

2011 年東北地方太平洋沖地震津波被災地における脆弱性の検証

郷右近英臣*・越村 俊一*

1. 序論

(1) 背景と目的

近年発生した巨大津波災害（たとえば、2004 年インド洋大津波、2010 年チリ地震津波、2011 年東北地方太平洋沖地震津波）の直後には、現地調査、数値解析等が数多く実施され、浸水深や遡上高等の津波流況・遡上特性、人的被害や建物被害、植生被害、インフラ被害のような物的被害の実態が、明らかにされてきた。以上の知見は、津波という自然現象そのものの解明や被害の規模を評価する上で意義があるが、これらを防災計画に生かすためには、津波が持つ外力としての特性に対し、その外力に曝された社会が被害を受ける可能性（脆弱性）を明らかにし、脆弱性評価式として整備する必要がある。

本研究では、「2011 年東北地方太平洋沖地震津波」において、被災地の津波に対する脆弱性を定量的に評価することを目的とする。

(2) 地震津波概要

2011 年 3 月 11 日、東北地方太平洋沖で Mw9.0 の地震が発生した。地震に伴い発生した津波は、これまでに宮城県沖地震津波として想定されていた規模を大きく上回り、特に岩手県宮古市では最高遡上高 40 m を記録した（東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ、2011）。津波は、建物や海岸林、海岸構造物、海岸侵食など、東北地方だけでなく太平洋岸全域に甚大な被害をもたらし、我が国全体で全壊建物 127,197 棟（警察庁、2012 年 1 月）という激甚な被害をもたらした。

(3) 脆弱性の定義

Wisner ら (2004) によると、災害は危機が脆弱性と出会うことで起きる。従って、脆弱性 (Vulnerability) とは、危機を引き起こす原因となる自然現象 (Hazard) の規模と、Hazard が社会を襲った結果として引き起こされる被害の関係を示す指標であると考えられる。着目する Hazard の外力指標や、被害を受ける対象物によって、脆弱性の定義そのものが変化するが、本研究では、Hazard として津波浸水深や流速、津波力や浸水範囲、被害を受ける対象として建物に着目し、脆弱性 (Structural vulnerability against tsunami disaster) の評価を実施する。

(4) 脆弱性評価手法

本研究では、数値解析または現地調査により得られた津波ハザード情報と、リモートセンシングにより得られた建物被害情報を GIS 上で統合・分析することにより、津波に対する建物の脆弱性を評価する。津波に対する建物の脆弱性は、建物の構造種類や設計手法、地形条件や建物の密集状況等のような地域の特性により異なるため、地域毎にそれぞれ評価する必要がある。本研究では、2011 年東北地方太平洋沖地震津波被災地（宮城県）を事例として、津波に対する建物の脆弱性を評価する。

脆弱性の評価には津波被害関数を導入する。Koshimura ら (2009) によると、津波被害関数とは、津波数値解析技術の高度化およびリモートセンシング技術・地理情報システム (GIS) の普及を背景に提案された、新しい津波被害想定指標であり、津波による建物・人的被害の程度を被害率（死亡率）という尺度で、津波の流体力学的諸量（e.g. 浸水

*東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター

深、流速、波力等)の関数として表すものである。津波被害関数は、被害情報(建物被害率 P_D)と津波流況の関連性を回帰分析により求め、対数正規分布や正規分布を仮定した次式で表される。

$$P_D(x) = \Phi \left[\frac{\ln x - \lambda}{\xi} \right]$$

$$P_D(x) = \Phi \left[\frac{x - \mu}{\sigma} \right]$$

ここで、 x は最大流速、最大浸水深、津波外力などの外力指標で、 λ (または μ)、 ξ (または σ)はそれぞれ $\ln x$ または x の平均値と標準偏差である。本研究では、まず数値解析、もしくは現地調査により、浸水深、最大流速、津波外力のような津波流況の空間分布を明らかにする。次に、リモートセンシングにより建物被害の分布を解析する。最後に、GIS上でこれらを統合し、統計学的分析を通して、津波流況の外力指標と建物被害率の関係性を明らかにする。

2. 建物被害判読

(1) 手順

流失建物の目視判読には、2011年3月12、13、19日と4月1、5日に国土地理院により撮影された空間分解能 80 cm の航空写真を使用

した。被災前の建物の位置は、株式会社ゼンリンの住宅電子地図と、国土地理院 WebGISにて公開されている被災前の航空写真により特定した。図-1のように衛星画像により明らかにされた浸水域(図-2)に含まれる建物 162,015 棟を対象とし、建物屋根と影の有無に着目することにより、“残存”か“流失”の被害判読を実施した(図-3)。判読結果を(表-1)に示す。

(2) 流失建物棟数と人的被害との比較

次に、流失建物棟数と人的被害との関係性を、各行政区毎に推計・プロットし(図-1)、首藤(1987)による1896年明治三陸地震津波と1933年昭和三陸地震津波における調査結果との比較も行った。各イベント毎に近似曲線を引くと、明治三陸地震津波では流失建物一棟あたり4.2人($R^2=0.79$)、昭和三陸地震津波では1.03人($R^2=0.47$)が死亡したのに対し、本震災では流失建物一棟当たり0.25人($R^2=0.88$)死亡という結果が得られた。首藤(1987)によると、明治三陸地震津波のときは、先行する地震が小さくほとんど避難する人がいなかったことや、旧暦端午の節句で津波来襲時に在宅者が多かったため、死亡率が上昇したとのことであるが、本震災では、それらと比較的して、津波の規模の割に、かなり低い死亡率に抑えられたということがわ

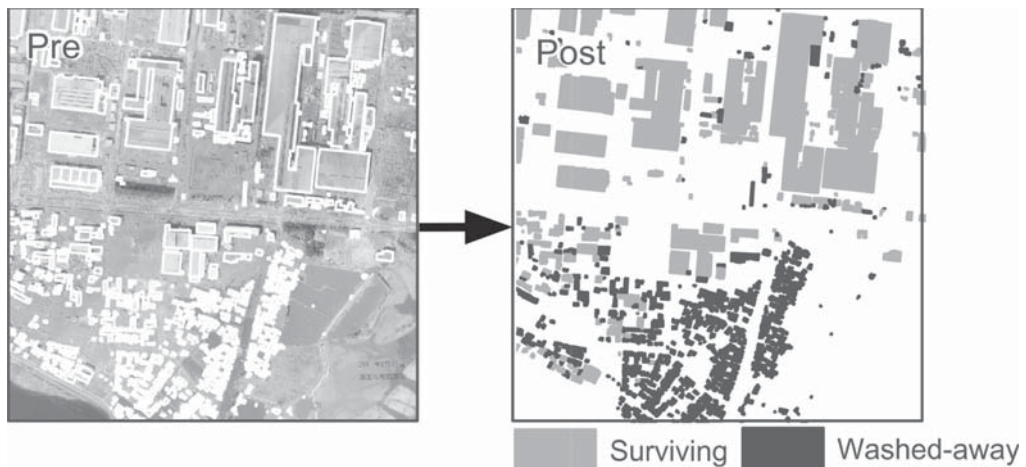


図-1：建物被害判読例

表-1: 航空写真による建物被害判読結果

行政区	浸水域内 建物棟数	流失建物 棟数	流失率 (%)
気仙沼市	11989	6598	55.0
本吉郡	8627	6867	79.6
女川町	4607	3459	75.1
石巻市	62440	12521	20.1
東松島市	16860	3171	18.8
塩竈市	8995	373	4.1
松島町	695	14	2.0
利府町	187	8	4.3
七ヶ浜町	3253	1120	34.4
多賀城市	6310	226	3.6
仙台市	13721	4329	31.6
名取市	5530	2810	50.8
岩沼市	5285	1298	24.6
亘理町	13516	4861	36.0

かった。また、近似曲線の相関係数も高く、全体として、避難行動の遅速や成否が表れていると考えられる。

(3) 津波被害関数の構築と脆弱性評価

目視判読により得られた建物被害判読結果と、現地調査により得られた浸水深分布をGIS上で統合・分析することにより、宮城県沿岸の各行政区毎に津波被害関数をそれぞれ構築した。浸水深分布は東北大学、宮城県、パシフィック・コンサルタンツ株式会社による宮城県内1700点の浸水深調査結果を用いて空間補間により作成した。津波被害関数の構築例を、(図-4)に示す((a)東松島市, (b)若林区, (c)岩沼市, (d)石巻市)。程度の差はあるものの、多くの行政区において、浸水深が2mを越えると被害率が急激に増加し始め、浸水深が4mに達する頃には80%~90%、浸水深が6mに達する頃にはほぼ100

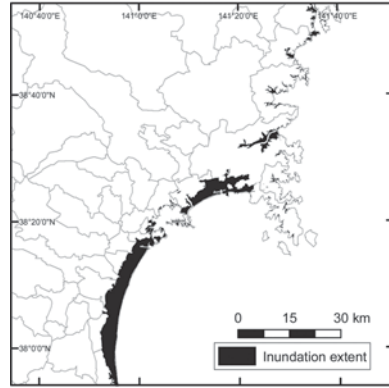


図-2: 衛星画像解析により得られた浸水域 (株式会社 PASCO より)

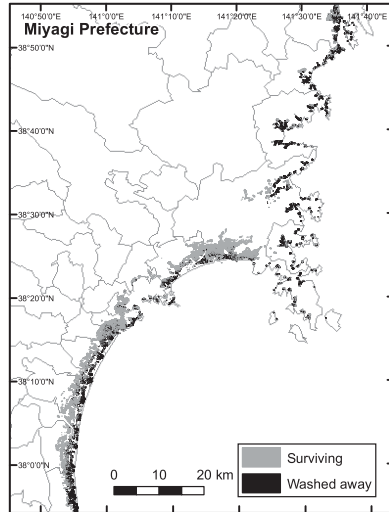


図-3: 建物被害判読結果 (宮城県浸水域内)

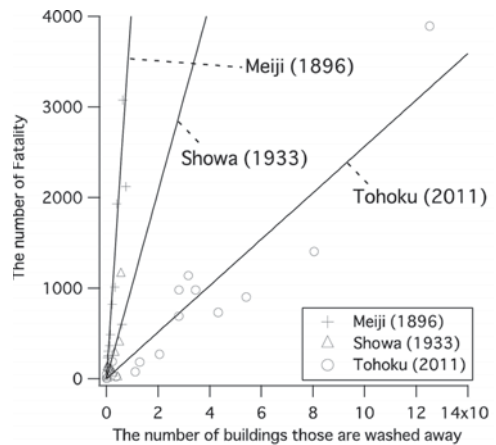


図-4: 既往災害と本災害における流失建物棟数と人的被害の関係

%の建物が流失するという結果が得られた。ただし、例外もいくつかある。たとえば、図-4 (d) の石巻市の津波被害関数では、浸水深が 6 m の地点でも 70 % 程度の被害率である。これは、防波堤や海岸林、その他沿岸構造物などの何らかの要因による津波減勢効果が影響していると考えられる。このように、同じ宮城県内においても、地域の様々な条件の違いにより、津波被害関数の形状が変化することが分かった。

(4) 津波被害関数例 (2011 年東北地方太平洋沖地震津波)

以上の被害関数を地域の防災計画に生かすための一例として、津波被害関数と浸水深分布図を掛け合わせて GIS 上で可視化することで、地域の脆弱性評価を実施することが可能になる。例えば、既往津波の浸水実績や数値シミュレーションの結果と被害関数を用いて、具体的に危険な地域の線引きを行う根拠となる資料が提案できる。図-5 は東松島市における脆弱性評価の例である。地域ごとに津波の危険度を表示することが可能である。

3. 結論

本研究では、2009 年サモア地震津波と 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の 2 事例において津波被害関数を構築し、地域により異なる建物の津波に対する脆弱性を定量的に評価した。数値解析により津波流況を推定して浸水域内の建物に対して被害関数を適用することで、建物被害の量的な推計が可能になる。ただし、現時点では津波浸水域内の全ての建物を対象とした被害関数であるため、建物構造別により詳細な被害関数を再構築することが今後の課題である。

さらに、津波被害関数の発展的な利用方法として、津波のリアルタイム解析との融合による即時的被害推計が挙げられる。近年の地震学の発展により、地震発生直後に震源情報を得ることが可能になった。即時的な震源情

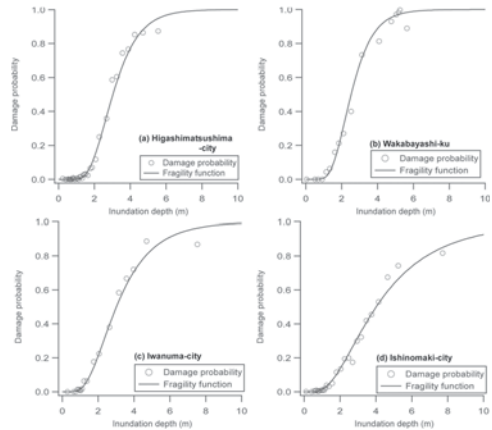


図-5: 各自治体において構築した津波被害関数例

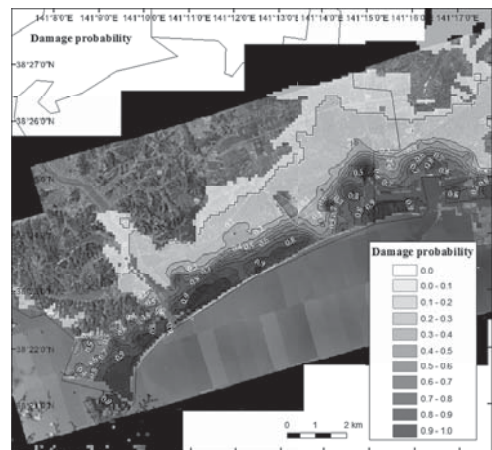


図-6: 津波被害関数による被害率のゾーニング (東松島市)

報を用いてリアルタイムで津波浸水解析を実施し、浸水域内建物の棟数を評価尺度として被災地を探索するとともに、被害建物棟数に関する具体的な推計情報を開示することで、巨大津波災害発生直後の迅速な被災地の探索、被害把握、災害救援活動を支援する情報の提供が可能になる。

謝辞

本研究の一部は、本研究の一部は平成 20 年度産業技術研究助成事業 (プロジェクト ID:08E52010a) および科学研究費補助金 (課

題番号：22681025, 21221007) の補助を受けて実施された。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- ・株式会社パスコ (2011) : 平成 23 年 (2011年) 東日本大震災に関する情報, http://www.pasco.co.jp/disaster_info/110311/
- ・警察庁 (2011) : 被害状況と警察措置, <http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/index.htm>
- ・国土地理院 (2011) : 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震正射画像データ (オルソ画像), <http://saigai.gsi.go.jp/h23taiheiyo-zort/index.html>
- ・首藤伸夫 (1987) : 津波災害の変遷, 東北大学工学部津波防災実験所研究報告
- ・東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (2011): オンライン, <http://www.coastal.jp/tjt/index.php>
- ・Beavan, J., X. Wang, C. Holden, K. Wilson, W. Power, G. Prasetya, M. Bevis and R. Kautoke : Near-simultaneous great earthquakes at Tonga megathrust and outer rise in September 2009,” *Nature*, Vol.466, 19,
- ・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 BandaAceh, Indonesia, *Coastal Engineering Journal*, Japan Society of Civil Engineers, No.3, 243-273.
- ・Koshimura, S., Y. Namegaya and H. Yanagisawa (2009) :Tsunami Fragility – A new measure to assess tsunami damage, *Journal of Disaster Research*, Vol. 4, No. 6, pp.479-488, 2009.
- ・Miura, H., A. C. Wijeyewickrema, and S. Inoue (2005): Evaluation of tsunami damage in the eastern part of Sri Lanka due to the 2004 Sumatra earthquake using high-resolution satellite images, *Proceedings of 3rd International Workshop on Remote Sensing for Post-Disaster Response*, pp.1-4.
- ・Wisner, B., P. Blaikie, T. Cannon, and I. Davis (2004) : *At Risk – Natural hazards, people’s vulnerability and disasters*. Wiltshire: Routledge. ISBN ISBN 0-415-25216-4.