

三次元 VOF 法による津波シミュレーション

長谷部 雅 伸・ファム フック

陸上での津波遡上流の複雑な挙動を精度良く再現し、かつ津波荷重が直接的に評価可能な三次元津波シミュレーション手法を開発した。本手法では VOF 法を採用することで地形や街区の詳細形状を考慮できるという利点がある反面、従来の津波解析技術と比較して計算コストが増大するため、スーパーコンピュータ等の並列計算機を活用する。本報では開口を有する建物での内部空間における津波荷重の発生や、6 km 四方の広大な街区での津波遡上の状況を再現した解析例を紹介する。

キーワード：三次元津波シミュレーション，VOF 法，大規模並列計算，津波荷重算定，巨大津波対策

1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震に伴い発生した津波は、岩手県宮古市において最大遡上高40.5 mを記録し¹⁾、宮城県仙台平野では内陸6 kmまでの範囲が浸水する²⁾など、観測史上類を見ない規模であった。この巨大津波によって、沿岸に位置する多くの市街地、あるいは発電所等の重要施設が壊滅的な被害を受け、建築物等の陸上施設についても津波に対する構造安全性の確保が重要な課題の一つとして認識されるようになった。

今回の津波による建築物被害の特徴的な事例として、これまで津波に強いと考えられていた鉄筋コンクリート造ビルの転倒が挙げられるが(写真-1)、他にも、従来の知見には無かった被災パターンがいくつか見られた。例えば写真-2に示す体育館は筆者らが調査した被災建物の一つであるが、鉄筋コンクリート壁が大規模に崩壊している。これは建物内部に流れ込んだ大量の海水によって、内側から過大な面外荷重が作用したためであると推測される。

建築物を対象とした津波荷重の評価法としては「津波避難ビル等に係るガイドライン」において簡易的な算定式が示されており³⁾、さらに今回の震災での津波被害の調査結果を受けて、海岸からの距離に応じた減衰効果や周囲の構造物による遮蔽効果を考慮した追加知見が国土交通省の通知として示されている⁴⁾。しかし実際には、谷状の地形となっている個所や市街地の路地などにおいては、流れが集中することで津波荷重が大きくなるようなケースも可能性として考えられる。



写真-1 建物の転倒被害例



写真-2 鉄筋コンクリート壁の内部からの大規模崩壊

また、従来の津波シミュレーションでは、平面二次元場を対象とした非線形長波モデル⁵⁾が広く用いられている。非線形長波モデルは一般的な数値流体解析モデルと比べて計算量が少ないため、震源域での津波の発生から陸域への遡上に至る広域・長時間の現象を

再現するのに適しており、津波の高さや浸水範囲など津波に対する避難・防災計画の基本となる解析結果に関しては既往の多くの研究により予測精度の確認がなされている。ただし、非線形長波モデルでは、静水圧近似（流体圧力が水位のみで規定されるという近似）が適用されているため、流れの影響を考慮した圧力（ここでは動的圧力と呼ぶ）を直接算定することは基本的にできない。また、今回の震災のように津波が陸域に激しく打ち寄せるようなケースでは、流体運動に対する動的圧力の影響が大きくなるため、遡上流の挙動自体の再現性にも疑問が残る。

そこで筆者らは、陸上での津波遡上流の複雑な変化を精度よく再現し、かつ津波荷重が直接的に評価可能な三次元津波シミュレーションを開発した。本手法では、対象建物の内部空間など詳細な形状や、周囲の地形、構造物配置などを三次元的に表現できるというメリットがある。反面、三次元的な取り扱いをすることで、従来の非線形長波モデルによる津波シミュレーションと比較すると計算量が格段に増加するという問題点があるため、開発にあたってはスーパーコンピュータなどの並列計算機の活用を念頭に置いた。

2. 解析手法の概要と検証

筆者らが開発した三次元津波シミュレーションでは、遡上津波の再現にあたりVOF法⁶⁾を採用している。VOF法とは、例えば水と空気など互いに混じりあわない複数の流体が混在している現象の解析手法の一つである。津波解析に適用する場合には、水と空気の二相流体を想定する。支配方程式は以下の連続式（質量保存則）と運動量保存の式によって構成される。これらの方程式により空気と水の流速と、流速変動を考慮した圧力を直接求めることができる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho uu) = -\nabla(p) + \mu \nabla(\nabla u) + \rho g \quad (2)$$

$$\rho = a\rho_1 + (1-a)\rho_2 \quad (3)$$

ここで、 u ：流速ベクトル、 p ：圧力、 μ ：流体の分子粘性係数、 g ：重力加速度ベクトルである。なお、式(3)中の ρ_1 、 ρ_2 はそれぞれ水と空気の密度であり、 a は水の体積分率（ $0 \leq a \leq 1$ ）、 ρ は両者の混在を考慮した見かけの流体密度である。

基礎方程式(1)、(2)の空間的離散化には有限体積法を用い、流速と圧力の連成解法にはPISO法を採用した。また、移流項の空間的離散化には1次精度中心

差分を、時間発展には1次精度陰解法を用いた。

本解析手法の検証のため、シマモラら⁷⁾の水利実験を模擬した解析を実施した。実験装置全体および建物模型周辺のモデリングと計算格子分割の状況を図-1に示す。ここではシマモラらの実験と同様、実スケールに対する縮尺比1/200の解析を行った。境界条件として、建物と水槽の壁面はno-slipの不透過境界とし、水槽の上端は空気が自由に出入りする開境界とした。さらに水槽に設置された可動式の造波板については移動境界とした。このため、造波板に隣接する部分の計算格子は時間発展とともに自動的に再構築を行っている。

図-2は遡上した津波が建物に衝突する瞬間（時刻127s）の解析結果である。この図から、建物前面では衝突した津波が打ち上げられることで、周囲の遡上水深よりも上の位置でも高い圧力が発生しうることがわかる。図-3には実験及び本解析から得られた海域上の点での水位変動量、および陸域での浸水深の比較を示す。両図とも縦軸、横軸ともに実スケールに換算した値を用いている。いずれの場所においても解析結果は実験結果とほぼ一致している。図-4は建物全体に作用する津波荷重の時間変化について比較し

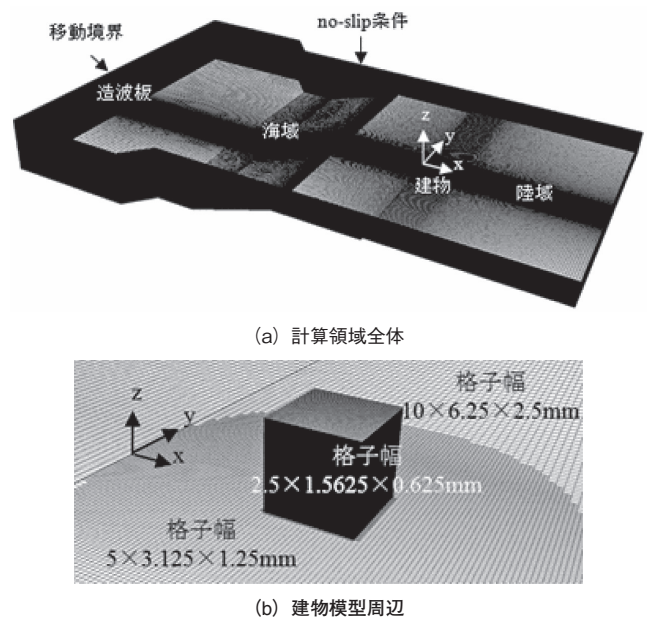


図-1 実験装置⁷⁾のモデリングと格子分割状況

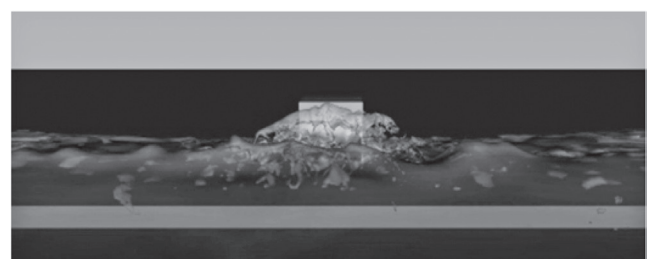
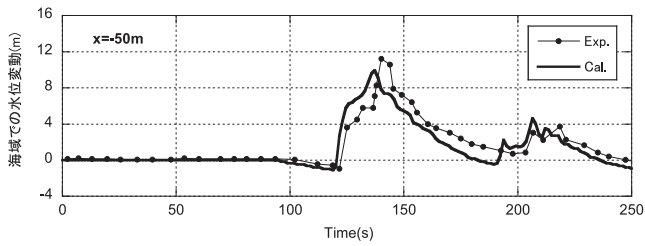
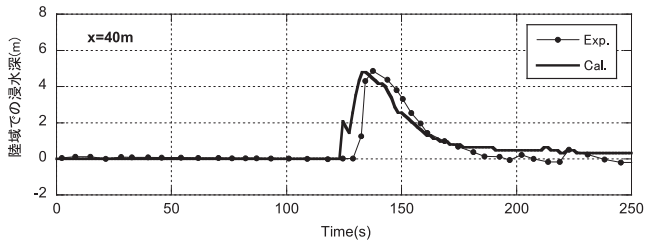


図-2 模型実験の再現計算の例

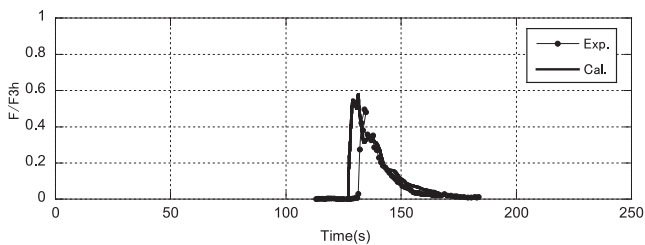


(a) 汀線から 50 m 沖合 (模型スケールで 0.25 m) での水位変動



(b) 汀線から 40 m 内陸 (模型スケールで 0.2 m) での浸水深の変動

図一三 実験結果との比較

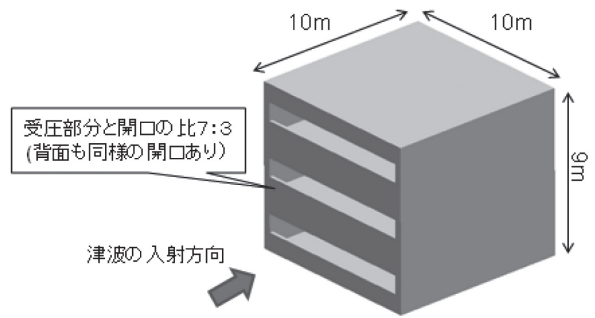


図一四 水平方向の津波荷重の比較

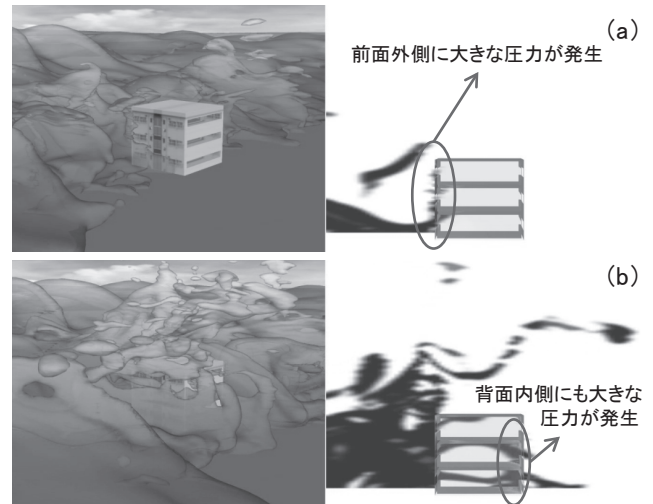
たものであるが、解析結果は実験結果に比べ、荷重が立ち上がるタイミングがやや速いものの、ピーク値とその後の現象傾向に関しては良好に一致していることが確認できる。なお、図一四の縦軸はガイドライン算定式³⁾で浸水深を 10 m として求められる津波荷重に対する比を示している。

3. 建物内部で発生する津波荷重の再現

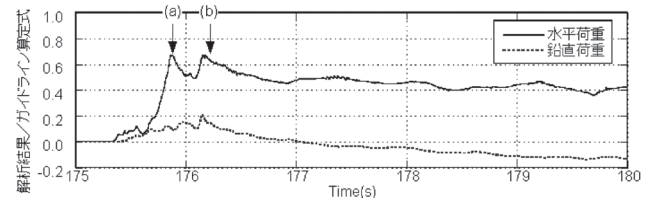
建物の内部空間における津波荷重の影響を調べるため、図一五に示す建物を対象とした津波荷重の算定シミュレーションを行った。なお、計算条件として建物が無い状態での浸水深を 10 m と設定した。図一六は解析結果をスナップショットとして示したものであり、左側は建物の外観、右側は中央断面における内部の状況である。図一六(a)は遡上津波が建物前面に衝突した瞬間であり、建物前面に圧力の高い部分が生じている(図右側の丸で示す部分)。図一六(b)では前面から流れ込んだ津波が内部で背後の壁に衝突し、前面の外壁だけではなく背面の内側でも高い圧力が生じている。このような現象は写真一2で示した被災事例のように壁面が内側から損傷する原因となる可能性が



図一五 解析対象とした建物モデル



図一六 解析結果 (それぞれの時刻を図一七に示す)



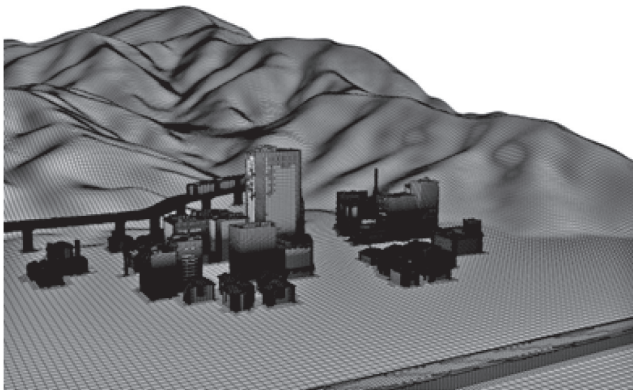
図一七 荷重の時間変化

ある。図一七には解析で得られた建物全体に作用する水平・上下荷重の時間変化を示す。縦軸はガイドライン算定式において浸水深 10 m とし、開口を考慮しなかった場合の水平荷重に対する比とした。水平荷重については開口のために最大値がガイドライン算定式よりも低くなっている。一方、鉛直方向については、従来のガイドライン算定式で考慮できない上方向の力が発生している。これは、図一六(b)のように開口から流入した津波が天井に衝突することで発生する動的な荷重である。この上方向の荷重は、建物に作用する転倒モーメントを増加させるため、今回の震災で見られた転倒被害(例えば写真一1)についても建物内部での荷重が影響している可能性を示すものである。

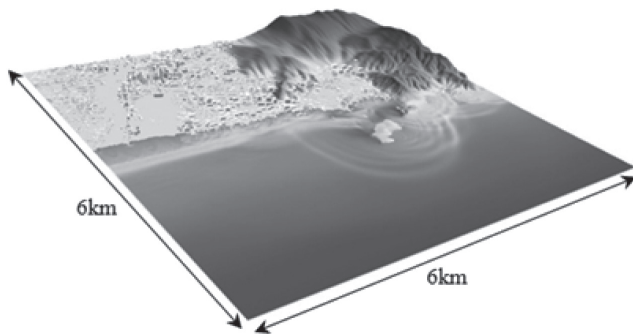
街区全体を対象とした大規模シミュレーション

沿岸の街区全体を対象とした6 km×6 kmの大規模3次元津波解析を行った。図一8に解析領域の格子分割状況を示すが、建物への遡上流の衝突を詳細に再現するため、建物周辺ほど計算格子が小さくなるよう細分化した（最小で0.5 mの計算格子間隔）。全体の計算格子数は約5千万である。本計算には東京工業大学のスーパーコンピュータ TSUBAME2.0を用いた。実現象で7分間に相当する解析に対し、本検討では198CPUを用いて約8日間の計算時間を要した。

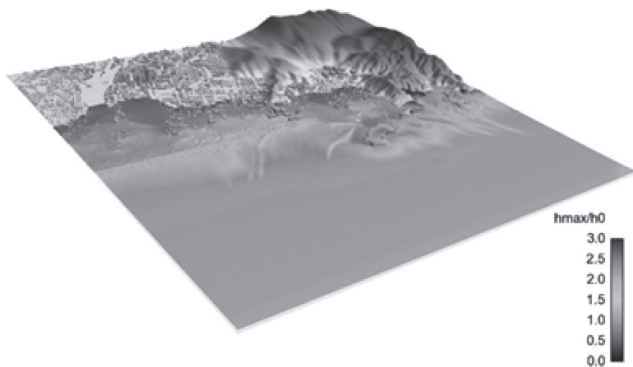
図一9に解析領域全体での津波遡上の様子を示す。図一9(a)は津波が図中左側の平野部汀線付近に到達した時点での状況だが、海岸線が複雑で地形が急峻と



図一8 解析領域の格子分割状況



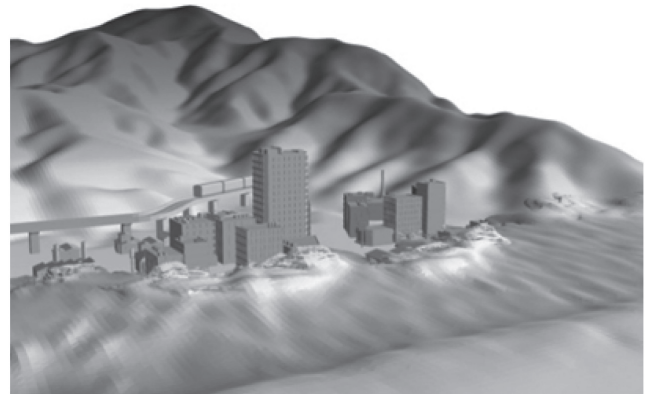
(a) 汀線到達時



(b) 陸域での浸水時

図一9 解析領域全体での津波遡上の状況

なっている図中右側の個所では既に津波は遡上しており、津波の反射波が見られる。図一10には、その急峻な地形に位置する小街区での津波の遡上の様子を拡大して示すが、大きな建物のある部分では津波遡上が阻止され、遡上流がせり上がる様子が確認できる。図一9(b)は平野部の大きな街区にも津波が進行した時点での状況を示すが、このような平野部では浸水範囲が内陸に大きく広がり、特に空地や大きな路地に沿った部分では、遡上流の進行が速くなることがわかる。



図一10 街区での津波遡上の状況

4. おわりに

三次元VOF法により、街区の状況や周辺地形の影響を考慮しつつ津波荷重の直接算定が可能な津波シミュレーション手法を開発し、個別建物および街区レベルでの解析を実施した。開口を有する単体建物のシミュレーションでは、内部空間でも大きな津波荷重が発生することが確認された。これは実際の被災事例においても、建物の内側からの面外荷重による損傷が見られたことと整合する。また、開口部から流入した津波が天井に衝突することにより、上向きの荷重が発生しうることでもわかった。このような上向きの力は建物全体に対する転倒モーメントを増幅させることになるため、今後詳細を検討する予定である。街区レベルを対象とした解析例では、TSUBAME2.0を活用することにより6 km四方の広大な領域での詳細な津波遡上の状況を、実用的な計算時間で再現できることを示すことができた。

なお、本報では紹介しなかったが、入力条件となる津波はサイトの地形特性に合わせ任意に設定することが可能である。想定地震シナリオや津波伝播は地域特性が強く反映されるが、例えば震源域を含む外洋などより広域な現象を従来の平面二次元解析で再現し、得られた結果をもとに三次元解析での入射波条件を設定することもできる。これにより、震源付近での津波の

発生から沖合での津波の伝播, さらには陸域付近での遡上状況の詳細や津波荷重の発生に至る異なるスケールの現象を首尾一貫して再現することができるため, 広域街区や沿岸重要施設などで要求される総合的な津波対策への貢献が期待できる。

JCM/A

《参考文献》

- 1) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ: <http://www.coastal.jp/ttjt>, 2011/11/15 閲覧.
- 2) 国土地理院, 浸水範囲概況図: <http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku60003.html>, 2011/11/15 閲覧.
- 3) 津波避難ビル等に係るガイドライン検討会: 津波避難ビル等に係るガイドライン (巻末資料②構造的要件の基本的考え方), pp. 6-10, 2005.
- 4) 国土交通省: 津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について (平成 23 年 11 月 17 日付け国住指第 2570 号国土交通省住宅局長通知), 2011.11.
- 5) 後藤ら (1982): Leap-frog 法を用いた津波の数値計算法, 東北大学工学部土木工学科.
- 6) Hirt, C. W. and B. D. Nichols (1981): Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, J. Comput. Phys., Vol.39.
- 7) チャルレス シマモラ, 嶋原良典, 藤間功司: 建物群に作用する津波波力に関する水理実験, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.831-835, 2007.

[筆者紹介]

長谷部 雅伸 (はせべ まさのぶ)
清水建設㈱
技術研究所
主任研究員



ファム フック
清水建設㈱
技術研究所
研究員



橋梁架設工事の積算 ——平成 24 年度版——

■改訂内容

1. 鋼橋編
 - ・横取り設備質量算定式の見直し
 - ・製作工労務単価の変更に伴う架設用の製作部材単価改訂
 - ・積算例題の見直し
2. PC橋編
 - ・二組桁横取り装置設備を追加
 - ・プレキャストセグメント主桁組立工の適用範囲拡大
 - ・架設支保工工法の供用日数の補正方法の説明
図追加 ほか

■ B5 判 / 本編約 1,100 頁 (カラー写真入り)
別冊約 120 頁 セット

■定価

非会員: 8,400 円 (本体 8,000 円)
会 員: 7,140 円 (本体 6,800 円)

※別冊のみの販売はいたしません。
※学校及び官公庁関係者は会員扱いとさせていただきます。

※送料は会員・非会員とも
沖縄県以外 600 円
沖縄県 450 円 (但し県内に限る)

■発行 平成24年5月

一般社団法人 日本建設機械施工協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 (機械振興会館)

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>