

VOF法とネスティング法を用いた 動的津波解析

村上敦1·大町達夫2·築山洋3

 ¹住商エレクトロニクス株式会社(論文執筆時東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程) (〒101-8453 東京都千代田区神田錦町3-11)
E-mail: murakamiatsushi@kuramae.ne.jp
²東京工業大学総合理工学研究科教授 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)
E-mail:ohmachi@enveng.titech.ac.jp
³株式会社築山研究所 (〒274-0063 船橋市習志野台4-18-2-303)
E-mail: pxi10213@niftyserve.or.jp

既往の研究において,地震による海底地盤の動的変動を考慮して,津波の発生・伝播を解析することの できる動的津波解析手法が提案されている.これは,3次元NS方程式を基礎方程式とし,時々刻々と変 化する海底地盤の変位を速度境界条件として与えて解析を行うものである.本研究では,さらに,津波の 発生・伝播・遡上といった一連の現象を一括して解析することを目標とし,動的津波解析における流体解 析部に,津波遡上時の複雑な自由表面を扱うことのできるVOF法を用い,さらに,時間・空間共にエル ミート補間するネスティング手法を適用した.このプログラムによるいくつかの解析例を元に,本手法に ついて考察した.

Key Words : Tsunami, VOF, Nesting, Tsunami run-up

1.はじめに

日本は周囲を海に囲まれた島国である.また,プレ ートの沈み込む境界に位置する地震国でもあるため, 津波による被災の可能性が非常に大きい.実際,近年 では,1983年の日本海中部地震によって発生した津波 や,1993年北海道南西沖地震によって発生した津波に よる被害がある.そこで,津波防災に役立つような高 精度な解析手法を開発することが本研究の目的である.

津波は,地震による海底地盤の変位によって発生し, 海洋を伝播して沿岸に打ち寄せ,陸上に遡上し被害を 起こす.このように津波は発生・伝播・遡上といった 段階に分けることが出来るが,これらの物理的な現象 の繋がりを考慮しながら,一連の現象を解析すること が望ましい.

既往の研究で、断層モデルによる地震の発生と、それによる津波の発生、伝播という過程を解析することのできる動的津波解析手法が開発されている¹⁾.しかし、従来の動的津波解析では海岸を鉛直壁として扱っていたために遡上解析を行なうことが難しかった.遡上解析を行なうことを目指し、流体解析に複雑な自由表面の変形を容易に扱うことのできるVOF(Volume of fluid)法²⁾の導入が考えられ、動的津波解析手法への適

用性が検討されてきた.

本研究では,動的津波解析にVOF法を用いて自由表面 の表現力を向上させ,さらにネスティングという格子 サイズの大きさの異なる領域間を接続する手法を導入 して,遡上域での格子解像度を上げ,津波の発生・伝 播・遡上という現象を一括して解析できる手法の開発 を目指す.

2.動的津波解析手法の概要

従来,シミュレーションでは津波の初期波形は,地 震後の永久変位と同じ形と仮定して行なわれてきた. しかし,実際に津波が発生する過程は,地震が発生す る際の海底面の変形が流体としての海水に伝えられ, その結果として海水面の大きな変形が引き起こされる ものである.このような津波発生の過程を正確に表す シミュレーション手法として.動的津波解析手法が考 えられた.動的津波解析手法の具体的な手順は,地盤 の地震動の計算にBEMを用い,その計算結果の時刻歴 を海底面での境界条件として与えながら,海水の流体 計算を行って,津波の発生・伝播をシミュレーション するものである. 3.VOF法

(1) VOF法の概要

津波は海面という自由表面を持つ流体の運動である. 水深の浅い沿岸付近から遡上域において,海面は特に 複雑な変形を起こす.VOF法は複雑な自由表面を表現 でき(図-1),その動きを追跡することのできる流体 解析手法として知られており,越流や砕波のような複 雑な自由表面の変形があっても解析を行える.各格子 に流体の量を表す指標としてVOF関数F(ただし,0 F

1)が定義され、このF値と、周囲のF値の分布状況から自由表面形状を得る.これによって解析ステップを 進めていっても自由表面の位置を追跡することが可能 となる.

VOF法は動的津波解析手法への適用も容易であるこ とから,本研究では,基本となる流体解析手法につい て3次元のVOFを用いる.これによって津波遡上の際 の複雑な波の変形を詳細に解析することが可能になる と考えられる.ただし,複雑な表面形状を表現するた めには,十分な格子解像度が必要である.

(2) VOF法の流体解析プログラムの検証

既存のプログラムに導入したVOFコードの妥当性を検 証するため、2次元水柱の崩壊を計算した.図-2に示 すような初期条件で時刻t=0で重力下に開放し、流体塊 が崩壊する先端部の位置と時間の関係を求めた. J.C.Martinの水理実験³⁾に倣って、水柱の底部と水柱 の高さの比を1:1、1:2、1:4と変えて計算を行った. 格子間隔はaを10分割した.計算結果は位置と時間を無 次元化して、それぞれを縦軸、横軸にとり、図-3に示 すグラフにまとめた.同図にはJ.C.Martinの実験結果 もプロットしてある.

計算結果と実験結果とを比較して,計算でかなりよ く再現できていることが分かる.細かくみれば,やや移 動速度が速くなっているが,スリップ条件で計算して いるのが原因と考えられる.

さらに,3次元の越流モデルで計算を行い,3次元 的な動きの定性的正しさを確認した.(図-4)

これらの結果より,本研究で作成したVOFコードの妥当性が確認できたと考えられる.

4.ネスティング

(1) 津波解析におけるネスティング

津波の解析を行う際に,発生・伝播・遡上を一括し て解析しようとすると,津波の発生域である海洋で数 十~数百kmのオーダーの領域を解析しなければならな いのと同時に,遡上の際には海岸の防波堤のような数 mのオーダーの解像度が求められてくる.しかし,領 域全ての格子間隔の細分化は,大きな負担となってし まうので,できるだけ計算負荷を軽減する方法が必要で ある,計算負荷を増加させずに,必要な解像度を得る ために,部分的に格子の解像度を上げるネスティング



図-3 先端到達時間の計算と実験³⁾の比較



図-4 VOF 法による 3 次元越流計算(MPEG/743KB)

という手法を用いる.ネスティング手法の導入によって,海洋は粗い格子間隔で計算を行い,海岸付近のみ 格子間隔を小さくして解像度を上げることが可能となる.

(2) ネスティング手法の概要

図-5にネスティングの概念図を示す.まず大きいサ イズの格子を計算し,小さいサイズの格子境界へ物理 量を補完して,小さいサイズの格子領域内を計算する. これによって格子間隔の粗い領域から細かい領域へと 解析を接続する.補間方法としていろいろ考えられる が,本研究では,Linear補間よりも精度のよい Hermite補間を,空間だけでなく,時間方向の補間にも 用いる.格子幅の違う領域では,それぞれ異なったタ イムステップを用いる必要がある.格子幅と最大流速 とタイムステップで定まるクーラン数cが1を超えると 計算が発散してしまうため,通常はc<1となるように, 最小の格子幅に合わせて小さなタイムステップを選ぶ 必要がある.ネスティングでは,それぞれの格子幅に応 じたタイムステップを選ぶ.ただし,時間・空間的に補 間を行う関係から,計算を行う順序が決まってくる.

(3) VOF法とネスティングを用いた3次元水柱崩壊の計算

VOF法へのネスティングの適用性を検討するため, 図-6に示すような3次元の水柱崩壊問題をテスト解析 した.解析領域の角に水柱を静水圧状態で置き,重力 下に開放した.計算時間は1秒間である.解析領域はス リップ壁で囲われている.単に計算格子間隔の変えた ものと,図-6に示された点線で囲まれた領域をネステ ィングによって細かい格子へと接続したものよって, 表-7に示すTYPE-A~Eの5通りの計算を行った.

時刻t=1.0で崩れて広がった状態の,TYPE-A,TYPE-B,TYPE-Cの計算結果を重ねて表示したものを図-8に 示す.TYPE-A,TYPE-B,TYPE-Cを比較すると,格子解 像度が高い順に,壁面にぶつかって跳ね上がっている 高さが大きくなっている.このような流体形状を正確 に表現するにためには高い解像度が必要であることが 分かる.

またネスティングを行ったDの計算結果のスナップショットを図-9に示す.境界面で補間によって与えられた ネスティング領域の流れが,流体全体の動きと一致し ており,自由表面を持った流体に対し,部分的に解像 度を上げた解析が実現できている.ネスティング領域 内部では,ネスティングを行って格子解像度を上げた ことで,全体の解像度を上げたのと同様に,流体の形 状がより正確に再現されていると思われる.



図-5 ネスティングのイメージ



図-6 3次元水柱崩壊計算モデル

表-1 3次元水柱崩壊計算

Туре	Grid size
А	0.25 m
В	0.125 m
С	0.083 m
D	0.25 m + 0.125 m(Nested Area)
Е	0.25 m + 0.083 m(Nested Area)



図-8 t=1.0 における A, B, Cの状態 (黒い線の直方体が初期状態)



図-9 3次元ダムブレイクのスナップショット(TYPE-D)(<u>MPEG/259KB</u>)



さらに,壁面(図-7,図-9手前左側の壁)における 最大水位の時刻歴を図-10に示すグラフにまとめた.ま ず,TYPE-B,TYPE-Cに比べてTYPE-Aは極端に低い.こ のことから,TYPE-Aの解像度では,壁面を跳ね上がる 流体形状を表現できていないということが分かる.次 にネスティングをしたTYPE-DとTYPE-Eを見ると,それ ぞれTYPE-BとTYPE-Cに迫っていることが見て取れる. ネスティングを行って部分的に解像度を上げることで, 全体の解像度を上げるのに近い効果を得ていることが 確認できる.このことは,津波における遡上域に,ネ スティングをを適用することで,計算の効率を高めつ つ,高解像度な地形の影響を受けて,ある程度の精度 を持った計算を行えると考えられる.

(4) 2次元動的津波遡上解析

本プログラムを用い,図-11に示すような2次元のモ デルを用いて,動的津波遡上解析を行った.結果のス ナップショットの一部を図-12に示す,図-12では,解







図-12 遡上解析スナップショット(MPEG/563KB)

像度の低い津波の発生源となる領域から,遡上域の解 像度の高い領域へと津波が伝播していき,海岸線付近 でのソリトン分裂らしき現象を起こし,その後,階段 状に近似されている斜面上ではあるが,津波が遡上す る様子が確認できた.

ただし、細かい振動のようなものが見られる.これ は未だ流体解析プログラムに問題があるためであると 考えられる.また、本研究においては、単純に水深が 浅くなるほどネスティングによって格子間隔を狭めた が、どのような基準をもってどのような領域に対して ネスティングを行うべきかということについての検討 が必要である.水深をひとつの基準とすることが考え られるが、その具体的な基準値等については吟味しな ければならない.

5. 結論

本研究の結論をまとめると,次のようになる. ・流体解析にVOF法とネスティング法を用いて,動的 津波解析手法の改良を試みた.

・VOF法は,2次元の水柱崩壊計算が実験結果とも定量的によく合っており,自由表面を扱う計算が正しく行えることが分かった.

・3次元の水柱崩壊計算を行い,格子解像度が計算に影響することが確認できた。

・ネスティングを行って,部分的に格子解像度を高めることで,全体の格子解像度を高めたものに近くなることが分かった.

・このようなネスティングとVOF法を用いることで, 動的津波解析において津波の発生~遡上までの計算を 行うことが可能になったと考えられる.

参考文献

- 1) 松本浩幸:断層運動に伴う動的地盤変位を考慮した高精 度津波解析,東京工業大学博士論文,2001
- 2) B. D. Nichols, C. W. Hirt and R. S. Hotchkiss, "SOLA-VOF: a Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries", Los Alamos Scientific Laboratory Report LA-8355, 1980.
- 3) J.C.Martin and W.J.Moyce : AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE COLLAPSE OF LIQUID COLUMNS ON A RIGID HORIZONTAL PLANE, Philosophical Transaction of the Royal Society of London A,1952.

(2003.6.24 受付)

TSUNAMI RUN-UP SIMULATION TAKING INTO ACOUNT DYNAMIC SEABED DISPLACEMENT DUE TO SEISMIC FAULTING USING VOF AND NESTING

Atsushi MURAKAMI, Tatsuo OHMACHI and Hiroshi TSUKIAMA

Recently authors have developed a numerical technique for tsunami simulation taking into account dynamic seabed displacement resulting from fracturing of a seismic fault, which is referred to as a tsunami dynamic simulation technique. We have introduced the VOF based method and nesting technique into the second step of the simulation. The VOF method can handle the complex free surface flow like tsunami runup, and the nesting technique enables us to conduct the simulation of a large area from the ocean to the seashore with efficiency. The present study focuses on the introduction of the VOF method and the nesting technique into the dynamic simulation, and verify the validity of the introduction.