

# リアルタイム津波浸水予測とリモートセンシングの 融合による広域被害把握の新展開

Fusion of Real-time Tsunami Simulation and Remote Sensing  
for Mapping the Impact of Tsunami Disaster

東北大学 災害科学国際研究所

越 村 俊 一

International Research Institute of Disaster Science,  
Tohoku University

Shunichi KOSHIMURA

## **SUMMARY**

Bringing together state-of-the-art high-performance computing, remote sensing and spatial information sciences, we establish a method of real-time tsunami inundation forecasting, damage estimation and mapping to enhance disaster response.

Right after a major (near field) earthquake is triggered, we perform a real-time tsunami inundation forecasting with use of high-performance computing platform. Given the maximum flow depth distribution, we perform quantitative estimation of exposed population using census data and the numbers of potential death and damaged structures by applying tsunami fragility curve. After the potential tsunami-affected areas are estimated, the analysis gets focused and moves on to the “detection” phase using remote sensing. Recent advances of remote sensing technologies expand capabilities of detecting spatial extent of tsunami affected area and structural damage. Especially, a semi-automated method to estimate building damage in tsunami-affected areas is developed using optical sensor data and a set of pre-and post-event high-resolution SAR (Synthetic Aperture Radar) data. The method is verified through the case studies in the 2011 Tohoku and other potential tsunami scenarios, and the prototype system development is now underway in Kochi prefecture, one of at-risk coastal city against Nankai trough earthquake. In the trial operation, we verify the capability of the method as a new tsunami early warning and response system for stakeholders and responders.

## **Key Words**

Tsunami, Real-time Simulation, Remote Sensing, Geo-informatics

## 1. はじめに

地震や津波災害といった巨大災害の発生直後は、激甚な被害を受けた地域からの情報が断片的となり、被害全容の把握がきわめて困難になるとともに、被災地の救援活動や復旧活動も難航する。2011年3月11日東北地方太平洋沖地震による大津波は、我が国史上最大規模の超巨大津波災害となった。特に岩手県から福島県にかけての津波被害は甚大であり、仙台平野では、海岸線から5km以上内陸まで津波が浸水し、一般家屋だけでなく、仙台空港などの重要なインフラ設備にも甚大な被害をもたらした。津波の被災地は広大であり、発災直後には、激甚な被災地がどこにあるかを把握することさえ困難であると同時に、現地調査期間や人的資源の制約により被害全容を把握するにはきわめて長い時間を要した。

災害対応にまず必要なのは、命を守るための避難行動や救助活動だけでなく、被害の全容を把握することである。災害の影響下にある人がどこにいて、どのような状況に置かれているのか、安全な場所はどこか、どのくらいの被害が発生するのかなど、リアルタイムで得られる観測データやシミュレーション手法を用いてまず推定する必要がある。

本稿では、この課題の解決にむけて、著者らが取り組んでいる津波数値シミュレーションとリモートセンシングを融合した広域被害把握手法の確立に向けた展望を論ずる。

## 2. 津波数値解析による浸水予測

津波の伝播・陸上遡上の予測には、その領域（沖合・沿岸および浅海域の伝播、陸上での遡上）と分解能（空間・時間）に応じて数値モデルを使い分ける必要がある。いずれにせよ、支配方程式を差分法により離散化する方法が一般

的である。例えば、水深50m以上の沖合においては、津波伝播・波高増幅の非線形性はほぼ無視できるから、運動方程式については線形長波理論が支配方程式になる。あるいは、長距離を伝播する津波を再現する際には波数分散性が無視できなくなるので、分散波理論を用いる。津波が浅海域に達し、陸上での遡上を再現する場合には、非線形長波の運動方程式（浅水理論）に底面摩擦項を付加したものをを用いるのが一般的である。

長波理論の差分法に基づく津波数値計算の場合、座標系と支配方程式を、再現する津波の対象（遠地／近地、外洋伝播／遡上）に応じて適切に選択する必要がある。2011年東北地方太平洋沖地震津波の場合、日本近海の津波の再現には直交座標系による非線形長波理論式を、太平洋全体への外洋伝播を含めた津波を再現する場合には球面座標系による分散波理論式および線形長波理論式が必要である。津波数値解析手法

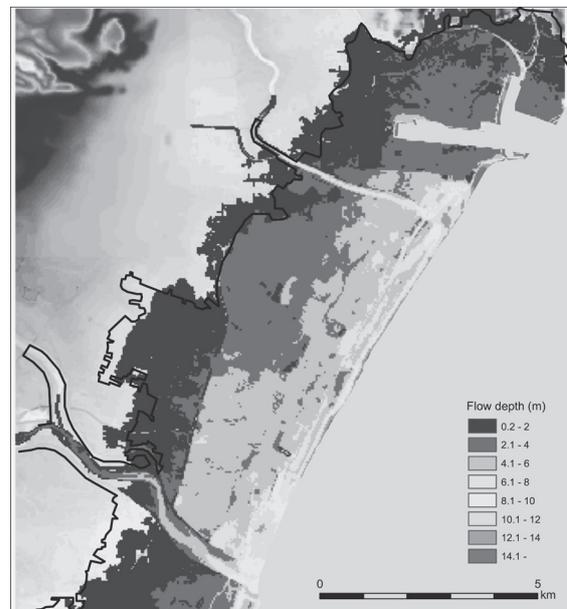


図1 2011年東北地方太平洋沖地震津波の仙台市における再現シミュレーションの結果（津波浸水深と浸水範囲）。図中の実線は、国土地理院により報告された浸水限界のライン<sup>[3]</sup>。

における支配方程式や格子間隔の選択や計算精度の検証についての議論は、参考文献<sup>[1]</sup>を参照されたい。

正確な津波の予測・再現には、方程式系の適切な選択、津波初期水位分布（断層運動による海底地盤変動）、詳細な海底・陸上地形の情報と計算の分解能、土地利用状況等による陸上の津波抵抗則の適切なモデル化等が重要な要件となる。

ここでは、2011年東北地方太平洋沖地震津波を再現し、数値シミュレーションの妥当性を評価した結果を例示する。仙台平野を遡上する数値シミュレーションでは、初期条件（津波波源モデル）について津波の浸水域および遡上高分布についての再現性が高い東北大学モデル ver.1.1 を採用した<sup>[2]</sup>。また、津波遡上計算の空間分解能は10mとし、土地利用状況（河道、海岸、農地、市街地等）に応じた抵抗則を導入している。図1に例示するのは、仙台市における津波浸水計算（今次津波の再現）の結果であり、浸水深の空間分布を示したものである<sup>[3]</sup>。現地調査で得られた浸水深・浸水高分布、また国土地理院による浸水範囲の調査結果等で検証を行い、計算結果の再現性が高いことを確認した。近年では、数値解析の検証には、現地調査等による津波高（遡上高・浸水高、浸水深、浸水範囲）の他、GPS等により観測された地盤変動（陸上・海底）、沖合、沿岸の津波観測波形、津波来襲状況の映像から得られる浸水深や流速等の情報<sup>[4,5]</sup>を用いて、総合的な検証が行われるようになった。

### 3. 建物の脆弱性と津波被害関数

津波浸水域内の家屋の流失状況を俯瞰して見ることは極めて重要である。建物被害状況と、防波堤・防潮堤等の海岸施設の被害状況と関連づけることで、海岸施設がどの程度被害軽減に

寄与したかなど、これまでの津波防災対策の検証を行う必要がある。

津波による被害の量的な推計には、対象とする地域の津波浸水深（地表面から測定した津波高さ）や流速等の外力を数値解析により推定し、それら外力との関連で建物被害棟数や人的被害数を求めるのが一般的であった。津波被害実績から浸水深と家屋被害程度の関係調べ、津波外力と被害の関係について津波強度指標を用いて表現した首藤（1992）が代表例であるが<sup>[6]</sup>、近年の高分解能衛星画像や航空写真を利用したりリモートセンシング技術の飛躍的発展や地理情報システム（GIS）の普及もあり、津波の外力と被害程度の関係についてのデータの蓄積が飛躍的に進んだ。

このような背景のもと、新しい津波被害想定指標である「津波被害関数（Tsunami Fragility Curve）」が提案され、国や地方自治体の津波被害想定にも利用されている<sup>[7]</sup>。津波被害関数とは、津波による家屋被害や人的被害の程度を被害率（または死亡率）として確率的に表現し、津波浸水深、浸水高、氾濫流速、波力といった津波の流体力学的諸量の関数として記述するものである<sup>[8,9]</sup>。

図2に示すのは、2011年東北地方太平洋沖地震津波の宮城県における津波被害関数の例<sup>[10]</sup>であり、建物の流失率を浸水深に対してまとめたものである。地域によってその特性は異なるものの、全体として言えることは、建物にとって流失する危険性が増すのは浸水深2mからであり、6m浸水すると、ほとんどの建物が流失してしまうということである。土地利用計画や津波対策を考える上では、居住地域における津波浸水が2mを超えることの無いように災害危険区域等の設定を行う必要がある。

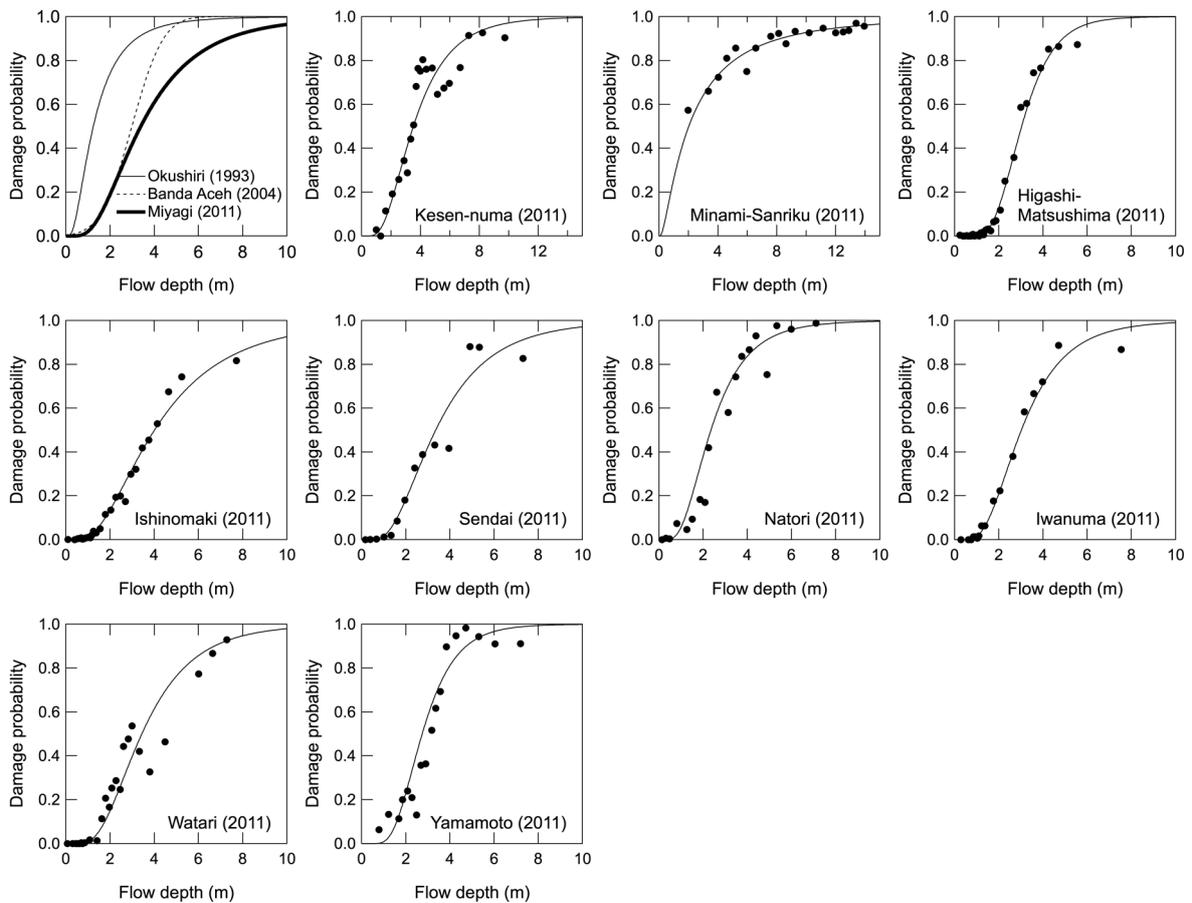


図2 2011年東日本大震災における被害データから得られた津波被害関数<sup>[10,11]</sup>。

#### 4. リアルタイム津波浸水予測技術

我が国の津波予報は気象庁が発令する。気象庁の津波予報技術とは、我が国を66の予報区に分割し、予報毎に何メートルの高さの津波が来襲するかを予測するものであり、事前の10万通り以上の地震断層シナリオから得られた津波高予測データベースを基盤としているが、浸水予測は行わない。著者らが目指すのは、詳細な浸水域と被害の早期予測であり、「津波の高さ」だけでなく、「浸水域」を予測してそれを発信することで、災害初期の対応を支援できると考えた。津波の陸上遡上の予測は、特に東日本大震災において多くの映像記録があり、土地利用や構造物の有無を適切に表現することで、浸水域

の予測が精度良く行えることも確認している<sup>[12]</sup>。また、浸水域内の人口や建物棟数、流失棟数など、より具体的な被害の情報を量的に予測することで、より迅速・効果的な救援活動に貢献できる<sup>[13,14]</sup>。

リアルタイム津波浸水・被害予測情報配信の実現に向けた課題は3つある。

1点目は、津波の発生予測である。津波数値計算の初期条件には、断層破壊の具合的なメカニズムに関連した断層モデルが必要で、特に地震学・測地学の研究者との連携が必要になる。近年、GEONETをはじめとする衛星測位(GNSS)技術の発展を背景とした新しい地震・地殻変動観測が普及しており、津波発生モデルの精度向上に期待が持てる<sup>[15]</sup>。一方、従来のワ

ークステーションであれば浸水予測の実行には数時間以上の時間が必要であり、リアルタイムでの予測は技術的に困難であったが、High Performance Computing Infrastructure (HPCI) の普及がその課題解決の追い風になっている。例えば、著者らの研究グループは、津波の予測計算の高速化を、東北大学サイバーサイエンスセンターのベクトル型スーパーコンピュータ SX-ACE の独自運用（ディザスターモード：地震発生時に所要の計算リソースを即座にアサインする）により実現し、いつ地震が発生してもスパコンのパフォーマンスを確保している<sup>[16]</sup>。産学連携研究の結果、10分以内に津波の発生（断層モデル）を予測、10mメッシュという高分解能の浸水計算を、10分以内に完了することを具体的な目標とした。我々はこれを10-10-10（トリプル・テン・チャレンジ）と名付けて実証に取り組み、目標を達成することができた。ちなみに、我が国のスパコンの代表格といえ、京コンピュータであるが<sup>[17]</sup>、東北大学の津波解析プログラムのパフォーマンスは、コア数が同じであればSX-ACEの方が性能が出せることを確認している（図3）<sup>[16]</sup>。

2点目は、被害の予測である。津波の浸水域は、湾の構造や建物の密度などによって左右される。量的な被害予測を行うためには、木造建築物と鉄筋コンクリート造などの建物が、どれくらいの津波で破壊されるのか量的に解析する必要がある。建物の位置と場所を正確に把握し、津波被害関数から得られる流失率を求めることで、10m区画まで細分化した浸水予測結果から建物被害の予測が可能になった。現在、総務省の事業において、高知県での試験運用を行っているところである<sup>[13,14]</sup>。

そして3点目が、この予測を情報利用者に確実に届けるシステムを確立することである（図4）。細分化した正確な被害予測をしても、それ

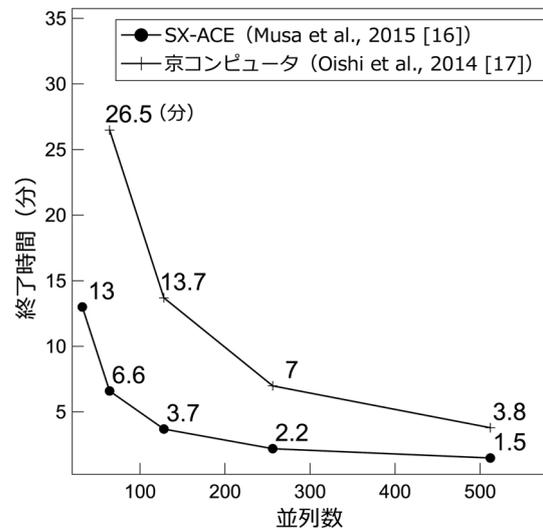


図3 スパコン SX-ACE を利用した津波浸水計算の性能<sup>[16]</sup>（縦軸は2時間分の浸水予測に要する時間、横軸はCPUのコア数）。

が人々に伝わらなくては意味がない。災害時においても情報伝達の早さと確実性が期待されているのが「準天頂衛星」である。「準天頂衛星」とは、測位の精度を高めるために考案された衛星システムであり、常に日本のほぼ真上を衛星が飛んでいる状況にすることで、ビルや山などにさえぎられることなく、正確な測位サービスを提供することができる。しかも、準天頂衛星は、測位の精度を上げるだけでなく、携帯端末などへの一斉メッセージの送信を行えるので、情報伝達に時間のロスなく、個人の携帯電話や漁船、車、防災無線などに情報を送ることができるため、災害時への重層的な情報伝達に適している。著者らのチームでは、NTT西日本が中心となり、準天頂衛星とエリアメールを活用した実証実験を、2015年1月に静岡市で行った<sup>[13]</sup>。実証実験においては、留学生を含む学生を中心とした協力者に準天頂衛星メッセージの受信端末を備えたスマートフォンを持って頂き、津波情報の受信後、決められた避難所に迅速に避難を完了できるかを評価した。この技術が実用化

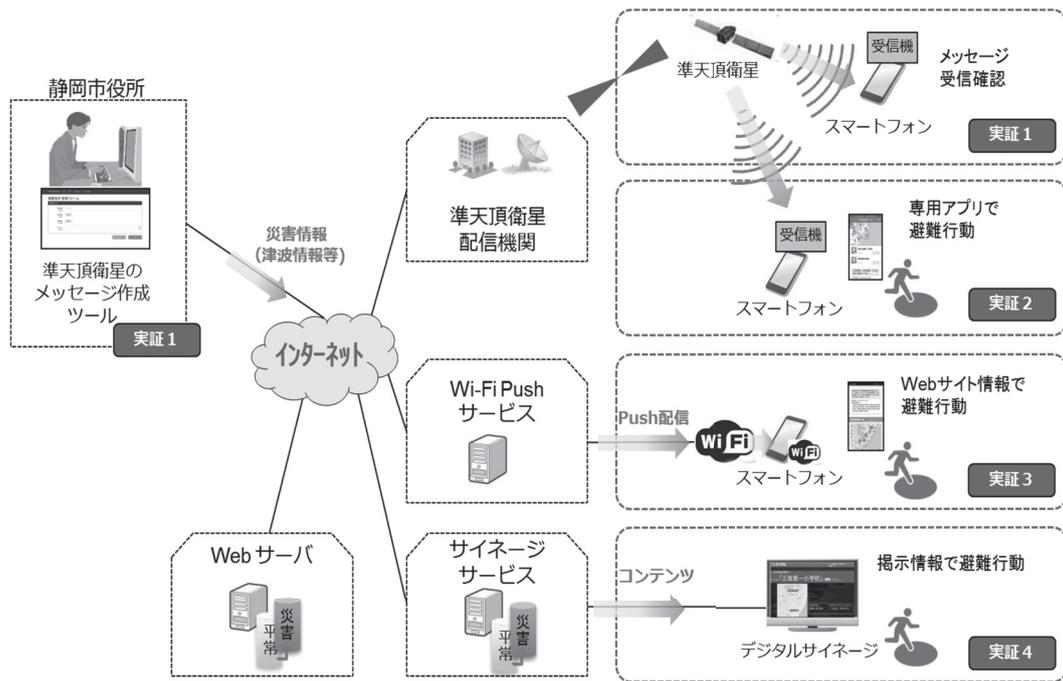


図4 準天頂衛星等を活用した多層的な情報伝達の枠組み（総務省 G 空間シティ構築事業から）<sup>[13]</sup>。

されると、避難情報が届かない、どこに避難すれば良いのか分からないという問題を解決することができ、土地勘や災害への備えのない国内外からの来訪者に対しても安心安全な避難行動を支援することが可能になる。

## 5. リモートセンシングによる広域被害把握

ここでは、近年その技術的発展が著しいリモートセンシングと地理情報システム (GIS) を活用することにより、巨大地震災害発生直後の広域被害把握のための技術体系を確立できる<sup>[18]</sup>。本稿では津浸水域内建物棟数の推計、建物被害およびその空間分布の把握についての手法と課題を論ずる。

広域被害把握という観点では、津波浸水域をどのようにして把握するかが最初の課題である。地震発生直後から、複数の機関による緊急観測が実施された。ここでは、広大な津波浸水域の空間分布を把握するために、JAXA 陸域観測技術

衛星「だいち」(ALOS) の光学センサ (AVNIR-2) による画像を利用した。ALOS は、標高などの地表の地形状況を把握するパンクロマチック立体視センサ (PRISM)、土地被覆や土地利用状況の把握のための可視近赤外放射計 2 型 (AVNIR-2)、および昼夜を問わず陸域観測が可能な L バンド合成開口レーダ (PALSAR) の 3 つの地球観測センサを搭載している。AVNIR-2 センサは、RGB の可視光の 3 バンドに加え、近赤外のセンサももち、地上分解能は直下視で 10m である。解析に利用したのは、2011 年 3 月 14 日に撮影された ALOS AVNIR-2 画像である。これまで、様々な機関が衛星画像解析による 2011 年津波の浸水域の把握に取り組んできたが (たとえば JAXA, 2011<sup>[19]</sup>)、ここでは津波の浸水域の抽出に水の分光特性に着目した指標を用いる。水の反射率は、水中に含まれる懸濁物質の種類と量によって複雑に変化するが、分光特性としては青の波長域にピークを持ち、波

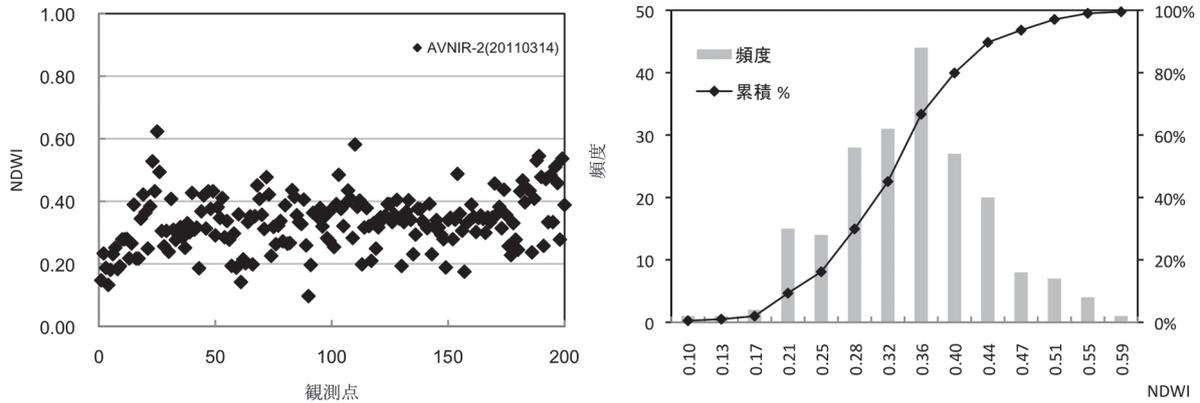


図5 仙台平野の津波遡上限界測定点における NDWI の分布<sup>[18]</sup>。

長が長くなると急速に反射率が低くなる傾向がある。ここでは、正規化植生指標（NDVI = Normalized Difference Vegetation Index）の計算法からの類推で、正規化水指標を次式の通り定義する。一般的に、正規化水指標は赤波長（R）と中間赤外波長（SWIR）を用いて求められるが<sup>[20]</sup>，ここでは NDWI を次式で定義する<sup>[21]</sup>。

$$NDWI = \frac{NB - NIR}{NB + NIR}$$

ここで、NIR は近赤外域の輝度、NB は可視光の Blue band の輝度である。NDVI と同様に、NDWI の値は -1 から 1 までであり、NDWI の値が高いほど浸水の可能性が高い（従って、河道内や水域・海域における NDWI は常に高い値になる）。

一方、本研究では津波発生前の画像は用いないので津波前後の変化抽出による浸水域の抽出は行わない。代わりに、浸水限界に関する現地調査結果に基づき、NDWI の閾値を決定して浸水域の抽出を行う。現地調査では、津波被災地において漂流物の漂着地点を把握、または現地における聞き取り調査により、津波の浸水限界点の緯度・経度・標高値の高精度 GPS 測位を実施した<sup>[22]</sup>。使用したのは、3月26日から7月初

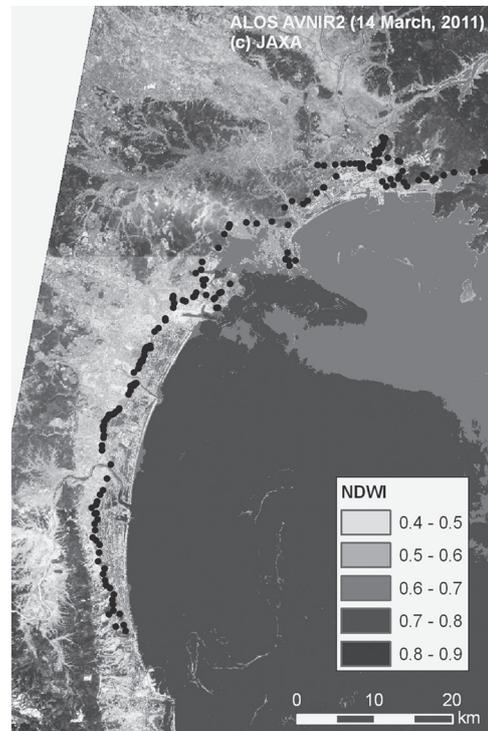


図6 NDWI=0.4を閾値として推定した津波浸水域<sup>[18]</sup>。

旬までに宮城県（石巻市から山元町にかけて）において得られた計 205 地点の浸水限界点の測定結果である（東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループのウェブページ<sup>[22]</sup>を参照）。ここで GPS 測位は、まず調査地域内に私設基準点を設置し、スタティック測位（測位方法の一つ）

後に遠方の電子基準点を用いて基線解析を実施し、私設基準点の正確な座標を得た。その後調査者が移動局を持って浸水限界点のスタティック測位を行い、私設基準点のデータを利用して解析・補正した。

図5に、宮城県南部の津波遡上限界点におけるNDWIの分布を示す。AVNIR-2画像の取得日は2012年3月14日(GMT)であり、ここから得られるNDWIの分布は津波来襲から4日後のものであることに注意が必要である。例えば、現地調査では、漂流物の漂着や浸水痕跡といった物証があった地点を津波遡上限界点として測定

しており、その信頼度は高い。NDWIは、値が高くなるほど浸水の可能性が高いことを示しているが、もともと遡上限界点では完全に湛水していない、津波来襲から3日経過しているということを考慮しながら、現地調査による津波浸水限界と整合するよう、累積分布で80%にあたるNDWI = 0.4を閾値として浸水範囲の特定を試みた。

図6に示すのは、NDWI > 0.4の地域と現地調査による遡上限界点をプロットした地図である。本結果は、現地調査の測定結果を校正データとしてNDWIの閾値を求めたが、このような

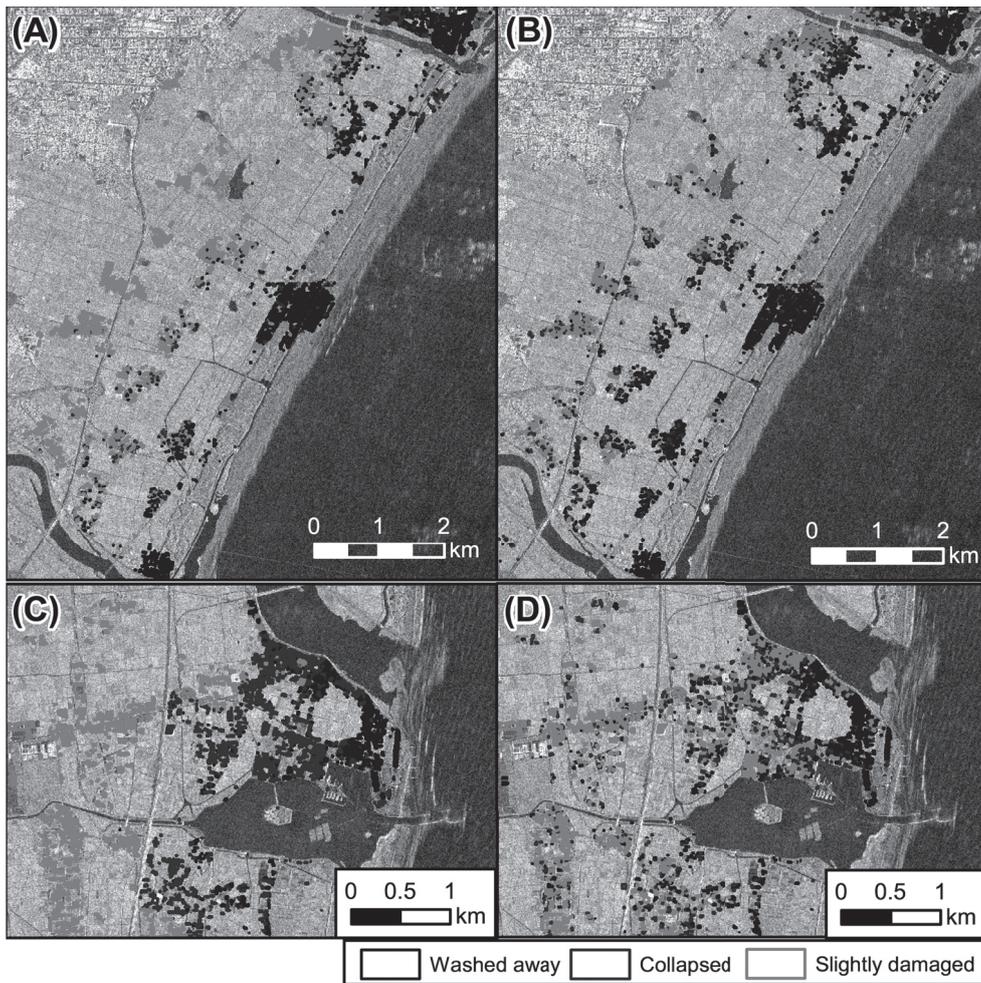


図7 TerraSAR-Xの後方散乱係数の変化抽出から得られた建物被害抽出結果 (A：仙台市の被害実態，B：仙台市の被害抽出結果，C：亶理町の被害実態，D：亶理町の被害抽出結果)。

知見を用いながら NDWI という指標を用いて津波浸水域を抽出することで、広域津波浸水域の推定が可能であることを示すことができた<sup>[23]</sup>。

また、光学画像だけでなく、昼夜・夜間、天候の影響を受けずに撮像が可能な合成開口レーダを利用した被害把握技術にも期待がかかる。例えば、3m という高い分解能をもつ X バンド合成開口レーダー（TerraSAR-X）の被災前後の変化抽出手法の開発が進み、東日本大震災における建物被害の量的な把握が可能である（図 7）<sup>[24, 25, 26]</sup>。

JAXA によって 2014 年に運用が開始されただいち 2 号（ALOS-2/PALSAR-2）の合成開口レーダは L バンドであるが、同様に被害の量的把握に向けた期待が大きい。

## 6. まとめ

東日本大震災における津波被害の教訓を踏まえ、我が国が持つ最先端のシミュレーション・リモートセンシングを統合して、津波発生直後のきめ細かな被害情報推定・把握が可能になる。このような先端技術が実際にどの程度被害軽減に貢献できるかを検証する必要がある。これについては、東京大学が 2011 年東日本大震災時の石巻市の災害対応データを詳細に分析して、先端技術導入の効果を検証した<sup>[13]</sup>。たとえば、リアルタイム被害予測情報の取得により、災害対応のリードタイムを大幅に短縮できること、被害量の迅速な把握により状況把握までの期間を大幅に短縮できること、仮設住宅等の土地を必要とする対応について、土地情報のデータベース化により利用可能な土地の検討に関する工数を大幅に削減できることなど、様々な災害対応の局面において有効に活用できることが実証されつつある。迅速な被害情報の把握と発信を通じて被災地を支援し、災害に対するレジリエンス（回復力）の向上に資するための防災モデル

を全国的に展開することを今後の目標としたい。

## 参考文献

- [1] 高橋智幸 (2002). 水工学に関する夏期研修会講義集, 38, 土木学会, B-5-1-20.
- [2] 今村文彦, 越村俊一, 村嶋陽一, 秋田善弘, 新谷勇樹 (2011). 東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施, 東北大学モデル (version1.1). [http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/tohoku\\_2011/model/dcrc\\_ver1.1\\_111107.pdf](http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/tohoku_2011/model/dcrc_ver1.1_111107.pdf)
- [3] Koshimura, S., S. Hayashi, H. Gokon (2013). *Lessons from the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Disaster*, Journal of Disaster Research, Vol.8 No.4, pp.549-560.
- [4] Hayashi, S. and S. Koshimura (2013). *The 2011 Tohoku Tsunami Flow Velocity Estimation by the Aerial Video Analysis and Numerical Modeling*, Journal of Disaster Research, Vol.8 No.4, pp.561-572.
- [5] Koshimura, S., S. Hayashi, H. Gokon (2014). *The impact of the 2011 Tohoku earthquake tsunami disaster and implications to the reconstruction*, Soils and Foundations, Vol.54, 4, pp.560-572.
- [6] 首藤伸夫 (1992). 津波強度と被害, 東北大学津波工学研究報告, 第9号, pp.101-136.
- [7] 内閣府 (2012). 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 (2012年 8月29日) [http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/20120829\\_gaiyou.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/20120829_gaiyou.pdf)
- [8] 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, JSCE, Vol.51, No.3, pp.243-273.
- [9] 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.

- [10] 越村俊一, 郷右近英臣 (2013), 2011年東北地方太平洋沖地震津波災害における建物脆弱性と津波被害関数, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I\_336-I\_340, 2012.
- [11] 林 里美, 成田裕也, 越村俊一, 東日本大震災における建物被害データと数値解析の統合による津波被害関数, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I\_386-I\_390.
- [12] 林 里美, 越村俊一 (2012). 映像解析による2011年東北地方太平洋沖地震津波の流速測定, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, I\_366-I-370.
- [13] 総務省 (2015). G空間シティ構築事業  
[http://www.soumu.go.jp/main\\_sosiki/joho\\_tsusin/top/local\\_support/02ryutsu06\\_03000054.html](http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/top/local_support/02ryutsu06_03000054.html)
- [14] 総務省 (2015). G空間防災システムとLアラートの連携推進事業  
[http://www.soumu.go.jp/main\\_sosiki/joho\\_tsusin/top/local\\_support/95151.html](http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/top/local_support/95151.html)
- [15] Ohta, Y., T. Kobayashi, H. Tsushima, S. Miura, R. Hino, T. Takasu, H. Fujimoto, T. Iinuma, K. Tachibana, T. Demachi, T. Sato, M. Ohzono, and N. Umino (2012). *Quasi real-time fault model estimation for near-field tsunami forecasting based on RTK-GPS analysis: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0)*, Journal of Geophysical Research, Vol.117, B02311, doi:10.1029/2011JB008750.
- [16] Musa, H. Matsuoka, Y. Murashima, S. Koshimura, R. Hino, Y. Ohta, H. Kobayashi (2015). *A Real-Time Tsunami Inundation Forecast System for Tsunami Disaster Prevention and Mitigation*, SC15 Extended Abstract.
- [17] Oishi, Y., F. Imamura, and D. Sugawara (2015). *Near-field tsunami inundation forecast using the parallel TUNAMI-N2 model: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake combined with source inversions*, Geophys. Res. Lett., 42, 1083-1091, doi: 10.1002/2014GL062.
- [18] 越村俊一, 郷右近英臣, 福岡巧巳, 林 里美 (2012). リモートセンシングによる2011年東北地方太平洋沖地震津波の広域被害把握, 日本地震工学会論文集, 第12巻, 第6号 (特集号), pp.50-62.
- [19] 宇宙航空研究開発機構 (2012). 東日本大震災対応報告書～地球観測衛星及び通信衛星による対応の記録～, 104p.
- [20] Takeuchi, W. and Y. Yasuoka (2004). *Development of normalized vegetation, soil and water indices derived from satellite remote sensing data*. 25th Asian Conference of Remote Sensing (ACRS): Changmai, Thailand.
- [21] Wolf, A. (2010). *Using WorldView 2 Vis-NIR MSI Imagery to Support Land Mapping and Feature Extraction Using Normalized Difference Index Ratios*.  
[http://www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/8\\_bands\\_Antonio\\_Wolf.pdf](http://www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/8_bands_Antonio_Wolf.pdf)
- [22] 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (2011). 現地調査結果,  
<http://www.coastal.jp/ttjt/>
- [23] 国土地理院 (2011). 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](http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohoku.html)
- [24] 郷右近英臣, 越村俊一, 松岡昌志 (2014). TerraSAR-X画像のオブジェクトベース解析による建物被害推計技術の開発, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp. I\_1481-I\_1485.
- [25] 郷右近英臣, J. Post, E. Stein, S. Martinis, A. Twele, M. Muck, 越村俊一 (2013). TerraSAR-X画像の機械学習による津波被災地の自動検出, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.69, No.2., pp.I\_1441-I\_1445.
- [26] Gokon, H., J. Post, E. Stein, S. Martinis, A. Twele, M. Muck, C. Geiss, S. Koshimura and M. Matsuoka (2015). *A Method for Detecting Devastated Buildings by the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Using Multi-temporal TerraSAR-X Data*, Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, doi: 10.1109/LGRS.2015.2392792.

(原稿受付日: 2016年1月18日)

(掲載決定日: 2016年2月5日)