

三次元 VOF 法を用いた大規模津波シミュレーション

ファム・バン・フック
(技術研究所)

長谷部 雅伸
(技術研究所)

A Large Scale Tsunami Simulation using Tree Dimensional VOF Method

by Pham Van Phuc and Hasebe Masanobu

Abstract

A Large Scale Tsunami Simulation System using Three Dimensional VOF (Volume of Fluid) Method has been developed. Sensitivity of turbulence models and grid resolution are investigated in the dam break simulation of collapse of a water column in comparison with the previous experimental results. LES turbulence model is found as an effective model in simulation of tsunami wave run-up on shores. High mesh resolution or mesh refinement need to be adapted to simulate the collision of tsunami wave around buildings and structures. An example of a large-scale simulation is modeled a wide urban area with complex terrain. Local concentration of high wave height distribution has been found in narrow steep terrain and inhibitory effect of buildings and structures on tsunami run-up.

概要

広域街区における複雑な津波遡上現象の再現を目的として、VOF 法による三次元大規模津波シミュレーションシステムを開発した。基礎的な精度検証としてダム崩壊問題を対象としたシミュレーションを行ったところ、LES 乱流モデルを用いることで津波の遡上先端の進行速度が精度良く算定できること、壁面衝突時の打ち上がり高さについては格子解像度の影響が極めて大きく、特に壁面近傍において細かな計算格子を必要とすることがわかった。複雑地形や建物配置を詳細にモデリングした広域街区の津波遡上シミュレーションでは、地形が急峻な部分では遡上高が大きくなり、平野部では内陸の広い領域が浸水するなど、東北地方太平洋沖地震による巨大津波と同様の現象が再現された。

§1.はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では特に巨大津波による被害が甚大であったことから、各方面での津波防災検討にかつてない顕著な動きが見られるようになった。建築・都市計画分野においても、津波避難ビル等の整備が喫緊の課題となっており、関連する学術研究および技術開発が活発に進められている。

津波被害の予測・評価を行う上でベースとなる技術として、数値解析による津波シミュレーションが挙げられる。従来は津波の伝播・遡上を平面二次元的な現象として取り扱う浅水長波モデル¹⁾に基づく数値シミュレーションが広く用いられてきた。今なお政府による津波高さの想定や、自治体の津波ハザードマップ作製には、この平面2次元浅水長波モデルによるシミュレーション結果が用いられている。こうしたシミュレーションでは地形や防波堤などの一部の構造物のみを考慮し、街区など多

くの建築物や工作物等が存在する陸域については、個々の構造物形状を再現するのではなく、粗度係数の値を大きく設定することで、津波遡上流に対する底面摩擦を表現する場合が多い。

しかし、実際の津波遡上流の挙動は、例えば大きな路地では津波が遡上しやすいために強い流れが発生する反面、建築物の密集地帯では流れがせき止められるなど、構造物の配置状況によって複雑に変化する。特に今回の巨大津波では、構造物に波が衝突し打ち上がるなど、非線形性の強い流れ場・波動場の形成が顕著にみられた。このような現象を数値シミュレーションによって再現するためには、地形や構造物の詳細な形状を考慮するとともに、VOF法²⁾や粒子法³⁾など、三次元的な流体現象を完全に再現できる解析手法が必要となる。

ただし、三次元的な解析手法では平面二次元解析に比べて計算量が格段に大きくなるという問題点がある。このため、これまで津波を対象に実施された三次元遡上解

析^{4),5)}では、そのほとんどが単体建物や敷地周辺レベルといった、数十～数百 m のオーダーの計算領域に限定されており、今次の津波で見られたような数 km オーダーに及ぶ範囲での遡上の様相を再現するのは実用上の観点から困難であった。一方、最近では計算機の演算性能、スーパーコンピュータの利用環境、並列計算技術が急速に発展しており、大規模 3 次元津波解析を実務レベルで運用する展望が開けつつある。

以上を踏まえ、筆者らは広域街区における複雑な津波遡上現象の再現を目的として、VOF 法による三次元大規模津波シミュレーションシステムを開発した。本論では、はじめにシステムの概要として数値モデル、計算機環境、プリプロセス手法の特徴について述べる。次いでダムブレイク問題を対象とし、計算格子解像度と乱流モデルに関する基礎的な精度検証を行う。特に津波遡上流の先端部分の進行と、壁面衝突時の打ち上がりの再現性に着目し、乱流モデルと格子解像度の適用性に関する比較検討を行う。最後に、スーパーコンピュータを用いて、数 km オーダーの広域エリアを想定した大規模並列計算を試み、地形や街区形状による遡上形態の変化について考察を加える。

§2. システムの概要

2.1 数値モデル

2.1.1 支配方程式と離散化手法

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 (Volume of Fluid)²⁾ 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) とナビエ・ストークス方程式 (運動量保存則) 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。

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

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

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

ここで、 \mathbf{u} : 流速ベクトル、 p : 圧力、 μ : 流体の粘性係数、 \mathbf{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、 α は水の体積分率 ($0 < \alpha < 1$)、 ρ は両者の混在を考慮した見かけの流体密度である。

支配方程式(1)と(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。移流項の空間的離散化には 2 次精度中心差分、時間発展には 1 次精度陰解法を用いた。また、津波が建物などに衝突したり、大規模な液面挙動が生じたりする動的な挙動を精度よく、かつ効率的に再現するために、計算時間刻み (タイムステップ、 Δt) はクーラン条件を満たすよう随時変更させる手法を採用した。なお、本システムではオープンソースの流体解析ソフトウェアである OpenFOAM⁶⁾ をベースとして、三次元津波解析ソルバーを開発した。

2.1.2 乱流モデル

大気や海洋などに関連する流れ問題の多くは、空間的・時間的スケールが様々な異なる現象が混在した乱流場を形成する。実現象としての乱流場では、微小な渦による減衰効果が巨視的スケールの現象にも無視できない影響を及ぼしている。こうした乱れの微細構造を数値解析で直接再現するためには膨大な量の計算格子が必要となり、一般に実用上の困難を伴う。近年では計算機の発達により、非常に微細な計算格子を大量に用いて乱流構造を直接再現する手法 (Direct Numerical Simulation、以下 DNS と呼ぶ) も試みられているが、実用上の観点から計算格子よりも小さなスケール (Sub-Grid Scale) での効果を巨視的スケールで取り扱う乱流モデルを用いるのが一般的である⁷⁾。

現状で広く用いられている乱流モデルを大別すると、運動方程式に時間的なアンサンブル平均処理 (レイノルズ平均) を施すことで導出される RANS モデル (Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation) と、空間平均的な考え方に基づく LES モデル (Large Eddy Simulation) の 2 つのタイプがある。本研究では第 3 章においてダムブレイク問題を取り上げ、津波遡上流に対する両者の比較検討を行う。本研究では RANS モデルとしては代表的な二方程式 $k-\epsilon$ モデルの一種である RNG モデル⁸⁾ を、LES モデルについては標準 Smagorinsky モデル⁹⁾ を採用した。

2.2 大規模解析のためのハード・ソフト環境

筆者らは大規模数値流体計算の実用化に向けた検討として、平成 22 年度より都市域の風況解析を目的として東京工業大学のスーパーコンピュータ TSUBAME 2.0 を利用してきた^{10),11)}。本章では、はじめに近年の計算機性能向上の背景について述べるとともに、風況解析に関する並列化効率の検討結果を踏まえ、大規模並列計算の将来的な見通しを論じる。次いで広域街区を再現するための解析領域のモデリング手法および計算格子の生成手法について述べ、実用上の有効性を論じる。

2.2.1 計算機性能の向上に関する動向

同一の解析条件のもと、2006年～2010年に開発された計算機単体(以下、計算ノードと呼ぶ)での計算速度の変化を図-1に示す。図中縦軸は2006年時点の計算速度を1とした加速率を示す。図中にはCPUの機種名とクロック周波数も併記しており、いずれの計算機においてもCPUのコア数は8とした。2008年までは主にCPUのクロック周波数の向上により計算時間が速くなっている。これに対し2008年以降では、キャッシュ性能の向上に加え、1クロックあたりで可能な演算処理の内容や回数にも改善が施されており、2010年までの2年間を見ると同程度のクロック周波数にもかかわらず計算速度が約2倍となっている。

次いで、ネットワーク速度の影響について述べる。並列計算を行うに当たっては、各計算ノードをネットワークで結合する必要があるが、主に計算ノード間の通信速度が並列化効率の向上を阻害するボトルネックとなるケースがしばしばある。ここでは計算ノード数を1～32に変化させ、Infiniband SDR(2本、バンド幅：20GBps)及びQDR(2本、バンド幅：80GBps)の二種類のネットワーク環境について検討を行った。また、数値流体解析では連続式と運動方程式から導出される圧力に関するポアソン方程式を陰的に解く必要があり、行列解法のアルゴリズムによっても計算時間は大きく変化する。よって、並列計算への適用性を比較検討するために、行列解法として共役勾配法であるCG(Conjugate Gradient)と代数的マルチグリッド法であるAMG(Algebraic MultiGrid)を用いた。検討結果を図-2に示すが、バンド幅が小さいネットワークInfiniband SDRでは16ノードでAMGソルバーの加速率は頭打ちとなる一方、バンド幅の大きいネットワークInfiniband QDRを用いることによりその実行性能は改善されることが分かる。なお、図ではCGのケースの方がノード数に対する計算速度の向上率が高いが、同条件ではAMGソルバーの計算速度の方が約2.5倍速いため、本システムでは後者の行列解法を採用した。

2.2.2 大規模並列計算の可能性

図-3には大規模市街地の風況解析について、計算格子数を1千万、4億とした各ケースでの並列加速率を示す。前者のケースでは並列加速率が計算ノード数512で頭打ちとなるが、4億格子モデルでは計算ノード数1024でも増加している。計算格子が多いほどノード数の増加に対する計算効率の向上が見込めるため、大規模な計算領域をより詳細に再現する計算条件での並列化の恩恵が大きいことがわかる。

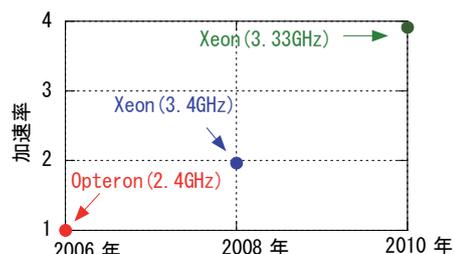


図-1 CPU性能の向上に対する計算速度の変化

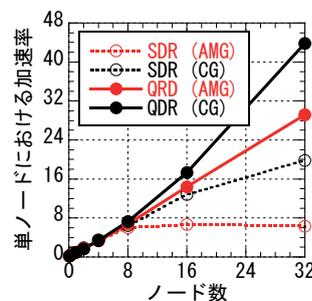


図-2 ネットワークによる加速率の変化

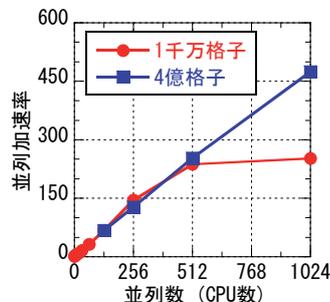


図-3 計算格子数の違いによる並列化効率の変化

2.2.3 大規模計算格子の自動生成法

数値解析の再現性を実現現象に近づけるためには、計算領域の大規模化と精緻化がともに必要となるが、一方でこれらは解析に要する計算コストだけではなく、計算領域のモデリング作業という前処理での労力をも増大させるという実用上の課題を含んでいる。計算領域の形状再現性そのものに関しては、最近では三次元CADの普及によって精緻な形状データが得られるようになってきた。一方で計算格子の生成に関しては、従来の手法の多くはCADで再現された形状モデルを数値解析に転用する際に、グリッドサイズよりも小さな物体や隙間などを除去するなどといったデータ加工が必要であった。一般にこうしたデータ加工にかかる労力は解析対象が大規模であるほど、また精緻に再現しようとするほど格段に増大することとなる。そこで、本システムでは物体周りを非常に細かな直方体格子で細分化するBuilding-Cube法¹²⁾を採用した。本手法は三次元CAD等のデータに特段の加工を加えることなく計算格子の生成が可能であり、他の手法と比べて自動化も容易であるというメリットがある。

一例として、図-4に当社技術研究所の三次元

CAD データを、**図-5**にはこの CAD データを元に Building-Cube 法で生成した計算格子をそれぞれ示す。物体近傍の格子幅は最小 10cm で、建物の内部空間も合わせて全体の格子数は約 2 億である。建物の外観だけではなく、屋内の構造や設備・什器までを詳細に再現することが可能である。従来の手法ではここに示すような大規模で精緻な解析データを作成することは困難であり、本手法が実務上有用であることがわかる。

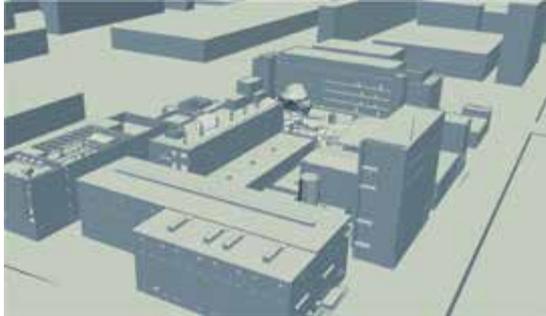
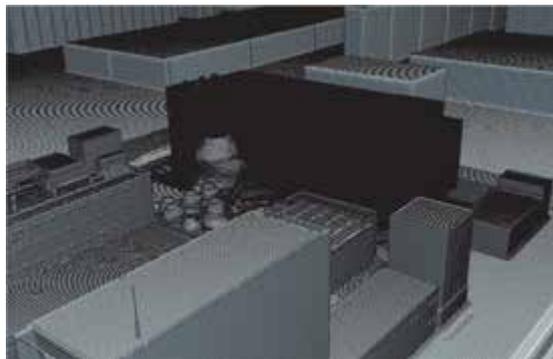
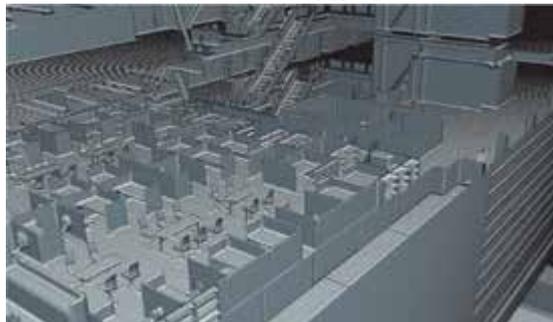


図-4 当社技術研究所の 3 次元 CAD データ



(a) 屋外の再現状況



(b) 屋内の再現状況

図-5 Building-Cube 法による計算格子作成例

§3.ダム崩壊問題を対象とした乱流モデルと格子解像度の比較検討

3.1 解析条件

一般に数値流体解析では、乱流モデルや計算格子サイズによって計算精度が大きく変わりうる。ここでは特に、津波の遡上や砕波といった強い非線形現象の再現性に着目し、Koshizuka らが行ったダム崩壊実験¹³⁾の再現解析によって、乱流モデルと格子解像度の影響

についての比較検討を行う。なお、実験データの詳細については Greaves の研究¹⁴⁾を参照した。

計算領域は**図-6**に示すように横幅 $4a$ 、高さ $4a$ 、奥行き a の矩形水槽とした。ここで a は代表長さであり、本検討では $a=0.146\text{m}$ とした。初期条件として、水槽の左端に横幅および奥行き a 、高さ $2a$ の水柱を配置した。**写真-1**に崩壊した水柱が床面上を移動している状態($t=0.2\text{s}$)と、水槽右壁に衝突し壁に沿って打ち上がった状態($t=0.6\text{s}$)をそれぞれ示す。これらはそれぞれ陸上の津波遡上流の進行や、構造物への衝突時による波の打ち上がりに類似した挙動を示す。こうした非線形性の強い現象の再現性は、複雑な街区形状での津波遡上流の挙動だけでは無く、構造物に作用する荷重の算定精度にも直結する重要な要因となる。

以下の検討では、乱流モデルとして RANS、LES を採用したケースに加え、比較のため敢えて乱流モデルを用いないケース(以下では便宜上 DNS と示す)も設けた。格子解像度に関しては、**図-7**に示すように計算領域全体を等間隔の直交構造格子で分割した各ケース(格子幅 $\Delta=10\text{mm}$ 、 5mm 、 2.5mm)と、崩壊した水柱がせり上がる右側壁面の周辺部分を最小 $\Delta=2.5\text{mm}$ の格子サイズで段階的に細分化したケースを加えた 4 ケースを設定した。



(a) 崩壊直後の底面流れ (b) 右壁への打ち上がり

写真-1 ダム崩壊問題の実験結果¹³⁾

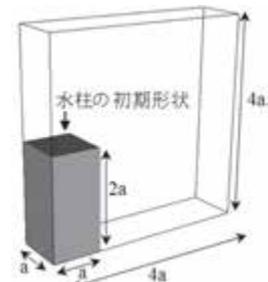


図-6 計算領域の概要

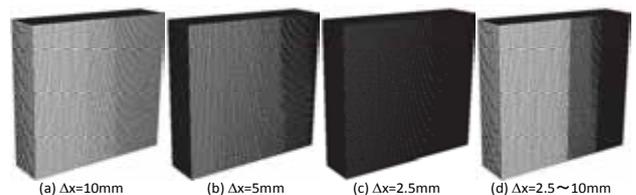


図-7 計算格子の分割パターン

3.2 乱流モデルの計算精度への影響

乱流モデルに関してDNS、RANSモデル、LESモデルを採用した各ケースにおける、水槽左端での水位 b (左図)と、水柱崩壊で発生する底面流れの先端位置 z (右図)の時間変化を図-8~図-10に示す。

DNSの解析結果では、水槽左端の水位 b についてほぼ実験と一致しており、他の乱流モデルを用いたケースと比較して最も良好な再現制度が得られた。一方で、底面流れの先端位置 z については、実験と比較してその進行速度が速くなる傾向にある。また、DNSによる解析結果の特徴として、 b 、 z ともに格子解像度の依存性がほとんど無いことがわかる。

RANSモデルを用いたケースでは、他のケースと比較して格子解像度による影響が顕著に現れる結果となった。特に最も格子解像度の小さなケース($\Delta=2.5\text{mm}$)において、底面流の進行速度が実験結果よりも遅く評価されている。また、 b の低下も $\Delta=2.5\text{mm}$ のケースが最も遅いが、これは底面流の進行が遅いことに対応しており、水槽の右方向への水塊の移動が抑制されるためであると考えられる。一方、LESモデルを用いた解析結果では、RANSモデルと比較して格子解像度の影響は少なく、特に底面流の進行に関してはDNSのケースよりも実験結果に近いことが分かる。

これら解析結果をまとめると、DNSでは床面での摩擦効果を過小に、RANSモデルは計算格子サイズが小さい場合に底面摩擦を過大に評価する傾向にあることがわかる。DNSについては、格子よりも小さいスケールの渦を無視しているため、床面によって発達する微小な渦を十分に再現できず、乱流摩擦効果を過小に評価することになると考えられる。本検討の範囲では格子解像度が十分でない可能性もあるが、より小さな格子では実用上の課題が生じる。RANSモデルでは、底面近傍の乱流摩擦効果を壁関数によって評価しているものの、その再現精度は対象とする現象そのものや計算領域の格子サイズの影響を受けるものと推察される。詳細なメカニズムが解明されているとは言い難いが、RANSモデルの再現性に関する類似した傾向は既往研究¹⁴⁾でも示唆されているところであり、津波遡上解析におけるRANSモデルの適用性に関しては課題が払拭できていないのが現状である。LESモデルではSub-Gridスケールの現象が格子解像度に応じてモデル化されるため、計算格子サイズによって底面摩擦効果の強さが大幅に変わることはないものと考えられる。

本研究では、以上の検討結果を踏まえつつ、実用レベルで津波遡上現象を良好に再現するために、乱流モデルとしてLESを採用することとした。

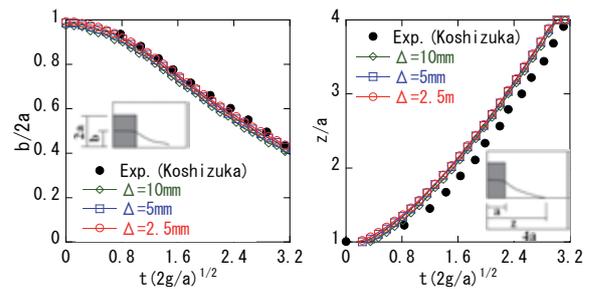


図-8 DNSの解析結果

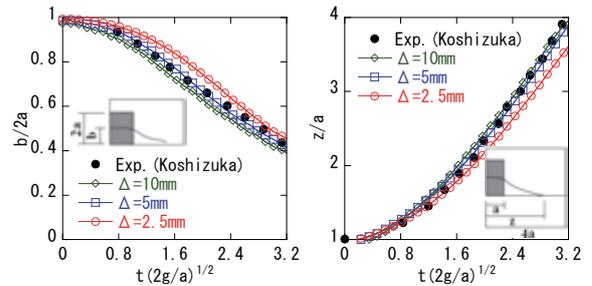


図-9 RANSモデルの解析結果

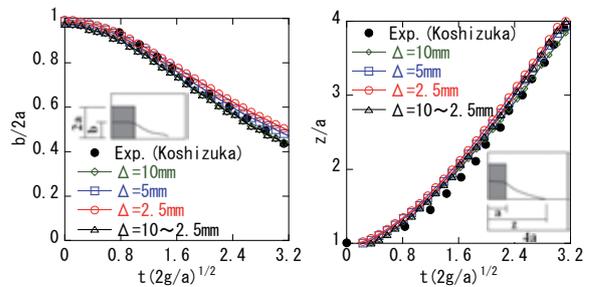


図-10 LESモデルの解析結果

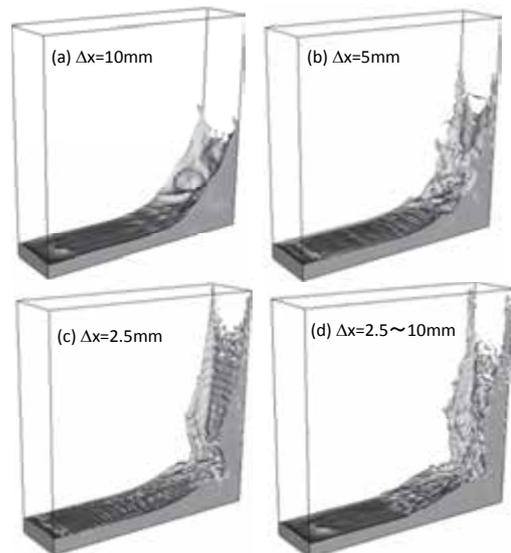


図-11 水槽壁面における打ち上がりの状況

3.3 格子解像度による再現性の変化

図-11には、水柱崩壊によって発生した流れが水槽の右側壁面に衝突し、壁に沿って最も高い位置まで打ち上がった状況の比較を示す。打ち上げ高さは細かい格子を用いたケースほど実験結果に一致する傾向にあるが、図-11(d)からもわかるように右側壁面の計算格

子を細分化することでも図-11(c)と遜色のない再現性が得られることがわかる。打ち上げ現象の再現性は、特に構造物に作用する津波荷重を算定する際に重要となる。計算精度と実用性の双方を勘案し、本研究では構造物周辺において計算格子を細分化する手法を採用することとした。

§4. 街区全体を対象とした大規模三次元解析

4.1 解析条件

図-12に示す6km×6kmの範囲を計算領域とした、広域街区における三次元津波遡上シミュレーションを行った。本検討では地形の様相による津波遡上の変化を見るため、内陸に広い平野部が広がる領域(図左側の部分)と、海岸線近くまで急峻な地形が迫る領域(図右側の部分)が混在する架空の街区を設定した。計算領域については、これまでの検討を踏まえ、構造物周辺ほど小さな計算格子を用いる細分化メッシュにより計算領域を構築した。計算格子間隔は5m~1mである。図-13に一例として建物近傍の格子分割状況を示す。なお、全体の計算格子数は約5千万である。

乱流モデルにはLESを採用した。また、入射する津波の条件として、沖合で最大15mの高さの津波が海岸線と平行に到来する状況を想定した。本計算には東京工業大学のTSUBAME2.0を用いた¹⁵⁾。ここでは実現象で7分間の現象を再現し、これに要した計算時間は198ノードで約8日間であった。

4.2 解析結果

図-14に計算領域全体での津波の伝播・遡上の状況を、1分間毎のスナップショットとして示す。到達した津波ははじめに急峻地形のエリアに到達し、山肌に沿って大きくせり上がり、高い遡上高を示している。これに対し平野部の街区では相対的に浸水深は小さいが、浸水範囲が内陸に大きく広がっていく様子が見られる。こうした津波遡上の様相に見られる対比的な傾向は、3.11津波におけるリアス式地形の発達した三陸海岸と、仙台平野が広がる宮城県南部の各地域での浸水状況と類似している。また、海域部分において津波が屈折・回折する様子、海岸線で発生する反射波の様子も詳細に再現することができている。

図-15は平野部の街区における津波の遡上をより詳細に示したものである。建物が密集している部分では津波がせき止められる反面、大きな路地や空地では津波が進行しやすく、内陸への浸水範囲の拡大も顕著である。この結果、津波の到来が海岸線と平行であるにもかかわらず、陸上での遡上先端部分の形状は複雑

になることがわかる。

図-16には急峻地形の街区における解析結果を示す。津波到来直後に大きな建物の前面で津波がせり上がる点では平野部街区の状況と同様であるが、その後、周囲の地形がV字の谷状となっているため、図左方向からも大きな波が打ち寄せる様子がわかる。また、構造物を三次元で再現することで、例えば鉄道の高架橋の下部を津波が通過する様子も再現できている。

以上のように、三次元VOF法による津波遡上シミュレーションでは、地形や街区形状を詳細に考慮することで、陸域における複雑な津波の挙動を再現することが可能となる。

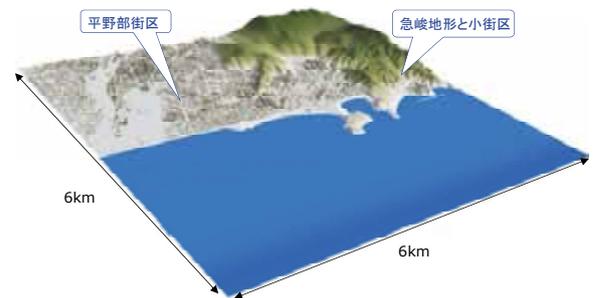
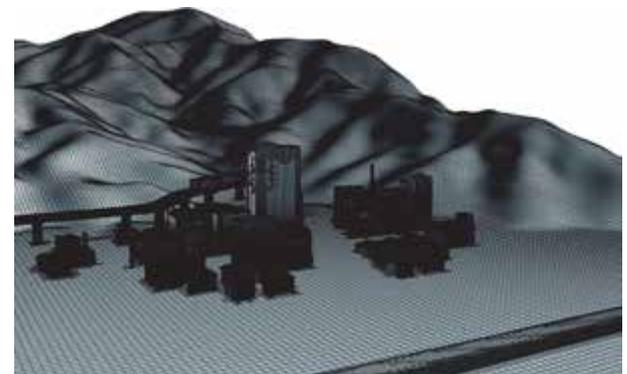


図-12 本検討で想定した広域街区領域



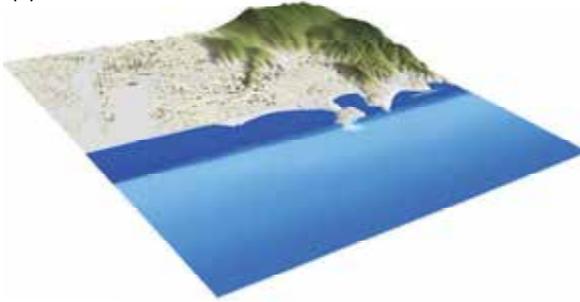
(a) 平野部街区の格子分割状況



(b) 急峻地形および小街区の格子分割状況

図-13 格子分割の状況

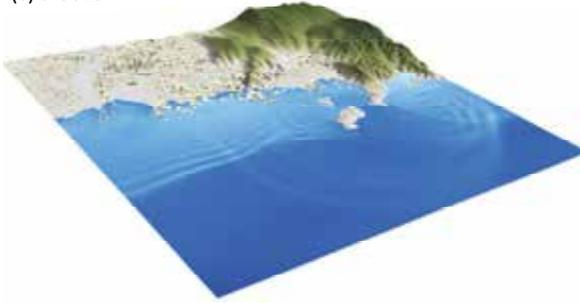
(a) t=181s



(b) t=241s



(c) t=301s



(d) t=361s

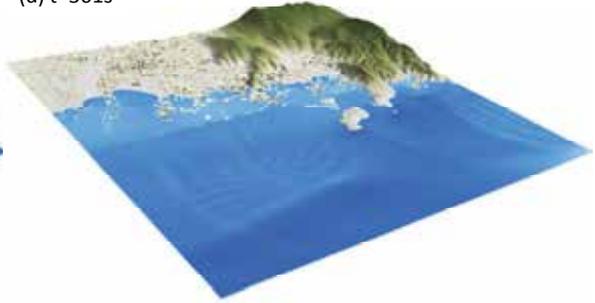


図-14 計算領域全体の津波伝搬・遡上の様子

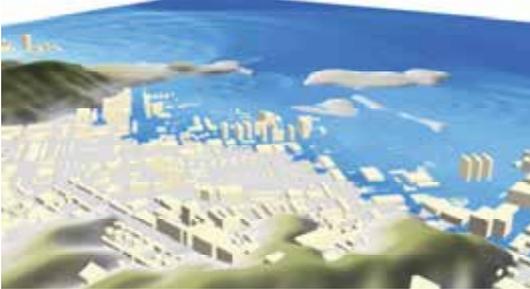
(a) t=181s



(b) t=241s



(c) t=301s



(d) t=361s



図-15 平野部街区における津波遡上

(a) t=208s



(b) t=248s



図-16 急峻地形の小街区領域における津波遡上

§5.おわりに

広域街区における複雑な津波遡上現象の再現を目的として、VOF 法による三次元大規模津波シミュレーションシステムを開発した。本システムの開発にあたっては実用性に配慮し、これまで主に風況解析に用いてきた三次元領域のモデリング手法を応用して、シミュレーションの前処理段階のシステム整備も行った。特に格子生成手法として Building Cube 法を採用することで、CAD データの加工にかかる労力を大幅に削減しつつ、大規模な三次元領域を精緻に再現することが可能となった。

次いで、乱流モデルと格子解像度の設定について、ダムブレイク問題を対象とした基礎的な検討を行った。本研究では、津波遡上流など底面摩擦の影響が強い現象については LES 乱流モデルを用いることで格子解像度の影響を最小限にとどめつつ再現精度が確保できるが、津波が大きく打ち上がる構造物近傍では格子解像度の影響が大きく格子サイズの細分化などの手法が重要である。

最後に、6km 四方の広域街区を対象としたシミュレーションを行ったが、このような大規模計算はこれまで実施された例が無く、東京工業大学のスーパーコンピュータ TSUBAME2.0 を用いることで、数日～数週間オー

ダーの計算時間で実現可能となった。解析結果として、地形が急峻な部分では遡上高が大きくなり、平野部では内陸の広い領域が浸水するなど、東北地方太平洋沖地震による巨大津波と類似した津波遡上現象が再現された。また、構造物形状を三次元的に表現することで、高架橋などの下部を津波が通過する状況や、本論では示していないが建物内部に侵入した津波の挙動なども再現可能であるという特長がある。

三次元解析手法のもう一つの特長として、津波荷重の直接算定が可能となる点が挙げられる¹⁷⁾。また、本システムでは従来の平面二次元的なシミュレーション手法との連動も念頭においており、震源域からの津波の伝播形態など地域ごとに異なる特性を入力条件として津波荷重を評価することも可能となっている。今後は津波荷重のより詳細な精度検証とともに、多様な地域特性を考慮した津波対策への本システムの活用を推進する考えである。

謝辞

本システムによる計算検討は、東京工業大学学術国際情報センターの TSUBAME 共同利用(産業利用)の採択課題「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」により実施した。ここに記して謝意を表す。

<参考文献>

- 1) 後藤智明, 小川由信: “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, 52p, 1982.
- 2) Hirt, C. W. and B. D. Nichols: “Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries”, J. Comput. Phys., Vol.39, 1981.
- 3) 越塚誠一: “粒子法による流れの数値解析”, ながれ, 21, pp.230-239, 2002.
- 4) 入部綱清, 尾上耕一, 藤澤智光, 柴田和也, 須藤健太郎, 原田隆宏, 越塚誠一: “粒子法による臨海都市を襲う津波の 3 次元シミュレーション”, 第 18 回計算力学講演会ビジュアルセッションコンテスト, VC2005-026, 2005.
- 5) 中村友昭, 水谷法美, 藤間功司: “遡上津波の変形と陸上構造物に作用する津波力に関する 3 次元数値シミュレーション”, 日本流体力学会誌, Vol.29, pp.107-117, 2010.
- 6) OpenFOAM: <http://www.openfoam.com/>, 2012/05/20 閲覧.
- 7) Ferziger, J. H., M. Peric: “Computational Methods for Fluid Dynamics”, 3rd Edition, Springer, pp.265-303, 2001.
- 8) Yakhot, V., L. M. Smith: “The renormalization group, the ϵ -expansion and derivation of turbulence model”, J. Sci. Comp., Vol.7, pp.35-61, 1992.
- 9) Smagorinsky, J. (1963): General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment, Monthly Weather Review, Vol.91, pp.99-164, 1963.
- 10) ファム バン フック: “建築物の室内外環境の連成解析とその高速化技術の開発”, 平成 22 年度 TSUBAME 共同利用(産業利用トライアルユース) 成果報告書, 2011.
- 11) ファム バン フック: “建築物の室内外環境の連成解析とその高速化技術の開発”, 平成 23 年度 TSUBAME 共同利用(産業利用トライアルユース) 成果報告書, 2012.
- 12) 中橋和博, 佐々木大輔, 小林広明, 江川隆輔, 高橋俊, 新井紀夫, 東田学, 石井克哉: “次世代ベタスケール CFD のアルゴリズム研究”, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第二回シンポジウム, pp.1-8, 2011.
- 13) Koshizuka, S., H. Tamako and Y. Oka: “A Particle Method for Incompressible Viscous Flow with Fluid Fragmentation”, CFD Journal, Vol.4, No.1, pp.29-46, 1995.
- 14) 梶島岳夫: “乱流の数値シミュレーション”, 養賢堂, pp.175-177, 2007.
- 15) Greaves, D. M.: “Simulation of Viscous Water Column Collapse using Adapting Hierarchical Grids”, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol.50, pp.693-711, 2006.
- 16) ファム バン フック: “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”, 平成 23 年度 TSUBAME 共同利用(産業利用トライアルユース) 成果報告書, 2012.
- 17) 佐川隆之, ファム・フック, 長谷部雅伸, 坂本真一: “開口を有する建築物を対象とした三次元津波荷重解析と転倒判定法の提案”, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 68, 2012.