

共同利用 成果報告書 平成23年度 課題種別

利用課題名 複雑地形を考慮した超大規模津波波力解析システムの開発
英文:A Development of TSUNAMI Force Analysis System in Large Scale Over Complex Terrain

利用課題責任者
PHAM VAN PHUC

所属:清水建設(株)技術研究所
Affiliation: Institute of Technology, Shimizu Corporation
URL: <http://www.shimz.co.jp>

本利用課題では TSUBAME2.0 の活用により複雑地形を考慮した大規模計算モデルを作成し、VOF 法を用いた大規模 3 次元津波波力解析システムを構築した。また、構築した解析システムを用いて、ダム崩壊問題を適用して既存の実験結果との比較により計算モデルの解像度や乱流モデルによる津波の砕波と離散・合体を従う大規模な波変形の予測精度を検討し、LES 乱流モデルは有効なモデルとして確認した。さらに、遡上津波の水槽実験を再現することにより、津波の水位変動や陸域での浸水深及び構造物全面での浸水深と構造物に作用する津波力の予測精度を確認した。最後に、複雑地形や広域な市街地を含めた沿岸地域を対象にして、大規模津波解析を行い、津波の波高分布や建物近傍の詳細な津波挙動を明らかにするとともに、TSUBAME の大規模並列計算による超大規模津波波力解析の可能を確認した。

A three dimensional fluid dynamic computation system have been developed using the Volume of Fluid method (VOF) for predicting the water surface elevation in the shallow water region, inundation depth on the land and tsunami force acting on the structures over complex terrain. The system has been verified in the application of the 3D broken dam problem in considering the effect of mesh refinement and turbulence models, the water tank experiment of run-up tsunami and tsunami force acting on structures in comparison with experimental results. A large scale simulation considering a complex terrain and a wide range urban area were also carried to confirm the capability of system

Keywords: 津波, 3次元流体解析, VOF 法, 複雑地形, 大規模計算, LES 乱流モデル

背景と目的

2011年3月11日に発生した東日本大震災津波により東北地方沿岸から関東地方沿岸までの広い範囲に被害が及んだ。それぞれの被害度は大きな差が見られており、特に、鉄筋コンクリート造ビルの転倒、建物内部に突入した津波による内部からの大規模崩壊など、従来の知見と異なる被災事例も報告されている。その被害は津波高さだけでなく、周辺の建物・構造物の配置や地形などの周辺立地条件の影響による津波の変形、および対象建築物の構造条件も大きく影響するものと考えられる。その影響による遡上津波の挙動や建物に作用する荷重の変化を詳細に評価することは緊急な課題となっている。津波の詳細な挙動や建物に作用する津波力を評価するためには VOF 法 (Volume of Fluid Method) または粒子法などを用いた 3 次元津波解析が必要となるが、計算量及び計算時間は膨大となるため、その実施は困難だと思われる。近年の計算機の性能向上や数値流体解析技術の進歩によりこうした問題にも超大規模並列計算によりその解析が可能であると考えられる。

本利用課題では、TSUBAME2.0 を利用して複雑地形を

考慮した大規模計算モデルの作成及び VOF 法による大規模 3 次元津波解析システムの構築を行う。また、既存実験の結果との比較により本解析システムの計算精度を評価し、複雑な地形や広域な市街地を含めた沿岸地域の大規模 3 次元津波解析を実施するとともに大規模津波波力解析システムの評価を可能にする。

概要

本利用課題では、VOF 法を用いた大規模 3 次元津波波力解析システムを構築した。解析コードはオープンソース流体解析コード OpenFOAM である。解析システムの精度検証を行うためには、重力により駆動される自由表面流の典型問題であるダム崩壊問題に適用して、計算格子の空間解像度や乱流モデルによる影響を評価するとともに、砕波や波の離散・合体を従う大規模な波の変形の予測精度を明らかにした。また、既存の水理実験を模擬して、津波の遡上過程と建物への津波力の予測精度を確認した。最後に、複雑な地形や広域な市街地を含めた沿岸地域の大規模 3 次元津波解析を実施し、解析の可能性を確認した。

結果および考察

1. ダム崩壊問題の再現と計算格子解像度・乱流モデルの依存性の評価

津波の砕波や離散・合体を従う大規模な波変形の予測精度を明らかにするために、重力により駆動される自由表面流の典型問題としたダム崩壊実験^{1,2,3)}を再現した。計算領域は、図-1 に示すように代表長さを $a=0.146$ として、横幅 $4a$ 、奥行き a と高さ $4a$ の矩形水槽とした。初期条件としては、水槽内の左側に横幅 a 、奥行き a と高さ $2a$ の水柱を配置し、これが重力の効果により崩壊していく様子を模擬した。

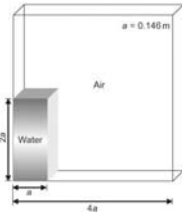


図-1 計算領域の概要

格子空間解像度の影響を調べるために、計算領域を等間隔に分割した $60 \times 15 \times 60$, $120 \times 30 \times 120$, $240 \times 60 \times 240$ の構造格子(図-2a,2b,2c)と、非構造格子(図-2d)を用いて計算を実施した。ここで、それぞれの構造格子の格子幅は 10mm , 5mm と 2.5mm であり、非構造格子は $60 \times 15 \times 60$ の等間隔構造格子に基づいて右壁の近傍を 2 回に細分化したものである。また、乱流モデルの影響を調べるためには、乱流モデルを考慮しないケース(Laminar), RANS 乱流モデルを用いたケース(RANS)及び LES 乱流モデルを用いたケース(LES)での解析を行った。

図-3 は崩壊する水柱の水槽左壁における水位履歴 b (左図)及び水槽右壁に衝突するまでの水槽底面における接触位置の履歴 z (右図)を実験結果と比較したものを示す。乱流モデルを考慮しない計算(図-3a)ではどの計算格子の計算結果でも接触位置の移動が実験結果より速く評価されている。また、RANS 乱流モデルによる計算(図-3b)では格子解像度に大きく依存し、細かい格子を用いても実験結果と良く一致した結果を得られない。一方、LES 乱流モデルによる計算結果は格子解像度による影響が少なく、水槽底面における接触移動量及び水槽左壁における水位を実験とよく再現できる。

図-4 に、 $240 \times 60 \times 240$ の格子を用いて、それぞれの乱流モデルの計算から得られた時刻による水柱形状の変化を示す。水柱が重力の効果により崩壊を始め、水槽右壁に衝突し、壁に沿って打ち上がった後、砕波して降下するとともに水槽左壁に向かっていく一連の大規模な液面挙動については LES 乱流モデルによる計算結果は実験結果とよく一致している。

図-5 には LES 乱流モデルを用いて、それぞれの計算格子で得られた $t=0.6\text{sec}$ での水柱形状を示す。この時刻は、跳ね

上がった水が運動量を失い、砕波を始めて下に降下していく場面である。荒い格子では水の到達高さが低く、細かい格子では跳ね上がった水量が多くなり、水槽右壁に形成された水柱が実験結果に近くなっていく。こうした砕波や離散・合体を従う大規模な波変形については LES 乱流モデルが有効なモデルであり、波が壁などに衝突する際にはその壁の周辺に高い空間解像度のメッシュを構築する必要があることがわかる。

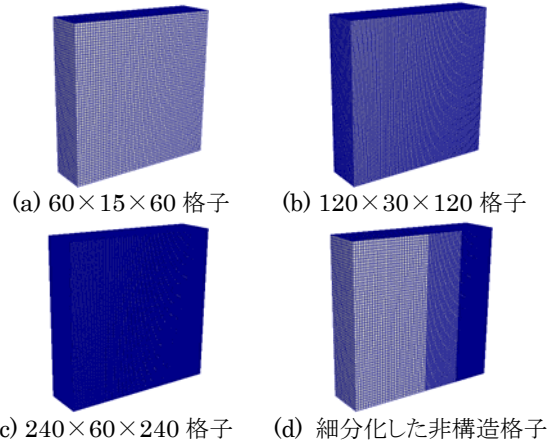
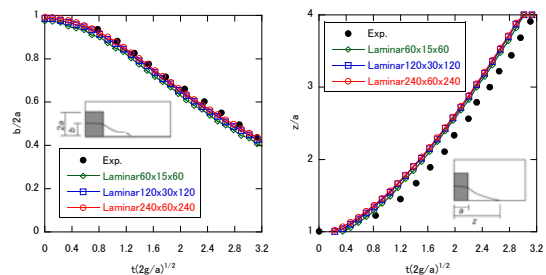
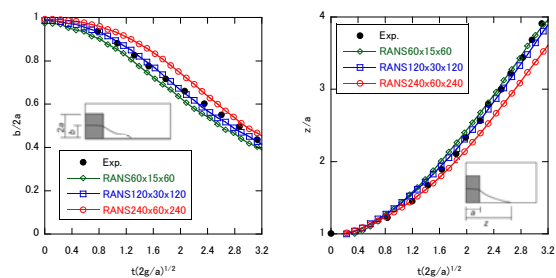


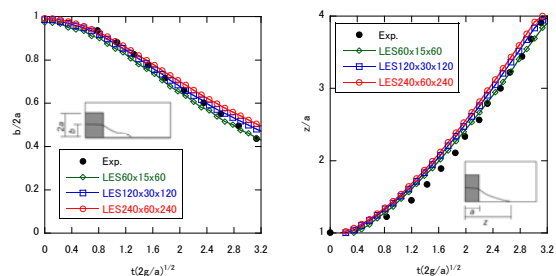
図-2 解析モデルの計算格子



(a) 乱流モデルを考慮しない計算結果

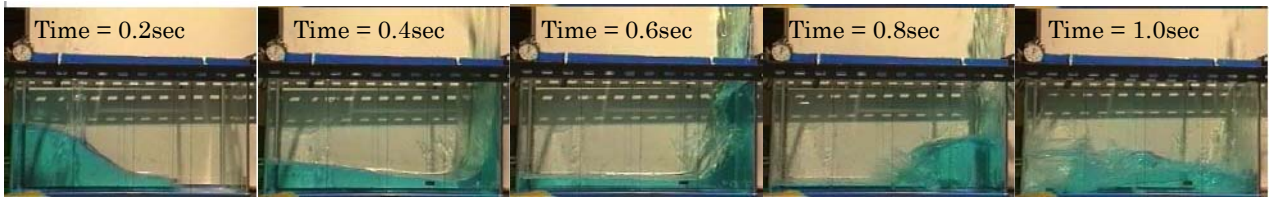


(b) RANS 乱流モデルの計算結果

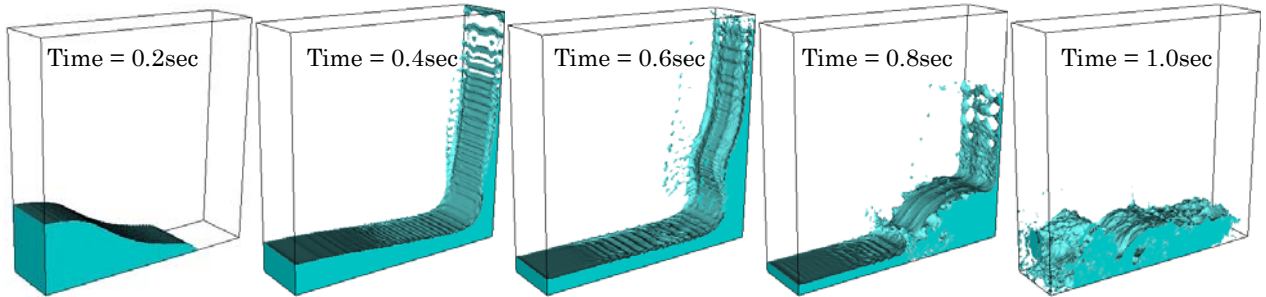


(c) LES 乱流モデルの計算結果

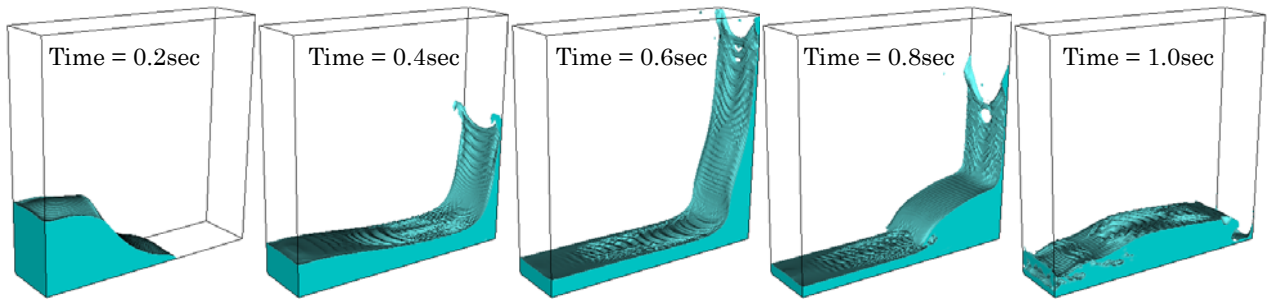
図-3 格子解像度及び乱流モデルの影響による崩壊水柱の水位(左図)及び水槽底面における接触位置(右図)の変化



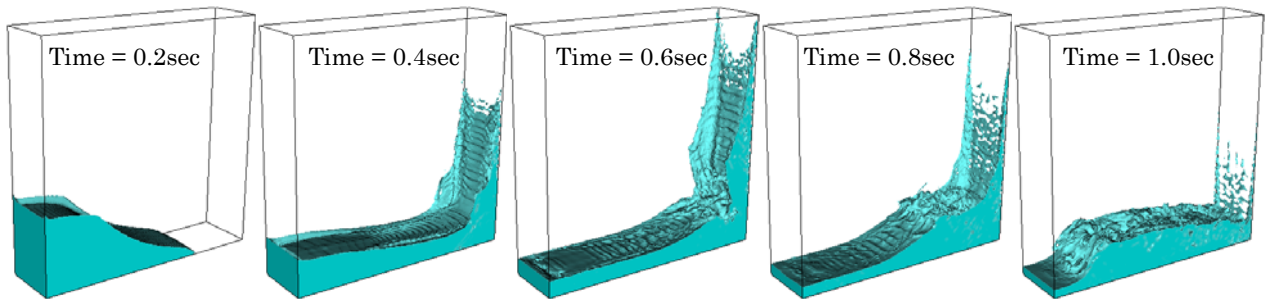
(a) 実験結果 1,2)



(b) 層流モデルによる計算結果(Laminar-240x60x240)

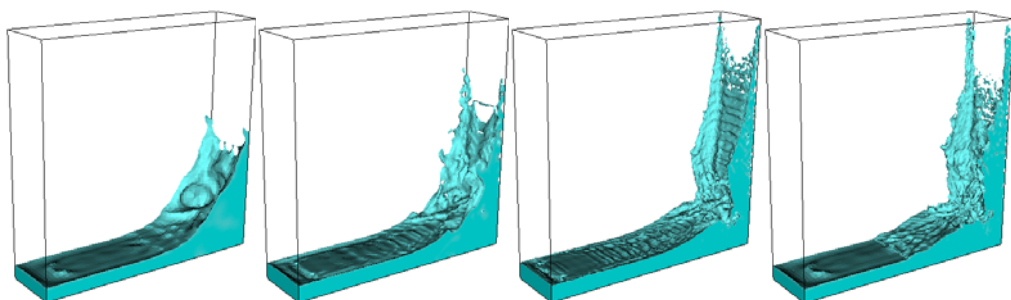


(c) RANS 乱流モデルによる計算結果(RANS-240x60x240)



(d) LES 乱流モデルによる計算結果(LES-240x60x240)

図-4 時刻の液面形状の変化(格子:240x60x240)



(a) 格子 60x15x60 (b) 格子 120x30x120 (c) 格子 240x60x240 (d) 細分化した非構造格子

図-5 LES 乱流モデルによる計算結果(Time=0.6sec)

2. 津波水槽実験の再現

津波の遡上過程と建物への津波力の予測精度の検証のため、既往の水理実験^{3,4)}を模擬した解析を実施した。図-6に実験装置の概要を示す(縮尺比は 1/200)。解析領域はこの平面水槽全体とし、図-7に示すような計算格子を用いて再現した。総格子数は約 1,700 万であり、建物模型周辺では細かくなるよう格子分割を行った。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入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。

図-8 は遡上した津波が建物に衝突する瞬間を海側から見た解析結果である。なお、建物表面の赤い部分は高い圧力値が発生していることを示すものである。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することがわかる。

図-9 は建物が無い時に護岸から沖合へ 4.3m と 0.25m 離れた海域上の点での、実験^{4), 5)}及び本解析結果の水位変動量の比較である。また、図-10 には陸域(護岸から 0.20m 内陸での浸水深の比較を示す。両図とも解析結果(Cal.)は実験結果(Exp.)とほぼ一致している。図-11 と図-12 は建物がある時に建物全体での浸水深と建物に作用する津波荷重の時間変化である。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おり、解析システムの予測精度を確認できる。

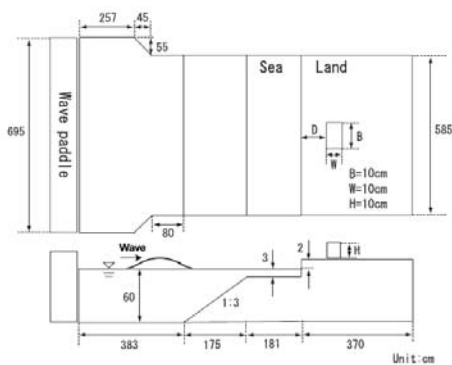


図 6. 水理実験の概要³⁾

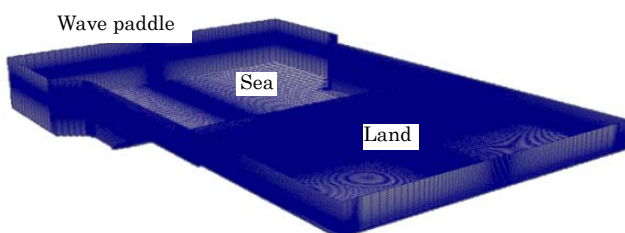


図 7. 解析モデルの計算格子

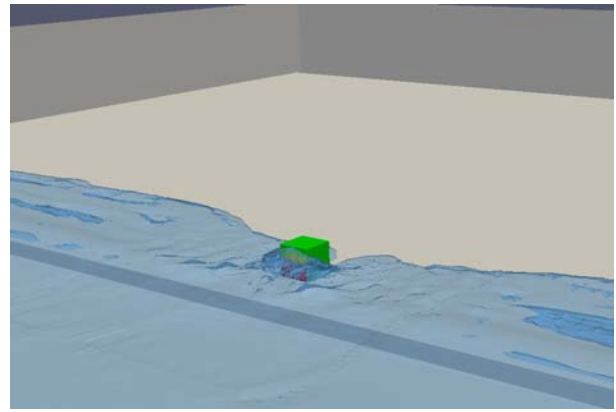


図 8. 遡上津波が建物に衝突する瞬間

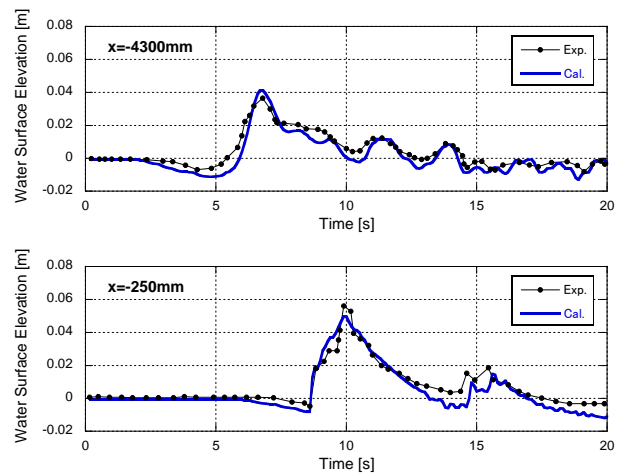


図-9 海域での水位変動の比較

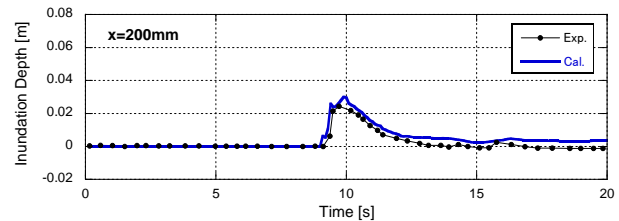


図-10 陸域での浸水深の比較

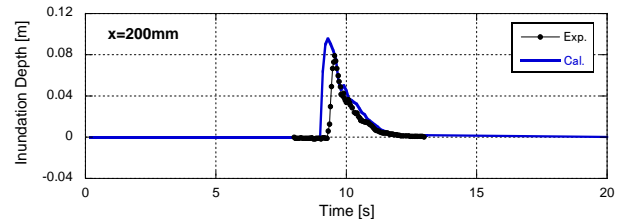


図-11 建物全体での浸水深

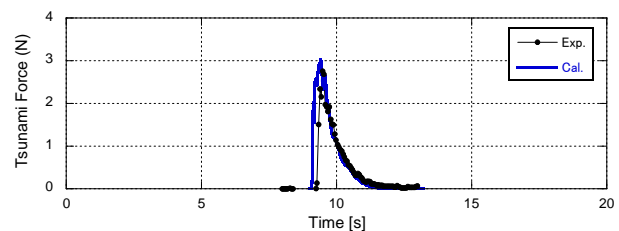


図-12 建物に作用する津波力

3. 複雑地形を考慮した大規模 3 次元津波解析

本課題で構築した解析システムの実用性を検討するためには、6km×6km 範囲の複雑地形や広域な市街地を含めた沿岸地域を対象にして、大規模 3 次元津波解析を実施した。解析領域の概要と、用いた計算格子の拡大図の一例は図-13 と図-14 に示す。計算モデルは水平空間解像度幅を 5m で、建物周辺に 1m で作成された。

図-15 は津波による最高水位分布を沖合での最高水位で無次元化された結果である。図より、地形条件や建物の配置によって津波の進行方向が異なり、複雑な地形や集中住宅の近傍に大きな水位分布がみられて、前建物や障害物の影響により津波の波高を低減していることがわかる。

図-16 には、津波の発生から、沿岸への伝播、地形による波高変化、遡上という一連の挙動を示す。右側のような複雑地形においては局所的な波が集中して、地形の影響により一部の波高の増加が見られる。また、津波が海岸に到達し堤防や護岸を越えて陸上に遡上すると、陸棚斜面の存在や建物群の配置により津波の反射や減衰効果も確認できる。

まとめ、今後の課題

本利用課題では、TSUBAME の利用により以下の項目を検討していた。VOF 法を用いた大規模 3 次元津波波力解析システムを構築して、ダム崩壊問題を適用して、計算モデルの解像度や乱流モデルによる精度検証を行うとともに、LES 乱流モデルは有効な手法として確認し、砕波や波の離散・合体を従う大規模な波変形の予測精度を明らかにした。また、波は重力の効果により崩壊や地面における接触移動は計算格子の解像度による影響が少ないが、波は建物などの壁に衝突する際にはその壁周辺に十分な解像度の計算格子を設ける必要がある。また、本システムを用いて遡上津波の水槽実験を再現することにより、津波の水位変動や陸域での浸水深及び建物全面での浸水深と構造物に作用する津波力との予測精度を確認した。最後に、複雑地形や広域な市街地を含めた沿岸地域を対象にして、大規模津波解析を行うとともに、津波の波高分布や建物近傍の詳細な挙動を明らかにした。今後は TSUBAME を活用して、高速な計算手法の組み込みを行い、計算の短縮化を行い、多くの実験や今回の東日本大震災から得られた観測結果等との比較によりシステムの高度化を図る予定である。

参考文献

1. S.Koshizuka et al., Computational Fluid Dynamics J., Vol.4, No.1, 1995, pp.29-46
2. S.Koshizuka et al., Nucl. Sci, Eng.123, 1996, pp.421-434
3. M.G. Deborah, Int. J. Numer. Meth. Fluids, 2006, pp.693-711
4. チャルレスシマモラ, 海岸工学論文集, Vol.54, 2007, pp.831-835.
5. 中村ら, ながれ, Vol.29, 2010, pp.107-117.

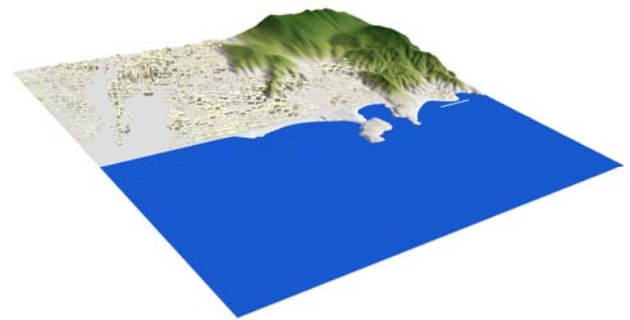


図-13 解析領域の概要 (6km×6km)

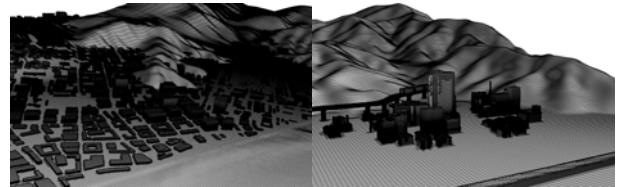


図-14 計算格子の拡大図

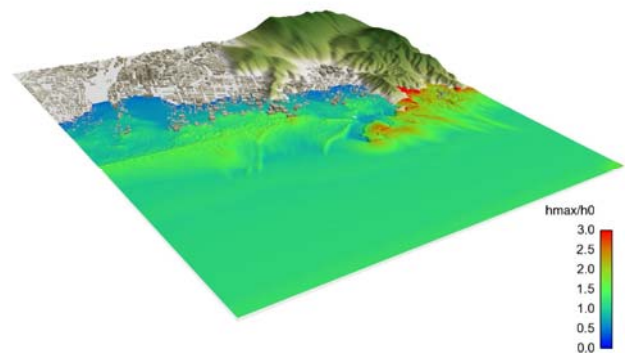


図-15 沖合での最高水位で無次元化された最高水位分布

(様式第 20) 成果報告書

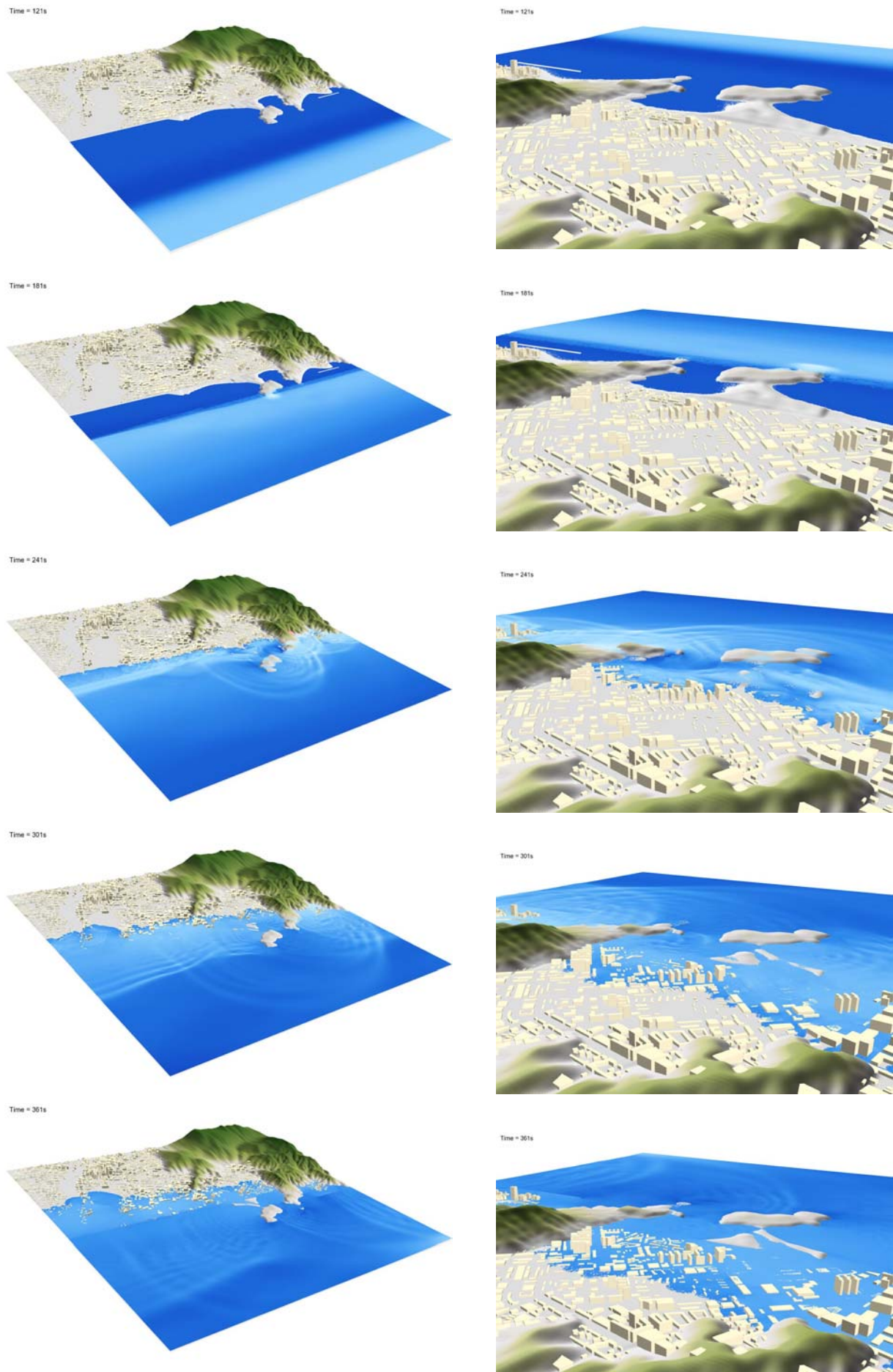


図-16 津波の発生から遡上までという一連の挙動(左:全域, 右:一部の拡大図)