほかの指標を比較してみる。女川町が他の市町村に対して特に高い、または低い数値となっているのが、浸水域の人口密度および想定津波高である。浸水域の高低差は 29m～36m と一律高い値となっており、浸水域の地形としては急峻な地形というリアス式海岸の特徴をもっている。浸水域の人口変動としてはどの地域も浸水域内から浸水域外へ人口がシフトする地域となっている。

一方で、浸水域の人口密度は女川町が 3388.6 人/m³ と全浸水市町村で突出して高い値を示しており、浸水面積に対して避難すべき人口が多かったこと、高い津波高の曝露人口が大きかったことが被害率を増加させた原因として考えられる。また、県が想定していた津波高は宮古・野田・田野畑・岩泉が 20m クラスを想定していたのに対して、女川町は最大 5.9m であり、今回の津波は女川町で想定されていた最大津波高を平均して 10mm も超過していた。

(2) 最大津波高 30m～33m

この地域には釜石市、大船渡市、および久慈市といった津波湾口防波堤を有するあるいは建設中の 3 市町村すべてが入る。最大津波高は 30m から 33m で同程度であるが、平均津波高は釜石・大船渡が 14m 程度であったのに対して久慈市が 11.3m と若干小さくなっている。

人的被害率は、市町村人口比で釜石 3.42%, 大船渡 1.13%, 久慈 0.01%と差が出ている。浸水域人口比にするとそれぞれ 10.28%, 2.42%, 0.06%と釜石市が突出して高いことがわかる。

これら 3 市町村に関するその他の指標を見てみると、浸水域の人口密度や想定されていた津波高さでは釜石市

と久慈市は同程度であるが、大船渡市が大きい値を示している。また、浸水域内の人口変動としては、久慈市において浸水域となった地域に居住する人口が増える傾向にあった。これらの傾向は被害率の傾向とは異なっている。

浸水域の平均高低差を見ると、釜石市、大船渡市が 32.6m～35.3m に対して、久慈市が 26.7m と地形の特徴としては海岸線がそれほど入り組んでいない久慈市で低くなる特徴が出ている。また、湾口防波堤が津波を減衰させられる範囲や程度も原因として効いてくると考えられる。久慈市ではその地形的特徴から市街地・集落のほとんどを湾口防波堤によって防御される範囲とすることができたのに対して、釜石市、大船渡市とも 4～5 ある湾のうち湾口防波堤により防御されたのは 1 湾にすぎなかったことも被害率の差につながったことも考えられる。

(3) 最大津波高 28m～30m

山田町、田野畑村、岩泉町の最大津波高は 28m から 30m 程度となった。しかし、一方でこの 3 市町村の平均津波高はそれぞれ、11.4m, 21.6m, 16.4m とばらついている。

これに対して、人的被害は山田町が最も大きく、市町村人口比 4.63%, 浸水域人口比 7.56%であった。次いで田野畑村でそれぞれ 0.94%, 2.28%で、もっとも小さいのが岩泉町で両者とも 1%を下回っている。津波高と比較すると、山田町では平均的な津波高が比較的低かったにもかかわらず、人的被害が大きくなったのである。

これに対する各指標を比較すると、浸水域の平均高低差は 30～35m 程度でその差は少ない。浸水域の人口密度は山田町、田野畑村、岩泉町と被害率と同様の順に大きくなっており、浸水域の曝露人口量が被害率に影響している可能性がある。また、発災前までに想定されていた津波高も、田野畑村、岩泉町が 24.8m, 23.2m と高くなっているのに対して、山田町は 15.2m と 1 ランク低い値となっていた。したがって、山田町では想定していた津波高の倍近い高さの津波に襲われたことも、被害率に影響していると考えられる。一方で、浸水域の人口変動に関しては、ランクは異ならないも、山田町で他より若干であるが、浸水域内人口に対して浸水域外の人口のほうが多くなる傾向があった。

(4) 最大津波高 18m～25m

最大津波高が 20m から 25m 程度となったのは、大槌町、陸前高田市、南三陸町、石巻市、相馬市、気仙沼市、新地町、普代村と南相馬市、浪江町、大熊町、双葉町、富岡町、楡葉町の福島第一原子力発電所周辺自治体である。福島第一原発周辺自治体は浸水域標高から読み取ったものである、ここでは参考程度にとどめる。その他の自治体では、それぞれ自治体人口に対する人的被害率が、大槌町 11.23%, 陸前高田市 9.39%が最も高く、次いで南三陸町 6.76%, 石巻市 3.57%, 気仙沼市 2.09%であり、新地町 1.39%, 相馬市 1.24%と続き、普代村が最も小さい 0.03%である。浸水域人口に対する人的被害率はそれぞれ、14.4%, 13.16%, 8.19%, 5.11%, 3.81%, 4.49%, 2.44%, 0.09%と気仙沼市と新地町の人的被害率が逆転している。この津波高の区間では、大槌町が自治体人口、浸水域人口に占める人的被害率で全市町村の中で最も大きい値になったのに対して、同様の津波高さである普代村の人的被害率は最も小さいほうから 3 番目の値となるという、被害程度が大きく分かれた津波高になったので

ある。

大槌町と普代村を比較すると、大きな差異が出た指標は想定されていた津波高で、それ以外の指標についてはほぼ同程度であった。想定津波高に関しては大槌町よりも普代村の想定値が倍程度大きく、備えにつながっていたことが仮説として挙げられる。また本指標には出ていないが、普代村の集落では津波が防潮堤を越えなかったため、浸水面積は大槌町の 10 分の 1 にとどまったことも、被害を小さくしたと考えられる。

陸前高田市と南三陸町でも指標群はほぼ同様の傾向を示すが、人的被害率は陸前高田市のほうが大きい。指標のうち傾向が異なるのは浸水域・非浸水域の人口比の変動であり、人的被害率が高かった陸前高田では浸水域の人口割合が大きくなる傾向であった。津波高さや被害率が同程度の大槌町と陸前高田市を比較すると、陸前高田市のほうが浸水域の人口密度は低いものの、大槌町で非浸水域の人口割合が大きくなる傾向にあったのに対して、陸前高田は上述したように反対の傾向となった。

南相馬市、浪江町、双葉村、大熊町、富岡町、楡葉町についてみる。浸水域の標高から読み取った津波高によると各市町村とも同程度の津波が来襲していると考えられる。その一方で、南相馬市や浪江町で人的被害率が大きく、富岡町や楡葉町で小さい。これには、前者は後者に比べて浸水域の平均高低差が小さくかつ浸水域が比較的広がったことから、これらが原因で避難に支障が出た可能性が考えられる。

(5) 最大津波高 15m

次に、最大津波高が 15m 程度となった、山元町 (15.3m)、仙台市 (14.7m)、いわき市 (15.2m)、洋野町 (15.0m) について考察する。平均津波高は仙台市が最も小さく 3.6m、続いて山元町といわき市が 5.2m、洋野町が最も高い 9.8m であった。

これに対して、山元町、仙台市、いわき市の順で市町村人口に対する人的被害率は、4.49%、0.08%、0.11%、浸水域人口に対する人的被害率は、8.34%、2.88%、1.18% であった。山元町といわき市は最大津波高、平均津波高ともに同程度であったにもかかわらず、浸水域人口比の被害率で 7% 以上の差が開いている。一方で、平均津波高が高かった洋野町では死者、行方不明者ともに 0 を実現したのである。

同程度の津波であったにもかかわらず被害率が大きく異なった山元町といわき市では、その他の 4 指標の大きさがすべて異なる結果となった。平野の特徴を示した山元町に対していわき市では平野とリアスの中間の地形であった。また、浸水域の人口密度はいわき市のほうが圧倒的に大きく、曝露量では大きな差が出ていたが、被害率はその反対となっていて、いわき市では山元町に比べて避難がうまくいっていたと考えられる。また、想定されていた津波高はそれぞれ 4.4m、8.1m といわき市のほうが大きな値となっていた。様々な要素が複合して、被害率に影響したと考えられ、詳細に調査する必要がある。

山元町と仙台市では、人口変動が大きく異なり、山元町のほうで浸水域側の比率が大きくなる傾向にあった。両市町の浸水域の人口変動、住民の意識や知識がどのよう津波避難に影響したのかを比較する必要がある。

洋野町で人的被害 0 を達成したのも重要である。曝露人口を示す浸水域人口密度は高く、かつ想定されていた津波高も岩手県内では低かったものの、死者・行方不明者を 1 人も出さず避難が成功したことにつながった要因

の詳細な調査が必要である。

(6) 最大津波高 9~12m

名取市、東松島市、岩沼市、亶理町、七ヶ浜町、広野町がこの地域に該当する。平均津波高は、3.1m、4.1m、3.7m、3.0m、6.1m、8.6m と仙台平野の低地帯で低く、起伏のある七ヶ浜町、広野町で高い値となっている。

一方で、人的被害は、名取市が他の市町村より大きな値となった。続いて東松島市、岩沼市、亶理町の順で小さくなり、七ヶ浜町、広野町では浸水域人口比で 1% を下回った。

名取市、岩沼市、亶理町は仙台平野南部にあり、地形、曝露人口、想定津波高、人口変動の 4 指標ともに同様の値を示している。これらに対して被害率が市町村人口比でそれぞれ 1.43%、0.42%、0.78%、浸水域人口比で 8.63%、2.29%、1.92% と差が開いた。このような被害率の差が生じた原因はより詳細な調査による特定が必要であろう。

(7) 最大津波高 3~6m

宮城県多賀城市、利府町、塩釜市、松島町は最大津波高がそれぞれ 4.7m、6.3m、4.6m、2.7m と岩手、宮城、福島沿岸市町村の中では低かった。人的被害率も市町村人口比および浸水域人口比とも小さかったが、その中で、多賀城市が浸水域人口比 1.1% となるなど、比較的被害が大きかった。

多賀城市と塩釜市は隣接しており、津波高もほぼ同様であるが、市人口比でも浸水域人口比でも被害率は 10 倍近くの差が生じた。これに対して、4 指標のうち特徴が違ったのは浸水域の平均高低差および浸水域の人口密度のみであった。特に浸水域の人口密度は塩釜市が岩手・宮城・福島の 37 市町村中最大の値を示し、浸水域に密集していたにも関わらず、被害率では塩釜市のほうが小さい。また、平均高低差が塩釜市のほうが大きかったことが被害率を小さくしたことも考えられる。

(8) まとめ

女川町と宮古市・野田村や、山田町と田野畑村・今泉町では人口密度と想定されていた津波高といった指標に相違がありこれらが被害率に影響した可能性がある。

釜石市と大船渡市・久慈市は、ともに津波防波堤を有する地域であったが、被害率は釜石市で大きく、久慈市で小さい。また、名取市・岩沼市・亶理町で被害率に差があったが、本研究で考量した条件ではほぼ同様の傾向を示しており、被害率の差が生じた原因を詳細に調べる必要がある。

津波高が 18~25m となったところは 14 市町村と多く、最大の人的被害率となった大槌町と最少の人的被害率となった普代村が含まれる。詳細な分析が必要であり、次章で大槌町、陸前高田市、気仙沼市の写真から状況の分析を行う。

15m 周辺では仙台市と山元町で人口変動と人的被害率に関係性がありそうである。また人的被害 0 を実現した洋野町の成功要因分析が必要である。

5. 大槌町・陸前高田市・気仙沼市の被害率の相違に関する現地調査からの状況分析

大槌町、陸前高田市、気仙沼市では前章でもふれたが、



(a) 主要市街地の様子
(大槌川右岸堤防より内陸側を撮影)



(b) 海岸付近の様子
(大槌港の防潮堤)



(c) 建物被害の様子
(大槌町新港町)

図3 大槌町の被害状況 (2011/4/7)



(a) 主要市街地の様子
(気仙川左岸堤防より高田地区)



(b) 海岸付近の様子
(高田松原海岸)



(c) 建物被害の様子
(陸前高田市高田地区)

図4 陸前高田市の被害状況 (2011/4/6)



(a) 主要市街地の様子
(鹿折地区より海側を撮影)



(b) 海岸付近の様子
(気仙沼市浜町)



(c) 建物被害の様子
(気仙沼市川口町)

図5 気仙沼市の被害状況 (2011/4/5)

最大津波高 21～23m, 平均では気仙沼市が若干低い 10～14m の津波に襲われ, 人的被害率は大槌町, 陸前高田市で高く (市町村人口比約 11%, 9%, 浸水域人口比約 14%, 13%), 気仙沼市 (市町村人口比約 2%, 浸水域人口比約 4%) との間に差異が生じた。

ここでは, これらの市町村間の津波高には表れない津波の流れの強さや, 現地の地形状況などを, 2011 年 4 月 5～7 日に行った現地調査による写真から, 現地状況の相違を考察する。

図 3 は大槌町, 図 4 は陸前高田市, 図 5 は気仙沼市のそれぞれ主要な市街地近辺の被害の様子, 海岸付近, 特に海岸堤防等構造物の様子, 浸水域内に残っていた建物の状況を示す写真である。

(1) 主要市街地の様子

主要市街地の様子について考える。大槌町や気仙沼市

では, 大量のがれきが堆積しているのに対して, 陸前高田市ではがれきが少なく, 形状を保ったまま漂流したとみられる家屋も少なく, 更地化していることがわかる。陸前高田市の高田地区では津波を遮る耐浪建物が少なく, また, 田んぼが広がっていたこともあって, この地区に氾濫した津波の流速は速く, がれきの多くを主要市街地から流出させたことが推察できる。これに対して, 大槌町では, 若干形状を保ちながら漂流した家屋や建物があるがほとんどは破壊され瓦礫となって堆積していることがわかる。海岸地域に建物が多く, また防潮堤があったことにより陸前高田市に比べて津波の氾濫流の流速が若干小さかったと考えられる。気仙沼市においても同様であるが, 建っている家屋が大槌町より多く, 津波の破壊力が 3 市町村の中では小さかったことがうかがえる。

(2) 海岸付近の様子

次に、海岸付近の様子を比較してみる。陸前高田市高田地区では高さ 5.5m、長さ 2km にわたる防潮堤がすべて流失し、防潮林もほとんどが根こそぎ流され、砂州が消失した。このことから同地区の津波の流速、破壊力は大きく、防潮堤、防潮林を跡形もなく流出させ、市街地へ氾濫したといえる。大槌町では図 3 (b) の写真のように大槌港背後で高さ 6.4m の防潮堤が約 500m にわたって転倒し、また中心市街地近くの海岸では、堤防を越流した津波により堤防背後で洗掘が発生していた。破堤しなかった部分では図 3 (a) の写真のように瓦礫が堆積していたが、破堤した部分では図 3 (b) の写真のようにコンクリートの建物が流されたりするなどし、瓦礫の堆積は少なかった。近接した地域でも津波の勢いが違った可能性がある。気仙沼市気仙沼湾の湾奥部に位置する浜町地区でも海岸付近では図 5 (b) のように防潮堤を越流した津波による洗掘が発生していた。防潮堤の高さは低く、船舶の漂流も多数みられたが、水産関連工場も流出はせずに残っており、背後の地域へ流入する津波の減勢につながり、流出せずに残った家屋があったと考えられる。しかし、続いて発生した大火災によりこれより陸側の地域は、図 5 (a) のような状況となったのである。

(3) 浸水域の建物の様子

最後に、浸水域の建物の様子を見てみた。人的被害率の大きかった大槌町や陸前高田市では木造の家屋はほとんど残っていなくコンクリートの建物が残るのみであった。陸前高田市では図 4 (c) のように多くのコンクリートビルが残っていたが、来襲した平均 14m という津波高よりも十分に高い建物は少ない状況であった。大槌町では図 3 (c) のようにコンクリートの建物であっても流されたり、転倒したものがあり、高さも十分にないものがほとんどであった。これらの地域では、避難は浸水域から外に出るしかない。しかし、それほど高い津波が来ることは想定にもなく予測できなかった人がいたと考えられる。近くの建物へと避難はできたものの、その高さを超える津波が来襲し流された可能性もある。気仙沼市では、これまで述べてきたように、大槌町や陸前高田市よりも残った家屋が多い。比較的高い建物も多く、津波避難ビルの指定もされていたが、図 5 (c) の地区では浸水域外へ出るためには少ない橋を渡って川を渡らなければならず、避難に際して判断が難しかったと考えられる。

6. 結論

本研究では、FORIN 手法を用いて東日本大震災の検証を行うために基礎的な知見を得ることを目的として、被災地域に作用した津波外力と発生した人的被害、およびそれに影響した主要原因について、自然条件、曝露条件、防災対策条件、および、社会条件を表す指標を用いて被災市町村間の比較を行った。その結果得られた結論は次のとおりである。

(1) 最大津波高と浸水域内人口に対する人的被害率の関係を調べた結果、地域に來襲した津波高が高くなれば人的被害が大きくなる傾向があるが、岩手・宮城・福島沿岸 37 市町村の平均的傾向に対して、津波高の割に特に人的被害率が大きくなったのは名取市であった。また、次いで、岩手県大槌町、陸前高田市、宮城県南三陸町、東松島市、岩沼市、亶理町、山元町、福島県南相馬市、

浪江町で津波高に対して人的被害率が比較的大きくなる傾向があった。一方で、岩手県宮古市以北の自治体や大船渡市、福島県南部沿岸の自治体では地域に來襲した津波高に対して比較的人的被害の発生が抑えられた。この傾向は特に岩手県久慈市、野田村、岩泉町で顕著であった。これらの市町村地域については、特に被害が拡大した原因、および被害の抑止につながった原因に関する調査が必要であろう。

(2) 津波高が同程度で、人的被害が異なった地域間において、地形条件、曝露人口、想定津波高、および、人口変動を表す指標を導入し、求めた。その結果、浸水域の平均高低差は、北から北上山地丘陵、リアス海岸低地、北上低地平野、仙台平野、阿武隈山地低地と傾向がわかれた。浸水域の曝露人口密度は平均高低差の大きい海岸で大きくなる傾向にあり、浸水域面積は平野部で大きくなる傾向にあった。想定津波高は岩手県と宮城県リアス海岸で高く、次いで福島県、宮城県平野部で小さかった。浸水域と非浸水域の人口比の変動は、浸水域人口割合が大きくなる地域が分散して見られるが、ほとんどの地域では非浸水域人口割合が大きくなる傾向であった。

(3) 地域に來襲した津波高ごとに、主要原因分析を行った結果、以下のような結論がえられた。

女川町と宮古市・野田村で、女川町で被害が大きかったのは、人口密度の大きさと想定されていた津波高を 10～30m 超える津波が來襲したことによる可能性がある。釜石市と大船渡市・久慈市は、ともに津波防波堤を有する地域であったが、その効果の範囲が異なり、被害率は釜石市で大きく、久慈市で小さい。詳細な原因分析が必要である。山田町と田野畑村・今泉町では人口密度と想定されていた津波高といった指標に相違がありこれらが被害率に影響した可能性がある。津波高が 18～25m となったところは 14 市町村と多く、最大の人的被害率となった大槌町と最少の人的被害率となった普代村が含まれる。同様に想定されていた津波高や浸水面積が原因したと考えられるが、詳細な分析が必要である。15m 周辺では仙台市と山元町で人口変動と人的被害率に関係性がありそうである。また人的被害 0 を実現した洋野町の成功要因分析が必要である。9～12m の地域では、名取市・岩沼市・亶理町で被害率に差があったが、本研究で考量した条件ではほぼ同様の値であり、被害率の差が生じた原因を詳細に調べる必要がある。

(4) 同様の高さの津波に襲われた大槌町・陸前高田市・気仙沼市に関して、現地調査から被害率の差異が生じた原因に関する検討を行った。その結果、同様の津波高でも、大槌町や陸前高田市では、浸水域内に発生した津波氾濫流の流速が強かったと考えられることや、浸水域内に残存していた建物で避難ビルとして利用できないものが多かったことから、これらによる被害拡大の可能性があったことを指摘した。

本研究ではハザードや被害、それに影響した要因の分析単位を市町村として分析を実施したが、市町村の面積や海岸線距離、湾の数等は多様であり、本論文で算出した指標が必ずしも各市町村の指標を表していないこともあると考えられる。今後の課題としては、分析単位を湾単位や字単位等に細分化し、それらの分析単位間で同様の比較をしてみることが必要である。

参考文献

- 1) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ（2011）：調査結果速報値，<http://coastal.jp/ttjt>，2011 年 5 月 10 日参照
- 2) 岩手県災害対策本部（2011）：東北地方太平洋沖地震に係る人的被害・建物被害状況一覧，平成 23 年 5 月 14 日 17：00 時点，<http://sv032.office.pref.iwate.jp/~bousai/>
- 3) 宮城県災害対策本部（2011）：東日本大震災における被害等状況，2011/5/14 17：54，<http://www.pref.miyagi.jp/kikitaishaku/higasinihondaisinsai/pdf/5141800.pdf>
- 4) 福島県災害対策本部（2011）：平成 23 年東北地方太平洋沖地震による被害状況即報（第 168 報），平成 23 年 5 月 15 日 8 時 00 分現在，<http://www.pref.fukushima.jp/j/index.htm>
- 5) 国土地理院（2011）：浸水範囲概況図，<http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku60003.html>
- 6) 総務省統計局（2011）：平成 22 年国勢調査人口速報集計結果，平成 23 年 2 月 25 日，<http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2010/kekkagai.htm>
- 7) 総務省統計局（2011）：浸水範囲概況にかかる平成 22 年国勢調査基本単位区（調査区）による人口・世帯数（地図情報），岩手県・宮城県・福島県，平成 23 年 4 月 25 日，<http://www.stat.go.jp/info/shinsai/index.htm#map>
- 8) Jenks, George F. (1967)：The Data Model Concept in Statistical Mapping, International Yearbook of Cartography, 7, pp.186-190.
- 9) 岩手県（2004）：岩手県地震・津波シミュレーション及び被害想定調査に関する報告書（概要版），平成 16 年 11 月，191p.
- 10) 宮城県防災会議地震対策等専門部会（2004）：宮城県地震被害想定調査に関する報告書，平成 16 年 3 月，217p.
- 11) 福島県（2007）：福島県津波想定調査結果の概要，http://www.cms.pref.fukushima.jp/pcp_portal/PortalServlet?DISPLAY_ID=DIRECT&NEXT_DISPLAY_ID=U000004&CONTENT_S_ID=19543

(原稿受付 2011.6.5)

(登載決定 2011.9.10)