

## [ 共同研究成果 ]

**リアルタイム津波浸水被害予測の国際展開に向けた検討**

越村俊一<sup>1,2)</sup>, 阿部孝志<sup>1)</sup>, ADRIANO Bruno<sup>3)</sup>, MAS Erick<sup>1,2)</sup>, 撫佐昭裕<sup>2,4)</sup>

1) 東北大学災害科学国際研究所

2) 株式会社 RTi-cast

3) 理化学研究所革新知能統合研究センター

4) 東北大学サイバーサイエンスセンター

筆者らのグループが開発した、リアルタイム津波浸水被害予測システムの国際展開に向けた検討を行った。適用対象は南米ペルーの首都リマである。ペルーは、環太平洋火山帯に位置する地震・津波等の災害多発国であり、太平洋岸ではしばしば巨大地震による津波が発生してきた。記録上の最大の被害をもたらした地震は 1746 年にリマ沖で発生し、地震の揺れと津波により首都リマは壊滅的な被害を被った。本稿では、SX-Aurora TSUBASA によるリアルタイム津波浸水被害予測システムの機能を拡張し、ペルー・リマ沖の地震津波に対する浸水被害予測システムのプロトタイプを構築するとともに、その性能評価とシステム運用に向けた展望について検討を行った。

**1. はじめに**

これまで筆者らのグループが開発してきたリアルタイム津波浸水被害予測システム[1,2]は、2018 年に運用を開始し現在日本の内閣府の津波対策・対応機能として地震発生から 30 分以内の浸水被害予測結果を国に配信することとしている。運用開始後の 2022 年 3 月の福島県沖地震において初めて実際に稼働し、設計どおりの性能を発揮して予測を完了した（結果は被害なし）[3]。我が国の防災技術でも特に津波の予測技術は世界各国から参考にされるものであり、技術移転も進んでいる。したがって、本システムを地震津波のリスクにさらされた国々で構築・運用することによって世界の津波防災・減災への貢献が期待されている。

本稿では、リアルタイム津波浸水被害予測システムの国際展開に向けた検討を行う。適用対象は南米ペルーの首都リマである。ペルーは、環太平洋火山帯に位置する地震・津波等の災害多発国であり、太平洋岸ではしばしば巨大地震による津波が発生してきた。記録上の最大の被害をもたらした地震は 1746 年にリマ沖で発生し、地震の揺れと津波により首都リマは壊滅的な被害を被った[4]。本稿では、SX-Aurora TSUBASA によるリアルタイム津波浸水被害予測システムの機能を拡張し、ペルー・リマ沖の地震津波に対する浸水被害予測システムのプロトタイプを構築するとともに、その性能評価とシステム運用に向けた展望について論ずる。

**2. ペルーへの適用**

津波浸水被害予測を行うために必要な地形・曝露データの整備状況の調査・情報収集を踏まえて、津波浸水被害予測システムの適用のための地形モデル設計を行った。津波浸水シナリオの推定については、ペルー太平洋岸を対象に行われた既往の研究および研究論文を収集し、対象地域や津波想定シナリオについての整理を行った。

リマ周辺海岸の海底地形・陸上地形データを統合して、津波浸水被害予測のための領域設定、および基盤データ（メッシュデータ）の構築を行った。構築したデータの配置を図 1 に示す。メッシュデータは、ネスティング配置とし、外海から沿岸部に向けて段階的に解像度を上げていき、最終的には 15m メッシュでの浸水・被害予測計算を行う。



図1 シミュレーションの対象領域と格子配置

表1 シミュレーションの条件

項目	内容
対象地域	ペルー・リマ沖
座標系	直角座標系
格子サイズ	405m, 135m, 45m, 15m
$\Delta t$	0.25 秒
再現時間	6 時間

表2 性能評価を行ったシステムの諸元

	ベクトルエンジン
型名	Type 20B
CPU 数 (カード数)	1
全コア数	8
総理論性能	2.4 Tflop/s (DP)
メモリ容量	48 GB
コンパイラ	NEC nfort 3.5.0
MPI ライブラリ	NEC MPI/Scalar-Vector Hybrid (MPI Version 3.0.0)

津波浸水被害推計シミュレーションは、非線形長波理論式を Staggered Leap-frog 法と移流項の風上差分を用いて差分化し、津波波源を求める Okada の式と建物等の被害推計を行うモデルを組み込んでいる[5, 6]。階層型格子では格子サイズ 405m の Domain1 から 15m の Domain4 までの 4 階層の格子からなり、多角形格子を採用している (図1)。

計算は、既報に基づく方法・プログラムを用いて実施した[7, 8, 9]。シミュレーションの実施環境は、東北大学サイバーサイエンスセンターのシステム (AOBA-A) を用いた。AOBA-A は、NEC 製の「SX-Aurora TSUBASA」のプロセッサ「Vector Engine」(ベクトルエンジン, VE) を搭載したスーパーコンピュータであり、このプロセッサは、デスクトップサイズのタワー型サーバから構築可能で、使用ニーズに応じて拡張が可能であることが利点である。

### 3. 性能評価

津波浸水予測シミュレーションの性能評価として、Villegas-Lanza et al.(2016)によるペルー沖のプレート境界型地震 (Mw8.9) による浸水予測計算を行った[10]. その結果を図2に示す. 本研究チームによるシミュレーション結果 (既報) [11, 12, 13, 14]とも整合しており, 十分な妥当性が得られていると判断した.

図3には, 地震発生から30分後の津波の伝播・浸水状況を可視化したものである. リマ沖で発生した津波は約30分で海岸に到達しており, 津波浸水予測を到達前に終了するための時間的目安は30分である.

図4に示すのは「SX-Aurora TSUBASA」システムを利用した場合の, 6時間先までのシミュレーションの実行時間とコア数 (並列数) の関係である. 今回はサイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ AOBA で実施したが, SX-Aurora TSUBASA の構成を考慮すると, 研究室レベルで保有している計算機システムにおいても30分以内にシミュレーションを終了することが可能であることを実証することができた. これにより, 巨大地震津波発生時の被害予測をリアルタイムで実施することが可能であり, 本プロジェクトの目的である統合型エキスパートシステムの津波被害予測機能として導入可能であることが示された.

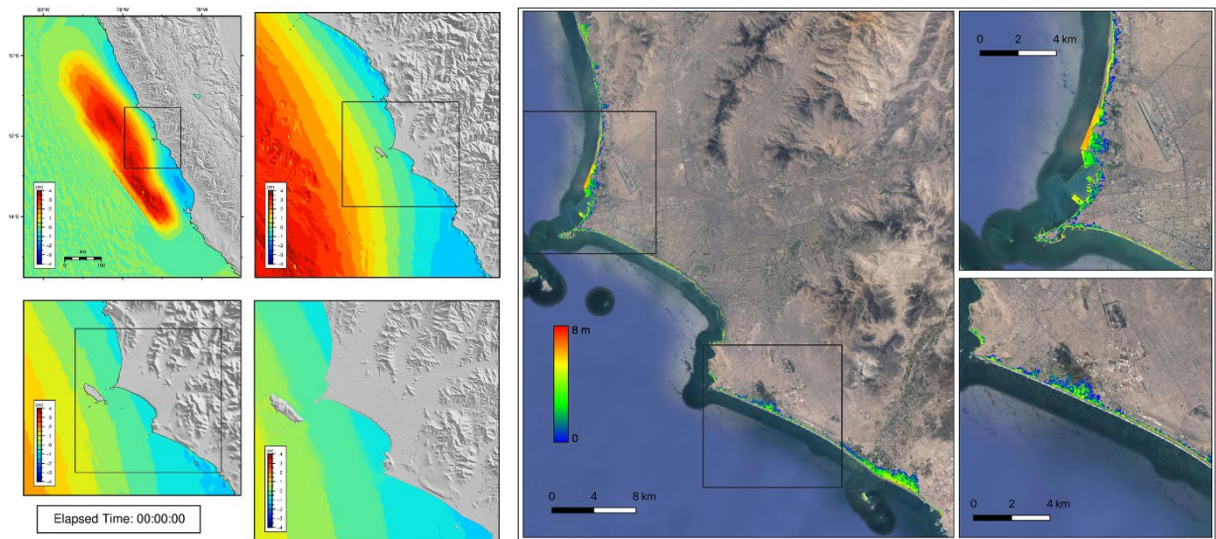


図2 Mw8.9の地震シナリオによる津波浸水予測の検証 (左: 地震断層破壊による海底地盤の変動, 右: 最大浸水深分布)

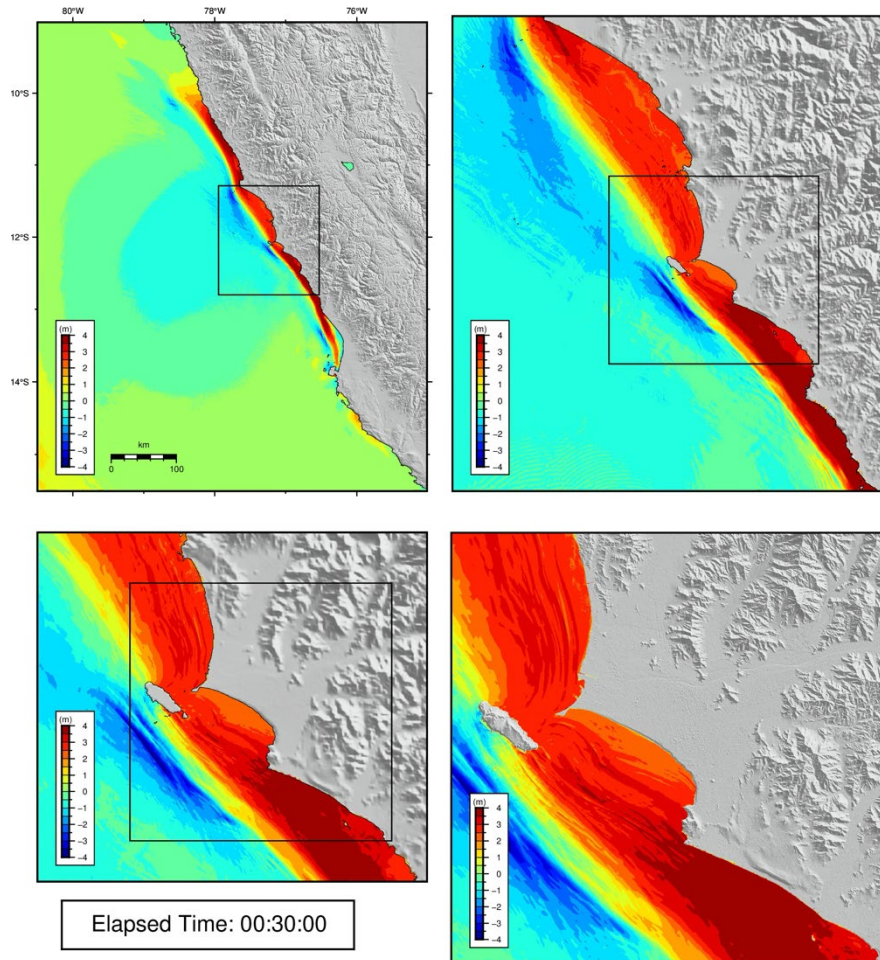


図3 地震発生から30分後の津波の来襲状況

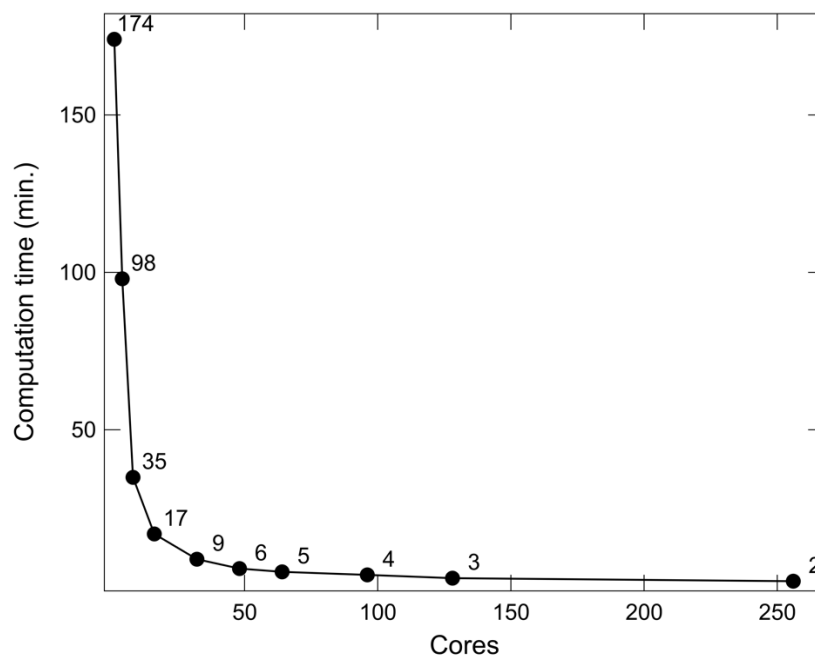


図4 SX-Aurora TSUBASA による津波浸水シミュレーションのパフォーマンス。図中の数字は6時間先の予測に必要な計算時間(分)。

## 4. おわりに

筆者らのグループが開発したリアルタイム津波浸水被害予測システムの国際展開に向けた検討を行った。ペルー・リマ沖で発生する地震津波を想定し、シミュレーションを実施する場合に必要なとなる計算資源の検討を行った。津波の到達が想定される 20 分の予測に必要な並列数（コア数）はわずか 16 であり、64 並列では 5 分程度で予測可能であることが分かった。すなわち、実用上十分な予測時間でのシステム構築が可能であることを明らかにした。

## 謝辞

研究にあたってサイバーサイエンスセンターの関係各位にご指導とご協力を頂いた。また、本研究の一部は、SATREPS プロジェクト(グラントナンバーPMJSA2008)およびJSPS 科研費(21H05001)の補助を受けた。

## 参考文献

- [1] Akihiro Musa, Osamu Watanabe, Hiroshi Matsuoka, Hiroaki Hokari, Takuya Inoue, Yoichi Murashima, Yusaku Ohta, Ryota Hino, Shunichi Koshimura and Hiroaki Kobayashi, Real-time tsunami inundation forecast system for tsunami disaster prevention and mitigation, *Journal of Supercomputing*, 74, 3093–3113, 2018. doi:10.1007/s11227-018-2363-0
- [2] Akihiro Musa, Takashi Abe, Takuya Inoue, Hiroaki Hokari, Yoichi Murashima, Yoshiyuki Kido, Susumu Date, Shinji Shimojo, Shunichi Koshimura, and Hiroaki Kobayashi, A Real-Time Tsunami Inundation Forecast System Using Vector Supercomputer SX-ACE, *Journal of Disaster Research*, 13(2), 234-244, 2018. doi: 10.20965/jdr.2018.p0234
- [3] 日本経済新聞リーダーズビジョン, スパコンは激甚災害から国を救うインフラに～実稼働した津波浸水被害推計システムの真価～, <https://ps.nikkei.com/leaders/interview/spctsunami2207/> (閲覧日 2022.9.11)
- [4] Cesar Jimenez, Nabilt Moggiano, Erick Mas, Bruno Adriano, Shunichi Koshimura, Yushiro Fujii, and Hideaki Yanagisawa, Seismic Source of 1746 Callao Earthquake from Tsunami Numerical Modeling, *Journal of Disaster Research*, 8(2), 266-273, 2013. doi: 10.20965/jdr.2013.p0266
- [5] Koshimura, S., Oie, T., Yanagisawa, H., Imamura, F., “Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Ache, Indonesia,” *Coastal Engineering Journal, JSCE*, 51(3),243-273, 2009.
- [6] Y. Okada, “Internal Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(2), 1018-1040, 1992.
- [7] 越村 俊一, 阿部 孝志, 井上 拓也, 撫佐 昭裕, 村嶋 陽一, 鈴木 崇之, 太田 雄策, 日野 亮太, 佐藤 佳彦, 加地 正明, 小林 広明, リアルタイム津波浸水被害予測の全国展開に向けた検討, *SENAC*, 52(2), 2-8, 2019
- [8] 撫佐 昭裕, 岸谷 拓海, 阿部 孝志, 佐藤 佳彦, 田野 邊睦, 鈴木 崇之, 村嶋 陽一, 佐藤 雅之, 小松 一彦, 伊達 進, 越村 俊一, 小林 広明, リアルタイム津波浸水被害推計シミュレーションの性能評価, *SENAC*, 53(2), 10-18, 2020.
- [9] 撫佐昭裕, 阿部孝志, 佐藤雅之, 小松一彦, 小林広明, 越村俊一, 津波浸水被害推計シミュレーションのベクトル・スカラーハイブリッドMPI の評価, *SENAC*, 54(4), 1-8, 2021.
- [10] J. C. Villegas-Lanza, M. Chlieh, O. Cavalié, H. Tavera, P. Baby, J. Chire-Chira, J.-M. Nocquet, Active tectonics of Peru: Heterogeneous interseismic coupling along the Nazca megathrust, rigid motion of the Peruvian Sliver, and Subandean shortening accommodation, *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 121(1), 7371-7394, 2016. doi:10.1002/2016JB013080

- [11] Bruno Adriano, Erick Mas, Shunichi Koshimura, Yushiro Fujii, Sheila Yauri, Cesar Jimenez, and Hideaki Yanagisawa, Tsunami Inundation Mapping in Lima, for Two Tsunami Source Scenarios, *Journal of Disaster Research*, 8(2), 274-284, 2013. doi: 10.20965/jdr.2013.p0274
- [12] Cesar Jimenez, Nabil Moggiano, Erick Mas, Bruno Adriano, Yushiro Fujii, and Shunichi Koshimura, Tsunami Waveform Inversion of the 2007 Peru (Mw8.1) Earthquake, *Journal of Disaster Research*, 9(6), 954-960, 2014. doi: 10.20965/jdr.2014.p0954
- [13] Erick Mas, Bruno Adriano, Nelson Pulido, Cesar Jimenez, and Shunichi Koshimura, Simulation of Tsunami Inundation in Central Peru from Future Megathrust Earthquake Scenarios, *Journal of Disaster Research*, 9(6), 961-967, 2014. doi: 10.20965/jdr.2014.p0961
- [14] Bruno Adriano, Erick Mas, Shunichi Koshimura, Miguel Estrada, and Cesar Jimenez, Scenarios of Earthquake and Tsunami Damage Probability in Callao Region, Peru Using Tsunami Fragility Functions, *Journal of Disaster Research*, 9(6), 968-975, 2014. doi: 10.20965/jdr.2014.p0968