

## リアルタイム津波浸水被害予測技術の実証

### Establishing Real-time Tsunami Inundation Forecasting System

○ 越村俊一<sup>1</sup>, 井上拓也<sup>2</sup>, 日野亮太<sup>3</sup>, 太田雄策<sup>3</sup>, 小林広明<sup>4</sup>, 撫佐昭裕<sup>5</sup>,  
 村嶋陽一<sup>6</sup>, 目黒公郎<sup>7</sup>  
 Shunichi KOSHIMURA<sup>1</sup>, Takuya INOUE<sup>2</sup>, Ryota HINO<sup>3</sup>, Yusaku OHTA<sup>3</sup>, Hiroaki  
 KOBAYASHI<sup>4</sup>, Akihiro MUSA<sup>5</sup>, Yoichi MURASHIMA<sup>6</sup>and Kimiro MEGURO<sup>7</sup>

<sup>1</sup>東北大学 災害科学国際研究所

International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University

<sup>2</sup>東北大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Tohoku University

<sup>3</sup>東北大学大学院理学研究科

Graduate School of Science, Tohoku University

<sup>4</sup>東北大学サイバーサイエンスセンター

CyberScience Center, Tohoku University

<sup>5</sup>日本電気株式会社

NEC Corporation

<sup>6</sup>国際航業株式会社

KOKUSAI KOGYO CO., LTD.

<sup>7</sup>東京大学 生産技術研究所

Institute of Industrial Science, the University of Tokyo

Bringing together state-of-the-art high-performance computing, 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. Using Tohoku University's vector supercomputer, we accomplished "10-10-10 challenge", to complete tsunami source determination in 10 minutes, tsunami inundation modeling in 10 minutes with 10 m grid resolution. Given the maximum flow depth distribution, we perform quantitative estimation of exposed population using census data and mobile phone data, and the numbers of potential death and damaged structures by applying tsunami fragility curve. 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.

**Keywords :** Real-time Simulation, Tsunami Inundation Forecasting, Tsunami Fragility Curve, Structural Damage, High Performance Computing Infrastructure

#### 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はなく、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、著者らが産学連携研究として取り組んでいるリアルタイム津波浸水・被害予測技術の実証と課題について報告する。

#### 2. リアルタイム津波浸水予測技術

いうまでもなく、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予測・予報を行っているが、浸水予測は行っていない。

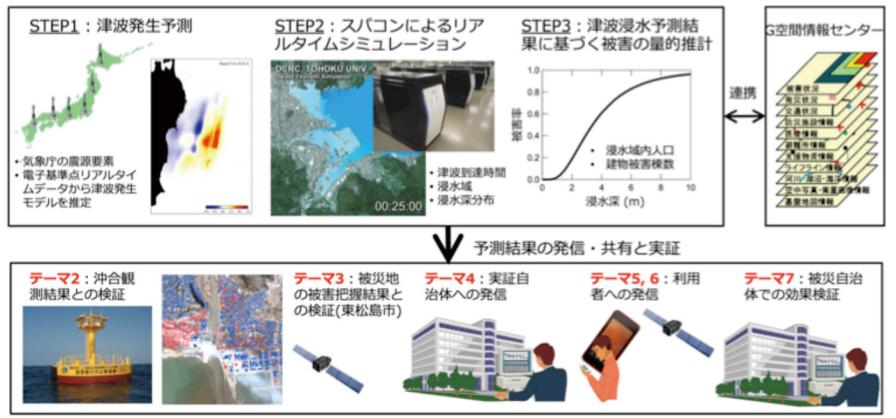


図-1 リアルタイム津波浸水・被害予測システムの全体像と実証課題.

著者らが着目しているのは、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、よりよい迅速な避難行動や災害初期の対応を支援することである。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、迅速・効果的な救援活動に貢献できると考えた。

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・伝播遡上の予測の迅速化である。まず、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(たとえばOhta et al., 2012)。本システムでは、地震情報の取得に、緊急地震速報とOhta et al. (2012)によるGEONETの地殻変動観測情報を用いたリアルタイム断層モデル推定法によるメカニズム解を即時に取得し、津波波源モデルの計算過程を自動化した。次に、浸水予測の実行である。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が分かっている。一方、従来のワークステーションを利用すると、予測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)の発展が課題解決の追い風になっている。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ーパコンのパフォーマンスを確保している(Musa et al., 2015)。ここでは、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。これを10-10-10(トリプル・テン・チャレンジ)と称して開発・実証に取り組み、目標を達成することができた。ちなみに、我が国のスーパコンの代表格といえば、京コンピュータであるが、東北大学の津波解析プログラムは、コア数が同じであればSX-ACEの方が計算効率が高いことも確認することができた(図-2)。

2点目は、被害の量的な予測である。津波の浸水域は、来襲する津波の高さだけでなく、入射する津波の波長・周期と地形との関係、湾の構造、土地利用状況や建物の密集度などによって左右される。量的な建物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種別に対応した被害推定式を解析に組み込む必要がある。

これまで、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を調べ、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、近年の高分解能衛星画像や航空写真を利用した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(Koshimura et al., 2009)、国や地方自治体の津波被害想定にも利用されている。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。図-3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であり(越村・郷右近, 2013)、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。

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。図-4に示すのは、高知県のリアルタイム津波浸水被害予測システムの地図作成機能による出力例である。南海トラフ地震発生から15分以内に3時間分の浸水・被害予測を実施し、津波到達時間、浸水開始

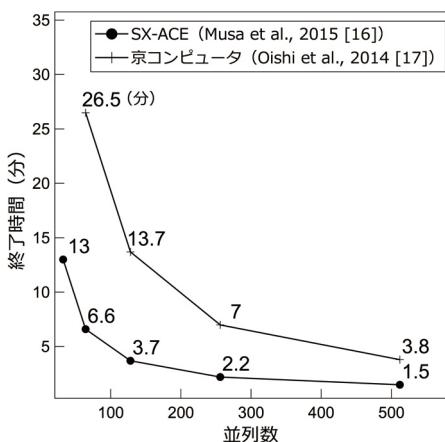


図-2 東北大学のスパコン SX-ACE を利用した津波浸水計算の性能(Musa et al., 2015). 縦軸は 2 時間分の浸水予測に要する時間、横軸は CPU のコア数.

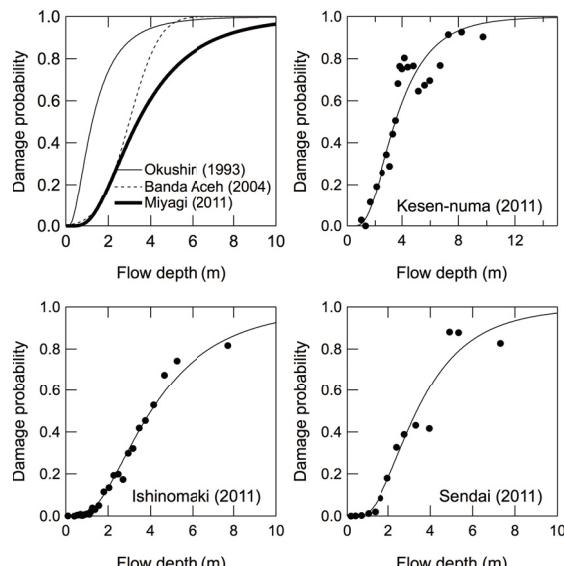


図-3 2011 年東日本大震災における被害データから得られた津波被害関数の例 (たとえば越村・郷右近, 2013) .

時間、浸水域・避難所位置図、浸水域内人口（中間・夜間）、建物被害推計の結果を表示することに成功した。

そして 3 点目が、予測結果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。細分化した正確な被害予測をしても、それ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。著者らの実証チームでは、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。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

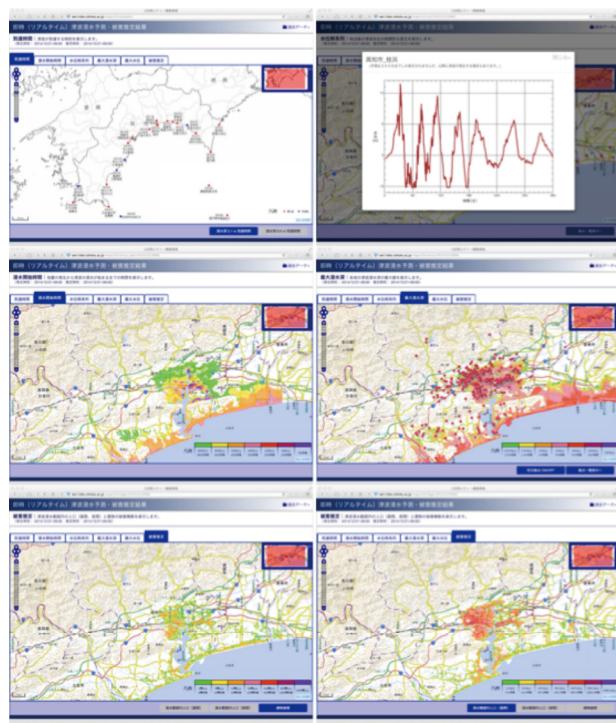


図-4 高知県で運用中のリアルタイム津波浸水被害予測システムの出力結果例、上段左から：津波到達時間、津波波形、中段左から：浸水開始時間、津波浸水深、下段左から：浸水域内人口、建物被害分布.

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(図-4)。この技術が実用化されると、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できる。

さらに、本システムによる予測結果を公的な情報として広く配信するために、L アラート（災害情報共有システム）との連携も実証した。L アラートとは、総務省が推進している災害情報共有システムであり、災害発生時やその復興局面等において、公共情報を発信する自治体・ライフライン事業者などと、それを伝える放送事業者・通信事業者を結ぶ共通基盤として活用されている。

「情報発信者」と、放送事業者、新聞社、通信事業者などその情報を住民に伝える「情報伝達者」とがこの情報基盤を共通に利用することによって、効率的な情報伝達が実現できる。

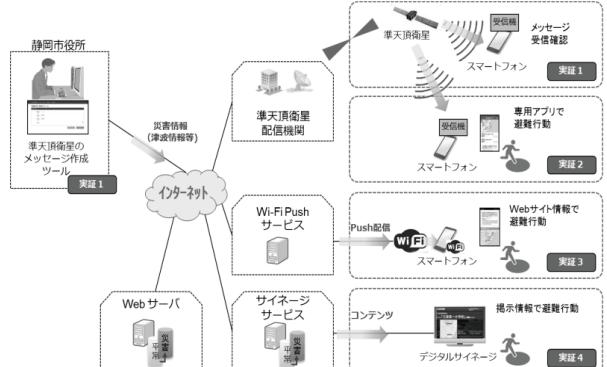


図-5 準天頂衛星等を活用した多層的な情報伝達の枠組み（総務省 G 空間シティ構築事業から）.

### 3. リアルタイム津波浸水・被害予測技術の実証

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。

目黒・沼田は、独自の総合的防災マネジメント理論に基づく、石巻市の次世代災害対応システム（BOSS）を構築中であり、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。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。特に、2015年11月に宮城県石巻市で開催された総合避難訓練においては、リアルタイム数値解析が終了する20分後に、津波浸水予測結果の記載されたURLを地域住民（小学校関係者）へ配信し、その効果を検証した。また、アンケート調査の結果、本システムが役に立つと感じた住民が89%を占め、本手法の有効性を実証する事ができた。また、タブレット端末とBOSSを組み合わせる事により、目黒らが開発した避難所の安否確認システム（COCOA）により、地方自治体職員や自主防災組織の方々の業務工数削減に与える効果を検証することができた。

### 4. まとめ

東日本大震災における津波被害の教訓を踏まえ、特に太平洋岸と日本海溝沿いの高密度地震津波観測網の整備も背景となり、津波浸水被害予測技術の新しい技術体系が構築されつつある。

著者らは、最新のリアルタイムシミュレーション・センシング・空間情報技術を統合して、津波発生直後のきめ細かな被害情報推定・把握を可能にするリアルタイム津波浸水・被害予測システムを開発し、その実証を行った。このシステムは、現在東北大学と大阪大学のスーパーコンピュータ上で動作しており、耐災害性・冗長性については確保されているが、日本全国を「トリプル10（10分以内の津波発生予測・10分以内の浸水被害予測を10mメッシュで実施）」でカバーするには計算資源が不足している。本システムでは、津波浸水被害予測に対する様々なユーザニーズを踏まえ、必要とされる空間分解能・精度、そのトレードオフとして規定される計算時間・コストを格子間隔選択機能により高い自由度をもって設定が可能であり、潮位条件の設定、海岸構造物の条件の選択、浸水予測情報の経時出力機能など様々な機能を実装し、全国各地域での津波浸水被害推定システムの活用に向け、多様な予測メニューを構築しているところである。

迅速な被害情報の把握と発信を通じて被災地を支援し、津波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。

謝辞：本研究は、科学技術振興機構（JST）の戦略的創造研究推進事業（CREST），社会実証・実装としては、総務省G空間シティ構築事業の補助を受けて実施された。特に、総務省G空間シティ構築事業には、高知県、高知市、静岡市、石巻市、東松島市に実証自治体として参画頂いた。ここに記して謝意を表する。

### 参考文献

- 1) Ohta, Y., T. Kobayashi, H. Tsushima, S. Miura, R. Hino, T. Takasu, H. Fujimoto, T. Iiuma, K. Tachibana, T. Demachi, T. Sato, M. Ohzono, and N. Umino, 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, 2012. doi:10.1029/2011JB008750.
- 2) Musa, H. Matsuoka, Y. Murashima, S. Koshimura, R. Hino, Y. Ohta, H. Kobayashi, A Real-Time Tsunami Inundation Forecast System for Tsunami Disaster Prevention and Mitigation, SC15 Extended Abstract, 2015.
- 3) Oishi, Y., F. Imamura, and D. Sugawara, 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, 2014. doi:10.1002/2014GL062.
- 4) 林里美, 越村俊一, 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, 2012.
- 5) 首藤伸夫, 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, 1992.
- 6) Koshimura, S., T. Oie, H. Yanagisawa, and F. Imamura, 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, 2009.
- 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(2012年8月29日)<[www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/20120829\\_gaiyou.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/20120829_gaiyou.pdf)>
- 8) 越村俊一, 郷右近英臣, 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.
- 9) 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, 2013.
- 10) 総務省, G空間シティ構築事業, 2015,<[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)>
- 11) 総務省, G空間防災システムとLアラートの連携推進事業<[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)>