

非線形長波理論解析と3次元流体解析との連結による 津波シミュレーションの開発

The development of combined Tsunami simulation with non-linear long-wave theory and 3D CFD

*藤原了¹⁾, 唐木田泰久¹⁾, 國司晴生¹⁾, 秋山伸一¹⁾, 田宮貴洋¹⁾

是永眞理子¹⁾, 佐藤暁拓¹⁾, 田向剛¹⁾, 臼井嘉哉¹⁾, 金伝栄¹⁾, 中村均¹⁾

Fujihara Satoru, Karakida Yasuhisa, Kunishi Haruo, Akiyama Shinichi, Tamiya Takahiro
Korenaga Mariko, Satoh Akihiro, Tamukai Tsuyoshi, Usui Yoshia, Jin Chuanrong and Nakamura Hitoshi

1) 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 (〒100-6080 東京都千代田区霞が関3-2-5 霞が関ビル)

代表E-mail: hitoshi.nakamura@ctc-g.co.jp)

For improving the accuracy of tsunami simulation analysis for disaster prevention, we introduce the scheme of Multi-Scale Coupling Simulation of Tsunami, which is a numerical scheme employing tsunami simulation on both large scale and small scale as a multi-scale framework. First, we show tsunami simulation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake for tsunami propagation in oceanic region. Next, we show the analysis of CFD (to make up for the weakness of classical tsunami simulation) for incoming tsunami reaching and running up an inland area. Finally, we discuss how tsunami simulation analysis can be used for disaster prevention in the future.

Key Words : Tsunami, Non-linear long-wave theory, CFD, Coupling Simulation, Wave force

1. はじめに

地震大国日本は歴史的に幾度となく巨大地震に伴う津波に襲われており、津波防災対策は、日本国における長年の重要施策の一つとなっている。これまで海洋津波伝播の素過程や津波波源などの評価については、主に数値シミュレーションやインバージョン解析などに基づき様々な研究が広範囲になされてきた(例えば、[1]、[2])。津波の発生、伝播、沿岸域の遡上までを理論的に解析しようとするこれらの研究は、津波予測や被害軽減に向けた対策を進める上で、これまで大きく貢献してきた。

しかしながら重要インフラ施設に多大な損害を与えた2011年東北地方太平洋沖地震(以後、2011東北沖地震)の発生以降、これまでの津波評価の仕組みが、陸域遡上を含む現象の評価には十分ではなかった点などが指摘され始めている。特に陸域の構造物に対する津波波力[3]などの津波遡上破壊力を精度よく評価する手法は十分に確立されているとは言えない。

2011東北沖地震以降、国機関や電力事業者においても、津波被害予測の精度向上の必要性が強く認識され、津波防災に関する新たな分析がなされている[4]。本研究では、津波解析の精度を向上させ、原子力発電所や石油プラントなどの重要施設の防護設計に資することを目的として、非線形長波理論に基づく津波解析と3次元流体解析を連結した新しい津波シミュレーションのスキームの構築を目指す。本論文では、この方法を用いて港湾の被災事例をシミュレーションし、その適用性を評価した。

2. 連結津波シミュレーションについて

津波現象には表1に示すように様々なスケール性が存在する。巨大津波を励起する地震断層は100kmオーダー程度であり、津波伝播経路の海洋水深は約5km以下であり、津波遡上に襲われるインフラ施設・構造物はメートルオーダー程度となる。様々なスケール性に関連した複雑さが津波現象に含まれる一方、これまで津波災害の評価は、主に海洋津波伝播の評価に適する非線形長波理論に基づいて水平方向の2次元格子を用いて行われてきた。

表-1 津波現象のスケール性

対象物	スケール	解析
地震断層帯	~100km	広域・非線形長波解析 1200~5mメッシュサイズ 海洋津波伝播の評価
海域水深	<5km	
内陸部 インフラ 施設など	~10m	局所・3次元流体解析 ~1mメッシュサイズ 陸域対象構造物周辺の津波遡上 上分析及び波圧分布評価

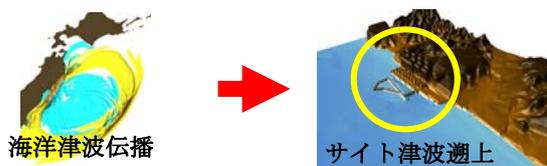


図-1 連結津波シミュレーションの概念

本論文では津波現象及び津波遡上過程の複雑性を考慮した連結津波シミュレーション手法を 2011 東北沖地震に適用し、福島県の相馬港周辺の遡上評価を行い、最終的に相馬港内の構造物の波圧評価を行った解析事例を紹介する。連結津波シミュレーションでは、まず非線形長波理論に基づき広域スケールにおける地震発生後の海洋津波伝播の評価を行う。次に、海域伝播を経て陸域の対象領域に近づいてきた津波を境界値として 3 次元流体解析を行い、陸域対象領域及び対象構造物周辺にフォーカスして、詳細なサイト遡上過程や波圧評価を行う (表-1、図-1)。

ここで、津波の波力評価への CFD の適用性を検証するために、土木学会より刊行された文献[5]で参照されている貯槽タンクゲート開放試験[6]を解析した結果を示す。試験概要は貯槽タンク中央にゲートを設置し、左右で水位差をつけた状態からゲートを引き抜き、段波津波を発生させるものである。貯槽タンク右壁に波圧計が配置されている。図-2 に水位の遷移を示す。ゲートを引き抜いた後、段波津波が進行、右壁へと衝突する。図-3 に示すように非分裂津波の算定式から得られる値と流体解析結果は良く一致している。

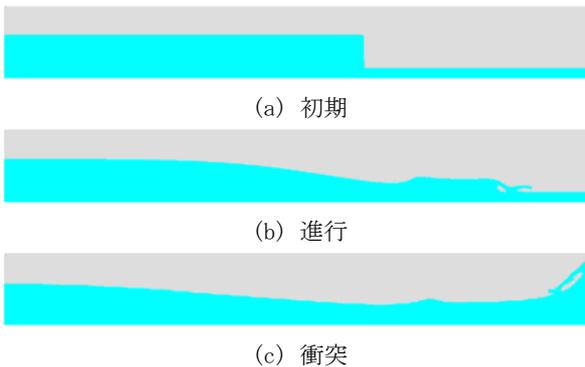


図-2 貯槽タンクゲート開放試験の水位の遷移 (解析)

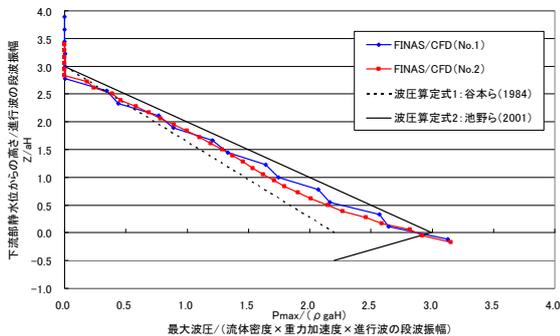


図-3 波圧分布 流体解析と算定式の比較

3. 非線形長波理論による2011東北沖地震の海洋津波伝播解析

海洋津波伝播解析は、非線形長波理論に基づく。ここではスタカード Leap Flog スキームを用いた有限差分法による離散化を行い、シミュレーションを行う ([1]な

ど)。海洋津波伝播解析の対象領域は、2011 東北沖地震の波源域と相馬港周辺を含む東西約 1000 km、南北約 1700 km の海域とし (図-4(a))、メッシュサイズは沿岸から相馬港へ向い 5 段階に小さくする (1215m~15m)。地形モデルについては、海上保安庁、国土地理院、海洋情報研究センター、General Bathymetric Chart of Oceans (GEBCO)、福島県相馬市の海底地形・標高データを基に作成した。波源については、既往モデル ([7]など) の滑り分布調整を行ったモデルを設定した (図-4(a))。図-4(b)に、地震発生 30 分後の津波水位スナップショットを示し、図-4(c)に Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarbourS (NOWPHAS) の GPS 波浪計・観測津波波形とシミュレーション波形の比較を示す。これら波形はフィルタリング処理をしていない生データのものであるが、非常によく観測波形を再現していることが分かる。

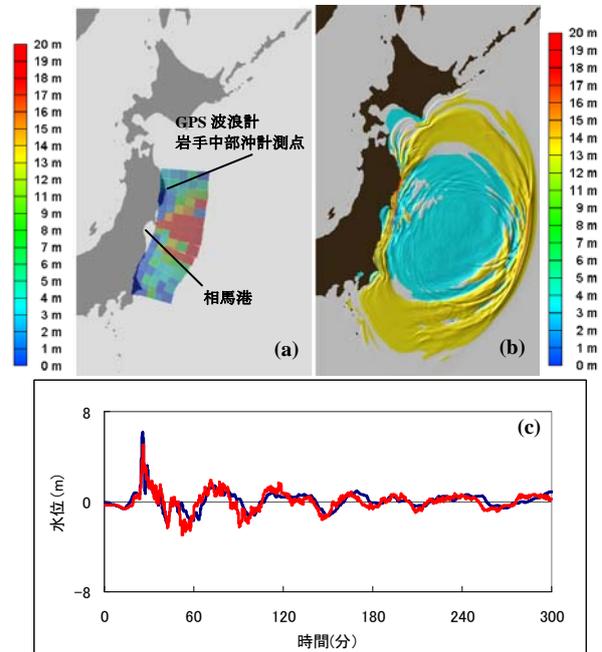


図-4 (a) 海洋津波伝播解析領域及び津波波源モデル、(b) 地震発生 30 分後の津波水位スナップショット。(c) 観測津波波形 (青色) とシミュレーション波形 (赤色) 比較。

4. 3次元流体解析による相馬港周辺の津波遡上と波圧評価

相馬港周辺の 3 次元流体解析は、非構造格子有限体積分法ベースの 3 次元汎用流体解析コード FINAS/CFD を用いた。3 次元流動の支配方程式は、非圧縮性流体の質量保存及び運動量保存の式である [8]。速度-圧力連成手法は SIMPLEC[8]法とした。また、津波の自由表面を表現するために、Volume of Fluid 法 (VOF 法) [9]を採用し海水と空気の 2 相流として流体をモデル化した。

流体解析における解析対象領域は、図-5 の赤線で示す 2220m×1200m の水平領域とし、垂直方向は海域で 10m 水深、陸域で 15m 高さの 25m の領域とした。解析領域

の境界には海洋津波伝播解析から求まる水位及び流速の履歴を境界条件として与えた。なお流体解析は図-6 に示す津波波形より、水位上昇が顕著となる第 2 波が解析対象領域に到達する前後 12 分間、地震発生 55 分 30 秒から 67 分 30 秒までについて実施した。解析モデルを図-7 に示す。解析に使用した格子は海洋津波伝播解析で作成した地形モデルをベースとしており、海底地形及び構造物について詳細にモデル化を行った。格子数は約 800 万であり FOCUS スパコンシステム[10]を利用して並列計算を行った。

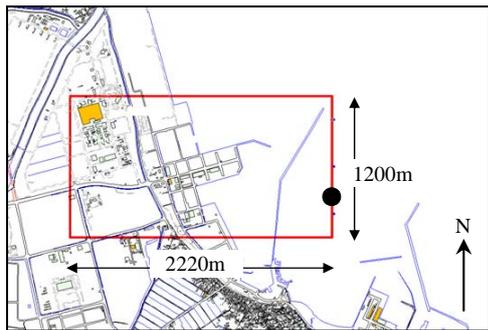
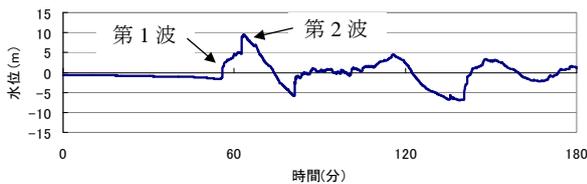


図-5 流体解析対象領域（相馬港周辺）



※ 図-5 の黒丸位置の海洋津波伝播解析の結果

図-6 相馬港へ到来する津波の時刻歴

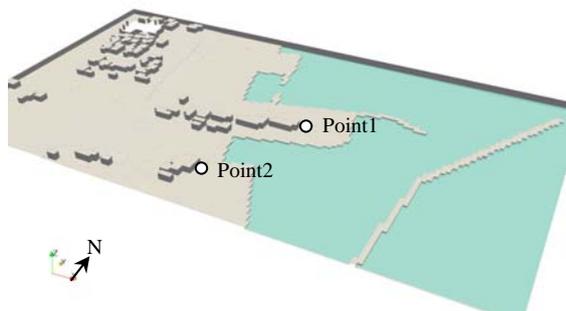
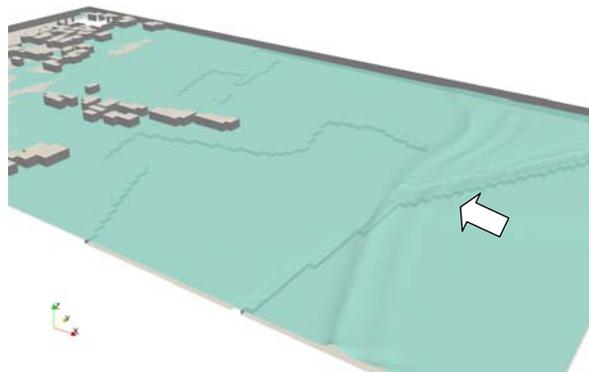


図-7 流体解析モデル

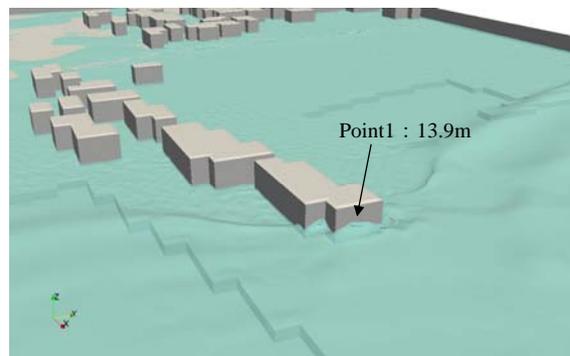
図-8 に浸水域分布のスナップショットを示す。図中の青い面は、 F 値=0.5 の等値面を示している。図-8(a)は津波第 2 波が越堤する時刻の浸水域分布である。第 1 波の影響で解析領域の大半が浸水し、そこにさらに強烈な第 2 波が襲来するものである。

図-8(b)及び図-8(c)は、図 7 に示す Point1,Point2 の浸水深が最大となる時刻における浸水域分布である。越堤した波が相馬港内へ侵入し、構造物へと衝突していく。参考値として現地調査[11]によると津波痕跡高として Point1 近傍で浸水深 6.77m（構造物内壁）、Point2 近傍

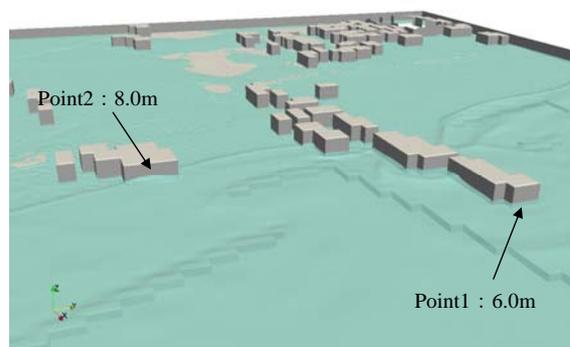
で浸水深 7.55m という値が示されている。なお、Point 位置は現地調査で対象としている構造物と厳密に一致しているわけではない。解析結果は Point2 において 8.0m、Point1 では波が構造物に衝突する際、壁面で水面が盛り上がり瞬間的に 14m 近い値が得られているが、数秒後には図-8(c)に示すように 6.0m 程度となる。流体解析では、このような局所的な水位及び波圧上昇を捉えることができる。前述した現地調査によると Point1 の構造物はスレート壁が抜けており、波圧上昇以前に破損して水が抜けたと推測する。図 9 に Point1 及び Point2 の波圧履歴を示す。非線形長波理論の場合、水位から間接的に波圧を算出することが可能だが、流体解析であれば直接波圧を得ることが出来る。Point1,Point2 とともに第 1 波の影響で徐々に波圧が増加し、第 2 波が衝突する 64.0 分以降で波圧のピークが生じている。



(a) 63.2分：津波第2波の越堤



(b) 64.0分：Point1 浸水深最大時



(c) 64.3分：Point2 浸水深最大時

図-8 浸水域の分布

本手法では得られた波圧履歴を荷重として構造解析モデルへと受け渡し応力解析を実施して、構造物の破壊過程を追跡することも可能である。

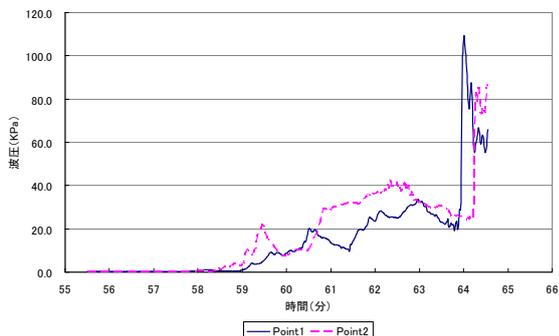


図-9 各計測点の波圧履歴

5. まとめ

2011 東北沖地震において、津波遡上により重要インフラ施設に甚大な被害が発生した経験を踏まえ、津波遡上が陸域の構造物に与える破壊力を評価する解析手法の高度化は今後益々重要となってくる。本論文で述べた連結津波シミュレーションでは、既に実用に供されている海洋津波伝搬解析手法と連結して 3 次元流体解析により精密な遡上解析が行える。津波防護設計の観点からの本手法の利点は以下の通りである。

- 1) 防潮堤からの越堤等の 3 次元的な流体现象を追跡できる。水流の巻き込み、落下等の局所的な効果の評価することができる。
- 2) 局所的な波圧上昇を評価できる。構造物への段波の衝突、遡上・引波時の隘路における波圧評価等に適用できる。
- 3) FEM による構造解析と直接連結して、構造物の破壊解析を行うことができる。

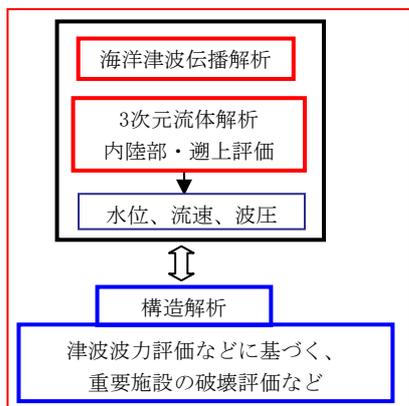


図-10 連結津波シミュレーションと構造解析の連携

一方、3 次元流体解析では海洋津波伝搬解析と比べて必要な計算機資源は非常に大きくなる。海洋津波伝搬解析はパソコンレベルで計算できるのに対して、あるサイト

を対象とした 3 次元流体解析では数百万から数千万セルの格子モデルが必要になり、高性能の並列計算機の利用が欠かせない。これら計算規模の制約から無制限に細密な格子を用いることはできないので、解析の目的に応じて適切な分解能の格子を用いることになる。精度管理の観点からは事前に格子収束性試験を行っておくことが有効である。

今後、連結津波シミュレーションを図-10 に示すように構造解析と融合させる形で発展させ、津波防護設計のための実用的な評価が行えるシステムを構築したい。

謝辞

解析では海上保安庁、海洋情報研究センター、GEBCO の海底地形データと国土地理院、福島県相馬市周辺の標高データ及びNOWPHASのGPS波浪計・観測津波波形を使用させて頂きました。海洋伝播津波解析には東北大学のTsunami_N2を使用させて頂きました。記して感謝致します。

参考文献

- [1] Imamura, F. et al.: Numerical simulations of the transoceanic propagation of tsunamis, *6th Congress APD-IAHR*, pp.265-272, 1988.
- [2] Satake, K.: inversion of Tsunami Waveforms for the Estimation of Heterogeneous Fault Motion of Large Submarine Earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, Vol.94, No.5, pp.5627-5636, 1989.
- [3] 朝倉良輔, 岩瀬浩二, 池谷毅, 高尾誠, 金戸俊道, 藤井直樹, 大森正則: 護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, *海岸工学論文集*, 第47巻, pp.911-915, 2000.
- [4] 政府官邸報告書, http://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/pdf/houkokusho_full_dai2.pdf
- [5] 土木学会原子力土木委員会津波評価部会: 原子力発電所の津波評価技術(レビュー編), 平成14年2月
- [6] 池野正明, 森信人, 田中寛好: 砕波段波津波による波力と漂流物の挙動・衝突力に関する実験的研究, *海岸工学論文集*, 第48巻, pp.846-850, 2001.
- [7] Fujii, Y. et al.: Tsunami Source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, Vol.63, pp.815-820, 2011.
- [8] Ferziger, J. H. and Peric, M. : *Computational Method for Fluid Dynamics 3rd Edition*, Springer, 2002.
- [9] Hirt, C. W. and Nicholls, B. D., : Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries, *J. Comput. Phys.*, Vol 39, pp.201-221, 1981
- [10] 財団法人計算科学振興財団, <http://www.j-focus.or.jp/>
- [11] 相馬港・小名浜港調査報告(速報), <http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h23tohoku/yokosuka/6.pdf>