

# 宮城県名取市沿岸部における津波被害関数の推定と 海岸砂丘の減災効果

Evaluation of Fragility Functions for Tsunami Damage in Coastal District  
in Natori City, Miyagi Prefecture and Mitigation Effects of Coastal Dune

二瓶泰雄<sup>1</sup>・前川俊明<sup>2</sup>・大嶋李香<sup>3</sup>・柳沢舞美<sup>2</sup>

Yasuo NIHEI, Toshiaki MAEKAWA, Rika OHSHIMA and Maimi YANAGISAWA

To clarify the structural damage in Sendai Plain along sandy coasts due to huge tsunami attack on 11 March 2011 and its countermeasure, in the present study, we conducted field survey for structural damage and tsunami height in coastal district of Natori City, Sendai Plain in which an artificial sand dune with the height of about 9 m is located. The measured results indicate that devastated buildings were concentrated in coastal district in which a distance from the shoreline was less than 1 km. The fragility functions for tsunami damage in this site were evaluated using the measured inundation depth. It is also found that the sand dune has an effect on reduction of structural damages due to tsunami inundation.

## 1. はじめに

2011年3月11日に宮城県牡鹿半島沖を震源地とするマグニチュード9.0の東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）は、日本では観測史上最大、世界でも観測史上4番目の巨大地震であり、かつ、1000年に一度と言われる規模の巨大津波が発生した。GPS波浪計データによると、岩手県の沖合において6mを越える津波が観測された（河合ら、2011）。この巨大津波災害の大きな特徴は、明治・昭和三陸津波においても被害が大きかった三陸沿岸部のみならず、仙台市より南の平野部においても巨大津波が襲来したことであり、岩手県、宮城県、福島県北部という広範囲にわたり津波浸水高が20mを越えた（Moriら、2012）。このような状況下では、岩手県・田老海岸等における巨大なコンクリート製防潮堤の一部が破壊され、その背後地も壊滅的被害を受けた（Ogasawaraら、2012）。また、仙台以南の平野部では、津波遡上範囲が海岸より最大5kmにわたり、かつ、多くの家屋が流出・損壊した（Gokon・Koshimura、2012）。

このようなことから、被災地における復興計画や今後の津波防災・減災対策を立案する上では、津波外力指標（浸水深や流速等）と家屋被害状況の関係やそれに対する家屋構造別の違いを把握する必要がある。また、今次

巨大津波において甚大な被害が見られた平野部において一般に存在する砂浜海岸では、リアス式海岸で多く建設されていたコンクリート製防潮堤を連続的に長距離にわたり建設することは非現実的である。そのため、砂浜海岸を有する沿岸部やその背後地の特徴に即した防災・減災対策を検討することは極めて重要である。

本研究では、平野部において多くの被害者を出した宮城県名取市沿岸部を対象として、広範囲にわたる家屋被害調査を行い、建築構造（木造、鉄筋コンクリート造、鉄骨造）別の家屋被災状況や津波痕跡水位を把握する。それらの結果に基づいて、家屋流出・損壊に関する津波被害関数（Koshimuraら、2009）を推定する。さらに、被害調査結果から見出された海岸砂丘による背後地の減災効果を定量的に検討した結果を示す。

## 2. 研究方法

### (1) 観測サイト

観測サイトは、宮城県仙台市の南側に位置する名取市の沿岸部であり、その南部には仙台空港が存在している。名取市沿岸部における震災前後の様子を空中写真で比べると、図-1に示すように、震災後には多くの建物が流出しており、その様子は名取川右岸側に位置する閑上地区において顕著である。沿岸部の農地も浸水している様子が伺える。また、大部分が盛土されていた東部有料道路の陸側と海側では、被害状況が大きく異なり、防潮堤としての東部有料道路の機能が発揮されたことが伺える。

このエリアにおける観測範囲は、図-1に示された名取

1 正会員 博(工) 東京理科大学准教授理工学部土木工学科  
2 学生会員 東京理科大学大学院理工学研究科土木工  
学専攻修士課程  
3 サンスイコンサルタント(株) (元東京理科  
大学学部生)



図-1 観測サイト（宮城県名取市）における震災前（上）と後（下）の様子（GoogleEarthより引用）

川右岸側から仙台空港北側までであり、東部有料道路の陸側も含めて浸水域全体を概ねカバーするように設定されている（詳細は後述の図-3参照）。このエリアの海岸には、大小の人工砂丘が存在している。関上漁港の脇にある大砂丘は、漁港内の浚渫土砂を盛土したものであり、高さ約 9.1[T.P.m]、沿岸方向の長さ約 200m となっている。この大砂丘の南側には、高さ 4[T.P.m]の小砂丘が沿岸方向に連続的に存在している（以下、大砂丘を単に人工砂丘と呼ぶ）。また、海岸線と並行して防潮林が存在している。防潮林自体の津波減災効果は報告されているが（例えば、Danielsenら, 2005; Tanakaら, 2007）、ここでは取り扱わない。

## (2) 観測方法

上記の観測サイトにおいて、家屋被害調査と浸水深計測という 2 種類の調査を行った。まず、家屋被害調査として、観測対象エリアにおける家屋位置が特定できる住宅地図を持参し、各家屋の被害状況を調査する。その際には、庄司ら (2007) の定義に倣い、図-2 に示すように、「全壊または基礎のみ残した流出（以下、単に流出）」、「二階損壊」、「一階損壊」、「浸水もしくは無被害」の 4 段階



(a)流出



(b)二階損壊



(c)一階損壊



(d)浸水

図-2 家屋被害状況の分類

に分類する。調査対象家屋は 5253 棟である。さらに、調査時に撮影した家屋写真を元に、判別可能な「一階損壊」と「二階損壊」の家屋に対して、建築構造を「木造」、「鉄筋コンクリート（RC）造」、「鉄骨造」に分類する。

一方、浸水深計測では、Static GPS（FlexPak, NovAtel 製）、VRS 方式 RTK-GPS（R4, Trimble 製）やレーザー距離計（DISTO™D5, Leica 製）を用いて浸水深や浸水高を計測した。具体的には、図-2(d)に示すように、家屋に残された浸水痕を探し、その地点の標高を RTK-GPS により計測し、スタッフやレーザー距離計を用いて浸水深を測り、それらの和を浸水高とした。

上記の調査を 2011/5/10～12 と同年 6/11～12 の二回に分けて実施した。一回目では、主に対象サイトの北東側を調査し、二回目では、残りの南西側について計測した。調査時には、既に一部の家屋でがれきの撤去が進んでおり、「流出」と判定した家屋にがれき撤去後のものが含まれている可能性がある。そこで震災直後の衛星画像（図-1）で家屋流出状況を確認したところ、関上地区において「流出」と判定された家屋の一部が残存していた。そのため、それらの残存家屋は「二階損壊」とし、その他は得られた調査結果をそのままデータ解析に使用する。

## 3. 観測結果と考察

### (1) 家屋被害状況

観測サイトである名取市沿岸部における家屋被害状況を把握するために、被害状況マップを図-3 に示す。ここでは、被害状況を「流出」、「二階損壊」、「一階損壊」、「浸水・無被害」の 4 段階で分類し、衛星写真から抽出された浸水範囲も図示する。また、図中には、目安として沿岸からの距離も表示する。これを見ると、「流出」は沿岸

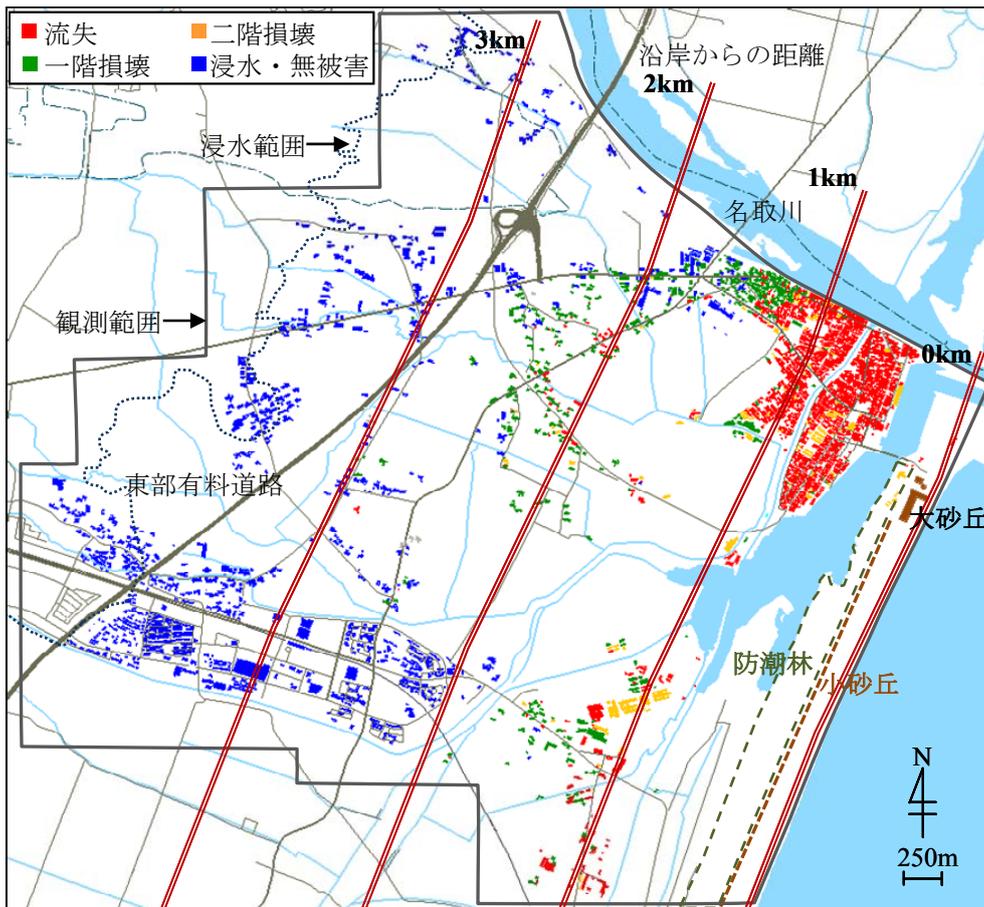


図-3 家屋被害状況マップ（図中の二重線は沿岸からの距離を示す）

部に多く、特に沿岸から 1km 以内では大部分の家屋が流出している。このエリアで流出せずに残った家屋としては、鉄骨造や RC 造の建物の一部や、海岸部に作られた人工砂丘の背後エリアの建物が見られた。また、沿岸から 1.5~3km の範囲では、主として「二階損壊」や「一階損壊」が確認されるが、「流出」家屋も点在していることが分かる。これは、閑上地区の背後には、名取川沿い以外では農地が広がり、その農地における津波のエネルギーロスが住宅密集地と比べて小さいため、沿岸からの距離が離れても農地周辺に点在する家屋の一部が流出したものと考えられる。さらに、東部有料道路の陸側では、田畑において浸水していたものの、家屋被害はほとんど見られない。これより、東部有料道路が防潮堤としての一定の役割を果たしたことが分かる。

**(2) 建物構造別の家屋被害状況**

家屋の被害状況を建物構造別に分類したものを図-4 に示す。ここでは、流出せずに残存した建物の棟数を構造別に数え、沿岸からの距離に対する残存率（＝沿岸からある距離までの残存棟数／対象範囲の総残存棟数）を構造別に求めたものである。総残存棟数は、木造・RC 造・鉄骨造でそれぞれ 532, 57, 88 棟である。これより、沿岸から 600m あたりから残存率は増加し始めるが、その

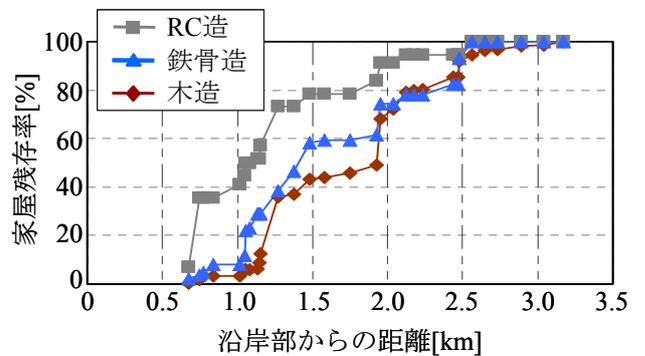
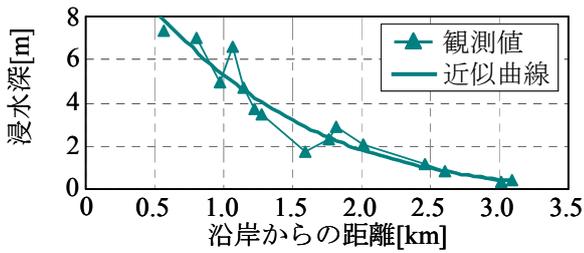


図-4 建物構造別の家屋残存率の変化

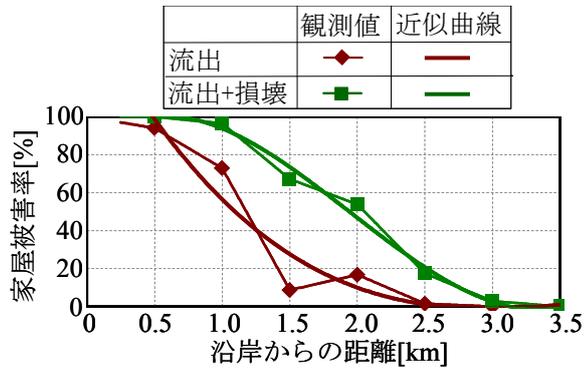
増加割合は RC 造が最も大きくなっており、相対的に鉄骨造や木造の残存率は小さい。また、RC 造の残存率を陸側に 500m 程度ずらすと鉄骨造や木造の結果と類似している。後述する浸水深（図-5）では、沿岸からの距離が 500m 異なると最大 2m 程度の差が生じるため、RC 造にすることにより、鉄骨造や木造と比べて、浸水深 2m 増加分に相当する流体力に耐えていることが示された。

**(3) 津波被害関数の推定結果**

これらの結果に基づいて、観測対象範囲における家屋の津波被害関数を推定することを試みる。そのために、まず、沿岸からの距離に対する浸水深と家屋被害率の観測結果を図-5 に示す。ここで、浸水深データは観測生デ



(a) 浸水深



(b) 家屋被害率

図-5 沿岸からの距離に対する浸水深と家屋被害率の変化

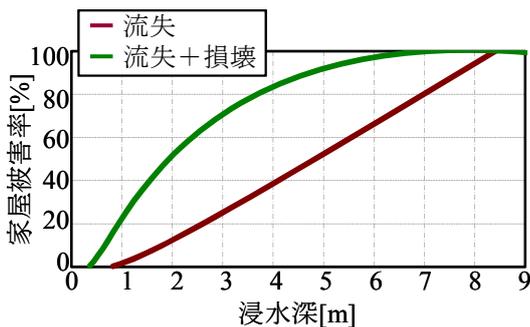


図-6 「流出」及び「流出+損壊」被害に対する津波被害関数

一タであり、家屋被害率とは、各エリア（ここでは沿岸からの距離500m毎に区切られた範囲）における総建物数に対する被害棟数の比であり、家屋被害状況として「流出」及び「流出+損壊」を選定する。また、各観測値に対して得られた近似曲線も合わせて表示している。なお、後述するように、人工砂丘の背後領域では、その他の領域と比べて家屋被害状況が異なっているが、人工砂丘の沿岸方向長さが200mと観測範囲と比べると小さいため、ここでは、それらの影響を考慮せずにデータを取りまとめている。これより、浸水深は沿岸からの距離と共に指数関数的に減少し、沿岸から0.5kmで浸水深8m程度であったのが、1.5kmでは約3m、3kmでは0.5mとなっている。一方、家屋被害率については、「流出」被害率は、沿岸からの距離と共に指数関数的に減少しており、浸水深と同様な傾向が見られる。具体的には、流出被害率は、



図-7 人工砂丘背後における家屋被害マップ（凡例は図-3と同じ）

沿岸からの距離が0.5km地点ではほぼ100%であるが、1.5km地点では20%以下になり、2.5km地点以降では流出家屋はほぼ0である。また、「流出+損壊」被害率に関しては、同様に、沿岸からの距離と共に減少するものの、その様子は「流出」のみの場合とは異なっている。すなわち、「流出+損壊」被害率は、沿岸から1km地点までほぼ100%であり、浸水深が2mとなる2km地点においても50%を越え、浸水深が1m程度となる2.5km地点において20%程度の結果となっている。これらの結果より、浸水深が5mを越える沿岸から1km地点までは流出被害が多い。一方、浸水深が2~5mとなる1~2km地点では損壊被害が顕著であり、このエリアでは家屋の嵩上げを2m行うことで、家屋被害を大幅に抑制できることが分かる。

これらの観測結果に基づいて津波被害関数を算定するために、津波外力として浸水深を選定すると、観測結果に対して得られた近似曲線から浸水深と家屋被害率の関係（津波被害関数）をまとめたものを図-6に示す。ここでも家屋被害率として、「流出」及び「流出+損壊」被害について図示している。これより、「流出」被害率は浸水深と共に直線的に増加するが、「流出+損壊」被害率の場合には浸水深が0.5mを越えて急激に増加し、3mを越えると緩やかに増加する、という興味深い結果が得られた。この津波被害関数と図-4、5の結果を合わせて、浸水深に対する家屋被害率を想定でき、居住可能範囲の設定や居住する場合の具体策（家屋構造や家屋の嵩上げ等）を提示することができる。

#### (4) 海岸砂丘の減災効果

図-3に示されている家屋被害マップを詳細に見ると、図-7のように、人工砂丘の背後では、海岸近くにも関わらず建物は残存していたことが分かる。この人工砂丘の高さは9.1[T.P.m]であり、沿岸近くの浸水高も9-10m程度であったので、今回の津波はわずかに越流したか、も

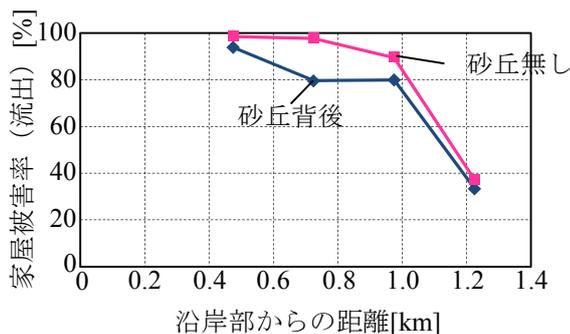


図-8 砂丘背後と砂丘無しのエリアにおける家屋被害率（流出）の比較

しくは、ほとんど越流しておらず、そのため、砂丘背後地における減災効果が見られたことが考えられる。

このことを定量的に評価するために、家屋被害マップを用いて、図-7のように人工砂丘の背後エリアとその周囲の砂丘が無いエリアに分けた形で「流出」被害率を抽出した結果を図-8に示す。なお、人工砂丘の中心位置は沿岸から0.23kmに相当している。これより、沿岸から1km地点までは、砂丘背後の方が流出被害率は低く、海岸砂丘の減災効果が定量的に示された。ただし、砂丘からの距離が離れると、両データの差は小さく、沿岸方向の長さが限定的な今回の人工砂丘の場合には、減災効果の範囲も限定されている。また、人工砂丘はほとんど越流せず浸食されていないが、人工砂丘の南側に位置する小砂丘はスポット的に浸食されていた。このため、海岸砂丘を津波減災対策として用いるには、越流されても壊れない補強技術の導入が不可避であり、柳沢ら(2012)はそのための検討を既に行っている。

#### 4. まとめ

本研究では、津波被害が大きかった宮城県名取市沿岸部を対象として、5000棟を越える家屋に関する津波被害状況を調査した。得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 家屋被害状況としては、沿岸から1km以内では大部分の家屋が流出し、1.5~3kmの範囲では、主として「二階損壊」や「一階損壊」が顕著であった。また、東部有料道路の陸側では、家屋被害はほとんど見られず、東部有料道路における防潮堤としての役割が確認された。
- 2) 建物構造別に被害状況を比べると、RC造は木造や鉄骨造よりも家屋残存率が高くなっており、RC造にすることにより、鉄骨造や木造よりも浸水深2m増加分に相当する流体力に耐えていることが示唆された。
- 3) 浸水深を津波外力とした津波被害関数を算出した結果、「流出」被害率は浸水深と共に直線的に増加するが、「流失+損壊」被害率の場合には浸水深が0.5mを越えて急激に増加し、3mを越えると緩やかに増加しており、両者

で異なる関数となった。これらの結果より、浸水深に対する家屋被害率や居住可能範囲の設定、居住する場合の津波対策を提示することが可能となる。

4) 人工砂丘の背後エリアでは、砂丘無しのエリアと比べて流出被害率が小さくなっており、海岸砂丘による減災効果が定量的に明らかとなった。

謝辞：本研究は、三井物産環境基金・2011年度復興助成（研究代表者：二瓶泰雄）によって実施された。浸水深計測で用いたStatic GPSの使用に際しては、東京理科大学理工学部土木工学科佐伯昌之准教授に多大なご協力を頂いた。東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生には、大変な観測作業を実施して頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

#### 参考文献

- 河合弘泰・佐藤真・川口浩二・関克巳(2011):平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震津波の特性,港湾空港技術研究所報告,Vol.50, No.4, pp.3-64.
- 庄司学・森山哲雄・幸左賢二・松富英夫・嶋原良典・村嶋陽一(2007):2006年ジャワ島南西沖地震津波による家屋等構造物の被災分析,海岸工学論文集,Vol.54, No.2, pp.861-865.
- 柳沢舞美・二瓶泰雄・山口晋平・川邊翔平・龍岡文夫(2012):海岸砂丘と補強盛土技術を組み合わせた新形式防潮堤の提案,土木学会論文集B2(海岸工学),Vol.59(印刷中).
- Danielsen, F., M. K. Sørensen, M. F. Olwig, V. Selvam, F. Parish, N. D. Burgess, T. Hiraishi, V. M. Karunagaran, M. S. Rasmussen, L. B. Hansen, A. Quarto and N. Suryadiputra (2005): The Asian tsunami: a protective role for coastal vegetation, Science, Vol. 310, 643p.
- Gokon, H. and S. Koshimura (2012): Mapping of building damage of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami in Miyagi Prefecture, Coastal Engineering Journal, Vol.54, No.1, 1250006(12pages).
- Koshimura, S., T. Oie, H. Yanagisawa and F. Imamura (2009): Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia, Coastal Engineering Journal, Vol.51, No.3, pp.243-273.
- Mori, N., T. Takahashi and The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group (2012): Nationwide post event survey and analysis of the 2011 Tohoku earthquake tsunami, Coastal engineering Journal, Vol.54, No.1, 1250001(27pages).
- Ogasawara, T., Y. Matsubayashi, S. Sakai and T. Yasuda (2012): Characteristics of the 2011Tohoku earthquake and tsunami and its impact on the northern Iwate coast, Coastal Engineering Journal, Vol.54, No.1, 1250003(16pages).
- Tanaka, N., Y. Sasaki, M. I. M. Mowjood, K. B. S. N. Jinadasa and S. Homchuen (2007): Coastal vegetation structures and their functions in tsunami protection: experience of the recent Indian Ocean tsunami, Landscape and Ecological Engineering, Vol.3, No.1, pp.33-45.