仮想造波板による平面2次元解析と 3次元粒子法の連成型津波遡上解析

宮川 欣也¹・浅井 光輝²・Abdul MUHARI³・今村 文彦⁴

¹学生会員 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)
E-mail: y_miyagawa@doc.kyushu-u.ac.jp

²正会員 九州大学准教授 工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)
E-mail: asai@doc.kyushu-u.ac.jp

³非会員 Directorate General for Marine, Coasts and Small Islands
Ministry of Marine Affairs and Fisheries (Mina Bahari II Bld. Jl. Medan Merdeka Timur No.16 Jakarta)
E-mail: abdul.muhari@gmail.com

⁴正会員 東北大学災害科学国際研究所所長 (〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻468-1)
E-mail: imamura@irides.tohoku.ac.jp

広範囲の津波解析を効率的に行うため、差分法などによる平面2次元津波解析を用いた広範囲の津波被害予測に裏付けられた流入条件により、ナビエ・ストークス方程式に準じた3次元流体解析により局所的な津波遡上現象を予測する試みが行われている。筆者らも、2次元解析と3次元粒子法の連成解析を想定し、2次元解析結果、あるいは観測データなどを流入条件とした粒子法解析を可能とする仮想造波板を提案してきた。本論文では、実際に津波遡上解析に適用するため、流速が空間に分布する波にも対応可能なマトリックスアレイ状仮想造波板へと拡張し、提案手法の定量的な精度検証を行った。最後に、2011年の被災地域の実地形を用いた津波遡上解析へと展開し、被災報告との比較検討を通して妥当性の確認を行った。

Key Words : *particle method, SPH, multi-scale Tsunami simulation, virtual wave-making plate*

1. 緒言

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う津波により、沿岸地域の多くの土木構造物に甚大な被害が発生した。震災から数年が経過した現在、南海トラフ地震をはじめとする今後危惧される巨大地震に伴う津波に対して、沿岸地域の防災・減災が積極的に議論されており、構造物の津波被害を予測することのできる大規模津波シミュレーションの開発は重要である。

このような背景を受け、広範囲かつ高精度な津波解析を効率的に行うため、津波波源から沿岸域の計算は差分法などによる平面2次元津波解析、遡上後などの局所的な領域はナビエ・ストークス方程式に準じた3次元流体解析を用いて予測する、マルチスケールな津波解析が有効な手段としてこれまで提案されてきた¹⁾。本研究では、広域の2次元解析は浅水長波理論に基づいた2次元差分法、局所的な3次元津波解析は粒子法にて行うこととし、各解析を連成するための境界処理方法の改良を行う。なお、3次元解析手法として粒子法を採用することで、建物群

を含む複雑な地形モデルの作成が容易になるといったプリプロセスの簡略化に加え、建物周辺における碎波を含んだ激しい流れに伴う自由表面流れの変化を柔軟に再現できるといったソルバーの堅牢さなどの利点が期待できる。これまでに筆者らは、事前に評価した解析結果、あるいは観測データなどの情報から流入境界を設定し、3次元粒子法による閉領域の解析を可能とするマトリックスアレイ状の仮想造波板境界処理法を開発した³⁾。この手法は、事前解析により得られた流速と圧力を用いて境界領域に設置した仮想造波板粒子を制御することで、押し波引き波に関わらず事前解析の結果をスムーズに受け渡すことができるといった特徴がある。しかし前報での検証では、主流方向以外にほぼ流速を持たない2次元的な波による例題に特化されており、浅水長波の仮定を用いた2次元解析と3次元粒子法の連結等、汎用的なブーミング解析手法としての適用性の検討が不十分であった。

本報では、マトリックスアレイ状の仮想造波板の適用性を検証するために、まずは3次元の流速分布を有する複雑な波の受け渡しにも適応可能であることを示し、特

にズーム前後のエネルギー収支関係を比較することで提案手法の精度を確認する。最後に、同じマトリックスアレイ状仮想造波板を用い、2次元解析と3次元解析の連結方法を明示し、具体的に2011年に津波被害を受けた宮城県南三陸地方での再現解析を通して、提案手法の有用性について検討する。

2. 仮想造波板によるマルチスケール津波解析

一般的に津波の数値解析手法としては、浅水長波理論に基づく2次元津波解析と、ナビエ・ストークス式を直接解く3次元津波解析に大きく分けることができる。2次元津波解析の特徴としては、震源から海岸までの津波の伝播を予測する際、2次元化による計算コストの小ささから、比較的短時間に解析を行える点において有用であり、従来、津波浸水高や津波到達時間を予測する際に用いられている。しかしながらこの手法は、高さ方向の流速を無視できる領域では有効であるものの、陸上に遡上し、地形の起伏が激しい場合や、砕波などの複雑な波等の詳細な津波の浸水状況などを予測することは困難である。一方、3次元津波解析はこれらの2次元解析が有する問題を解決できるといった利点があるが、計算コストでの制約が大きく、震源からの津波伝播解析を行うことは現実的ではない。そこで本研究では、両者の利点を活かし、震源から湾口までの津波伝播解析(レベル0解析)を2次元差分法、湾口から内陸までの津波遡上解析(レベル1解析)と構造物周辺流れの解析(レベル2解析)を3次元粒子法で解析を行うこととする(図-1)。ここでは、2段階のズーム解析を述べたが、必要に応じ更なる多段階のズーム解析も可能である。

上記の粒子法による多段階ズーム解析を実践するには、筆者らが開発したマトリックスアレイ状の仮想造波板境界処理法が有効となるものと考えている。以下には、その具体的なズーム方法について説明する。

(1) 観測用セル(低レベル解析)・境界処理用セル(高レベル解析)の取り扱い

仮想造波板境界処理法では、低レベルでの解析結果が得られたものとし、その結果を参照することで高レベルのズーム解析を実施する。なお、ズーム前の低レベルの数値解析手法は粒子法に限らず、浅水長波理論に基づいた平面2次元解析やその他の数値解析法を用いることが可能である。ここでズーム前の低レベル解析において、流れ方向に対して、流速、および圧力を観測するセル(以降、観測用セルと略記)を20列配置するものとする。なお、セルの幅 L_0 はズーム後解析に用いる粒子間隔と同じものとした。この観測セル内に存在

津波伝播解析(2D解析) レベル0解析	津波遡上解析(3D解析) レベル1解析	構造物周辺流れ(3D解析) レベル2解析
解像度10m~100m	解像度1m~5m	解像度5cm~50cm
震源~湾口	湾口~内陸部	構造物周辺

図-1 マルチスケール津波解析の概要

図-2 境界処理用セルの概要

図-3 境界における流入・流出

する水の平均流速 $\hat{v}$ と平均圧力 $\hat{p}$ を記録する。

またズーム後の高レベルの粒子法解析における流入領域は、この観測用セルと同じ領域とし、流れ方向に20列の流入条件付与のためのセル(以降、境界処理用セルと略記)を配置する(図-2を参照)。本論文では、境界処理用セルの流入境界端部から5列は観測した流速を水粒子に与えるための仮想造波板とした。この仮想造波板では、各セルの中心に粒子が配置されており、一セル分だけ主流方向前後へと平行移動できるものとする。初期の境界処理用セルから高レベル解析側に飛び出した粒子はその後水粒子としてSPH法の計算により速度場を評価し、逆に流入側に戻った粒子は消去することで、流入と流出の両者をコントロールする(図-3を参照)。なおこの流入・流出の判定には、仮想造波板先頭に位置する流入・流出セルにより判定することにした(条件は次節にて詳細を説明)。また境界処理用セルの残りの15層

は、仮想造波板前面に遷移領域Ⅰを5列、さらにその先に遷移領域Ⅱを10列設置し、その後のSPH法による計算へと滑らかに情報(流速・圧力)を伝達するものとした。2種類の遷移領域の詳細は後述するが、これらの遷移領域は、異なる手法あるいは異なる解像度による流体解析をスムーズに連結するために、境界面付近の数値解を平滑化する役割がある。

(2) 仮想造波板における流入・流出の判定

粒子法はLagrange記述による数値解法であり、境界における、水の流入・流出を表現するためには、実際に水粒子を生成、吸収する必要がある。この判定は、仮想造波板先頭に位置する流入・流出セルにて行うものとした。ここで、津波などの水平方向の速度が卓越した流れを想定し、その主流方向を $\mathbf{n}$ とする。造波境界の法線方向がこの主流方向 $\mathbf{n}$ と同一に設定しているものとすれば、次式により水平方向の移動距離 L を与えることができる。

$$L = \sum \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dt \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{v}$ は各セルで観測された速度ベクトルを示す。

水粒子を生成、吸収する際は、この移動距離 L をパラメータとし判定を行った。移動距離 L が粒子間隔 L_0 を超えた場合、粒子を流入・流出セル上に生成し、この粒子をSPH解析へと放出し、移動距離が $-L_0$ を下回った場合、流入・流出セルを超える水粒子を消去することで、水の流入・流出を表現することとした(図-3を参照)。なお、ブーミング前解析において、自由表面よりも上に存在する観測用セル内の流速はゼロが記録されているため、自由表面よりも上のセルにおいて水粒子が生成されることはなく、このアルゴリズムにより事前解析において観測された波高が自動的に再現される。

(3) 境界処理用セル内粒子の速度および圧力評価

低レベル解析で観測された波を高レベル解析に受け渡すため、観測データから仮想造波板を形成するセルの中心に位置する粒子へ、圧力および速度をそのままマッピングして与えるものとする。その先に設定する2種類の遷移領域Ⅰ、Ⅱでは、速度と位置の更新について通常のSPH法による計算から与えるものとするが、圧力の評価方法については通常のSPH法による計算結果を採用せず、低レベルでの解析結果(あるいは観測結果)の影響を反映させるため、以下に示す手順にて圧力値を評価した。前述の通りこの遷移領域は、ブーミング後の高レベルの数値解析と事前に行った低レベルの数値解析間での流れの不整合を解消するために設置している。遷移領域Ⅰの圧力はブーミング前の低レベルの解析において観測した、セル内での平均圧力 $\hat{p}$ をそのままマッピングする。

図-4 仮想造波板のイメージ

$$P^I = \hat{p} \quad (2)$$

次に遷移領域Ⅱでの圧力は、低レベル解析において観測された圧力と高レベル解析の数値解析から算出される圧力 $\langle P \rangle$ を用い、次式に示す線形補間により与えることにした。

$$P^{\square} = \beta \hat{p} + (1 - \beta) \langle P \rangle \quad (3)$$

$$\beta = (l_{II} - l) / l_{II} \quad (4)$$

ここで l_{II} は遷移領域Ⅱの全長、 l は遷移領域Ⅰまでの距離であり、 β ($0 \leq \beta \leq 1$)はセル上の圧力と実際の解析より求められる圧力を緩和するためのパラメータである。

(4) マトリックスアレイ状仮想造波板

仮想造波板境界処理法では、仮想造波板を構成する粒子は、元の位置から主流方向 $\mathbf{n}$ に $-L_0$ から L_0 の間を可動域とし、その移動距離は式(1)により与えられるものとしている。ここで、一般的に流速は深さ方向また平面内においても流速が分布する。このような状況を踏まえ、水粒子の速度分布に応じて、この仮想造波板を構成する各粒子は独立に移動できることにしている。たとえば、水平、および鉛直方向の速度分布を考慮する場合にはそれぞれ各層、各列が一様に移動し、水平および鉛直の両方向ともに複雑に流速が分布する場合にはマトリックスアレイ状に自由に移動することができる(図-4)。

前報では、上記のマトリックスアレイ状の仮想造波板のコンセプト自体は既に提案していたが、適用例としては深さに応じて仮想造波板を制御する深さ方向変動型の仮想造波板による検証に留まっていた。そこで本研究では、同手法の適用可能範囲の広さを検証するために、まずは深さ方向のみならず水平方向にも流速が分布する3次元的な波についても適用可能であることを示した後に、最後には逆に2次元解析による情報のみを使い、3次元解析へ連結する場合への適用性を示す。

なお、前報において検証した波は、主流方向以外にほぼ流速の無い2次元的な波であったため、主流方向のみの流速を考慮すれば十分であった。一方、水平方向にも流速を持つ3次元的な波へ適用するためには、全方向の流速すべての情報を考慮に入れる必要がある。全方向の流速に合わせて仮想造波板粒子(あるいはセル)を移動

すると、解析時間の経過に伴い仮想造波板粒子の配列が乱れてしまい、長時間にわたり流入あるいは流出境界を与えることは困難となる。そこで本研究では、主流方向（たとえば、主な津波進行方向）に対して垂直に連成境界を設置し、境界領域の水粒子には全方向の速度を付与するものの、水粒子を生成するまでの仮想造波板粒子の移動は主流方向のみに制限することにした。主流方向以外の変位を制限すれば、仮想造波板は従来通り配列を維持したまま平行移動し、式(1)を用いて容易に流入・流出判定が実施できる。

ここで、観測波高および流速を用いた粒子法用の仮想造波板は、室谷ら⁴⁾、および諏訪ら⁵⁾によって提案されている。しかし、両者とも解析手法としては微圧縮性を仮定した陽的SPH法に限定しており、また圧力のマッピング方法については言及されていない。本稿では、非圧縮性SPH法（以下、ISPH法と略記）を粒子法として採用し、波高・流速のみを入力情報とする手法を従来法、遷移領域を用いて圧力のマッピングを行う方法を提案法と呼ぶことにする。

3. 3次元流れのズーム解析方法としての適用性検討

本研究にて提案する遷移領域を含むマトリックスアレイ状の仮想造波板は、最終的には浅水長波理論に基づく2次元解析と3次元粒子法の連成方法として発展させる。なお、前報では平面2次元問題として設定できる条件の波に対して、3次元粒子法と提案する仮想造波板で連結したズーム解析を実施し、浅水長波の仮定が成立する・しない場合の両者に対して、提案手法がスムーズに波を伝達できることを確認した。ここでは、同手法の精度・有用性を示すため、3次元性を持つ波に対し、3次元粒子法間での連結方法としての精度・適用性を検証する。なお、図-1に示すマルチスケール津波解析の概念図においては、レベル1からレベル2解析を想定した例題であり、本来であれば、両者の粒子間隔を一致させる必要はない。ただしここでは、連結のない単一解像度の数値解析解を参照解とし、同手法により連結した解析結果（一部領域を解きなおした数値解析結果）が参照解とどの程度一致しているかにより、同手法の精度を確認する方針とした。

(1) 検証例題の問題設定

はじめに、一般的なピストン型造波板を用いて生成した波の斜面遡上問題を事前解析として取り上げ、提案手法による粒子法解析間の連成を実施した。図-5に解析モデルの概要を示す。ここでは、あらかじめ水槽に水深

図-5 解析モデル

図-6 事前解析の概略図

1mの水を張り、解析領域の左端部に設置した奥行き1mのピストン型造波板5枚を、それぞれ位相差 τ を持たせて x 方向速度 $v_x = 1.57 \sin \pi(t + \tau)$ [m/s]で継続的に変位させることで、3次元性を有した津波の押し波引き波を簡易的に生成する（図-6）。ここでピストン型造波板の位相差 τ は、モデル奥からそれぞれ① $\tau=0$ 、② $\tau=2/5$ 、③ $\tau=4/5$ 、④ $\tau=6/5$ 、⑤ $\tau=8/5$ を与えた。また事前解析において、 $x=4.5\text{m}$ から20層の観測用セル（セル幅は粒子間隔と同様）を配置し、各セル内における流速、圧力を各ステップ記録する。続いて、事前解析より求められた観測値を用いて提案手法による流入・流出境界処理を行い、事前解析の波を再現することを試みる（提案手法によるズーム解析）。加えて、従来手法と提案手法の連成精度を比較するため、圧力のマッピングを行わない従来法によるズーム解析も同様に実施する。ここで使用する従来法とは、仮想造波板の挙動、流入・流出判定においては提案手法と同様の手法を用い、流入・流出セル、遷移領域における圧力の境界処理を除いたものを指し示す。なお、3解析（事前解析、提案手法によるズーム解析、従来手法によるズーム解析）すべてにおいて、粒子間隔は0.1m、時間は0.001s、壁面の境界条件はすべり条件とし、同じ粒子間隔を用いた粒子法解析間の片方向連成解析を実施する。

図-7 解析結果 (コンター主流方向速度)

(2) 解析結果とその考察

各解析の任意時間における流速分布の比較を図-7に示す。提案手法、従来手法共に、事前解析でピストン型造波板を用いて生成した波の流速分布を、おおむね再現していることが分かる。しかしながら、従来法によるズーム解析において境界領域に注目すると(図-8)、事前解析から得られた仮想造波板上の流速と、解析領域上の流速の間に急激な変化が生じていることが分かる。一方で提案手法によるズーム解析では境界領域では、遷移領域を設置しているため、圧力・速度分布ともに滑らかに連結させていることを確認した。

次に、より定量的な比較をするため、図-5の赤枠で囲まれた領域の全水頭(全エネルギー)、水粒子数(流量)の時刻履歴を比較検証した。それぞれの比較結果を図-9、図-10に示す。ここで全水頭は以下の式より算出するものとする。

$$\text{全水頭} = \sum \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + h \right) \quad (5)$$

図-8 境界付近の流速分布 (コンター主流方向速度)

同図より、圧力のマッピングを行わない従来手法の全水頭は、単調に増加する $T=4.0s$ 付近までは、事前解析とほぼ同等の値を示すものの、全水頭の減少が始まると

図-9 全水頭の時刻履歴

図-10 水粒子数の時刻履歴

解析時間の経過につれて、事前解析との誤差が大きくなっていることが分かる。これは、図-8に示したように、従来法では圧力をマッピングしていないために、特に逆流が始まり水粒子の流出が生じる際に滑らかな流出が行われなかったことが原因として考えられる。このため、流出できなかった解析領域内の水粒子が蓄積し、解析終了 ($T=15$ s) 時の全水頭において+11.8%、水粒子数において+6.7%の誤差が表れた。これに対し提案手法によるズーム解析では、最大 ($T=5.2$ s) でも全水頭-1.6%、水粒子数-0.8%の誤差に収まっており、事前解析で生成された波のエネルギーを正確に受け渡せていることが確認できた。以上の結果より、長時間の解析において、特に境界部より水の流入だけでなく流出が生じる場合には、圧力のマッピングを実施しない従来手法では誤差が蓄積する傾向があり、これに対して遷移領域を用いて圧力をスムーズに伝達させる提案手法は引き波まで高精度に再現できていることを確認した。

本研究では、第1波、第2波と継続して来襲する津波現象を対象としているため、押し波・引き波が繰り返されることから、圧力のマッピングを用いた提案手法が従来法に対しても優位に作用することが確認できた。これは、次に示す2次元津波解析と3次元解析の連結の場合にも有益な知見となるものと思われる。

4. 2次元津波解析と粒子法による3次元津波遡上解析の連成解析への適用

最後に、本研究の主題であるレベル0解析 (2次元浅水長波の仮定を用いた2次元解析) とレベル1解析 (粒子法による3次元津波遡上解析) の連成方法として提案する境界処理法を適用する。なお、前節の3次元粒子法間での連成法と異なるのは、事前解析が提供する情報量のみである。具体的には、2次元解析から得られる情報は、断面平均流速の2成分と波高のみである。このため、深さ方向には同一流速を仮定することになるため、仮想造波板は深さ方向には同一の動きを強制することにした。

また、2次元解析からは圧力分布は直接得られず、前提条件として静水圧を仮定しているため、波高を基にした静水圧分布を仮定し、これをそのまま造波板を構成する粒子の圧力として設定した。ほかの取り扱い (例えば遷移領域Iでは、観測圧力 (ここでは静水圧) を入力し、遷移領域IIでは線形補間を実施するなど) は先の例題と同一であり、すべて2節にて説明した手順となる。

(1) 2次元津波伝播解析 (レベル0解析)

本研究では宮城県南三陸町歌津地区を3次元津波遡上解析の対象地とし、2次元解析の対象領域は津波波源から歌津地区に至る領域を選択した。断層モデルには東北大学モデルVer1.0⁹を用い東北地方太平洋沖地震による津波を再現した。なお、この断層モデルを用いることにより、潮位記録だけでなく浸水高や沈下量においても十分に精度が確保できていることを確認している。3次元解析の流入条件に利用するため、流入領域における波高と水平方向流速を3次元解析の粒子間隔に合わせ5mごとに出力した。

(2) 3次元津波遡上解析 (レベル1解析)

図-11に3次元津波遡上解析の解析領域 (2.4km×2.7km) と流入領域の位置関係を示す。地形モデルの作成には内閣府の5mメッシュの標高データを用い、解析領域の周囲に壁を設け、流入領域以外からの津波の流入、流出が生じない粒子モデルを作成した。入力情報として、前節でおこなった2次元解析により得られた水平方向の断面平均流速、波高を用いる。前述の通り、本解析では流入領域において深さ方向の流速分布はなく、また圧力は静水圧分布が成り立つものと仮定しているため、速度については断面平均流速を深さ方向一定に、圧力については流入領域の波高より毎ステップ算出した静水圧を付与した。また、長時間の計算を必要とする3次元解析を効率的に行うため、流入領域において大きな流速の変化が見られた2次元解析開始から54分後以降の速度、圧力を流入領域へ付与することにした (図-12)。なお、解

図-11 歌津地区解析領域と流入境界

図-12 流入領域における2次元解析結果と
全体時間における3次元解析時間の対応

図-13 津波遡上解析結果

析対象地域の近隣（鮎川）で津波発生日に観測された潮位が - 57cmから44cmと報告されている⁷⁾。今回の解析では、5m間隔の粒子モデルを使用しており、この程度の潮位変動は表現できないため、解析開始時（T=0s）の湾内水位を海拔0mに設定した。解析条件の詳細は表-1に示す。

図-13に各時刻における津波遡上解析結果を示す。なお、コンターは主流（S-N）方向の流速を示しており、流入領域において押し波であれば赤色、引き波では青色を示す。同図より解析開始時から引き波が生じ、その後押し波の到達により浸水域が広がり、最終的に引き波の

表-1 解析条件

粒子間隔	総粒子数	時間増分	実時間	解析時間
5m	約386万	0.005s	750s	300時間

発生により浸水域が減少していることが確認された。この傾向は、3次元解析時間と対応する時間に、流入領域において観測された2次元解析結果（図-12の中央）と同様のものであり、提案手法を用いることによる継続的な引き波、押し波の再現が可能であることを確認した。今回の解析例では、レベル1解析で表現した引き波と事前に解析したレベル0解析の引き波がほぼ同時刻に始まり、

仮想造波板の位置での両者の解析結果に矛盾があまり生じていなかった。しかしながら、問題設定によっては、高レベル解析が低レベル解析と一致しない場合も起こりうるため、こうした場合には高レベル解析の情報も低レベル解析の境界条件として反映できる双方向の連成解析が必要となるものと思われる。

次に、図-14に歌津地区における震災時の浸水範囲と解析結果の比較を示す。図より、主流方向である図上向き(S-N方向)だけでなく、図左向き(E-W方向)への浸水が再現されていることが分かる。一方で、実際の浸水域と比較し、解析では全体的に浸水域が過小に評価されていることがわかる。これは解析に用いた粒子の解像度が5mと比較的荒く、浸水域の広がり表現できていないこと、また計算時間の制約から今回の解析では第2波の初期段階で解析が終了しており、その後の浸水域の変動を考慮できていないことが大きな原因として考えられる。また別の要因として、粒子モデル作成時における地形モデル精度の問題が上げられる。図中の黄線は歌津地区を走る鉄道の線路を示している。線路上の地形は盛土がなされ、周囲と比較して高台となっているものの、歩行者や車両用のトンネルが存在しているために、黄線を越える領域への浸水が報告されている。しかしながら、解析モデルではトンネル等のモデル化を行っておらず、黄線中央に示す高台により水がせき止められる状態が発生した。このことから、より精緻な津波被害予測のためには、地形や構造物をより詳細にモデル化し、それを可能とする解像度を選択する必要があると考えられる。

最後に、図-14内のA, B, C各点上の浸水深の時刻歴変化と実際の浸水深の比較を図-15に示す。解像度の粗さのため1~2m程度の誤差はあるものの、A点、C点と比較し、B点がより高い水深を示すといった傾向を再現していることが分かる。今後解像度を上げることにより、浸水域だけでなく、浸水深についても詳細な予測が可能になると考えられる。

5. 結言

マルチスケール津波解析に向けた各解析間の連成手法の検討として、3次元の流速分布を有する複雑な波にも対応可能なマトリックスアレイ状仮想造波板境界処理法へと手法の改良を行った。検証例題として実施した斜面遡上問題において、ブーミング前後のエネルギー収支関係を比較した結果、提案手法を用いることでブーミング前解析の波が精度よく受け渡されていることを確認した。今後は、レベル1解析からレベル2解析への連成も視野に入れ、両レベル間での空間解像度(粒子間隔)の差がどこまで許容でき、仮想造波境界と流れの方向の関係がど

図-14 津波被害報告⁸⁾と解析結果(T=600s)の比較

図-15 観測された浸水深と解析値の比較

の程度まで対応可能なかを明確にしていく必要がある。また現時点では片方向の連成となっているため、場合によっては双方向連成へと発展することも視野に入れている。

最後に、提案手法を用いて2次元解析と3次元解析の連成を行った。解析対象としては、東日本大震災の被災地域の一つである宮城県南三陸町歌津地区を取り上げた。流入境界に付与したレベル0解析と対応して、押し波だけでなく引き波までが再現されていることを確認した。今後、さらに高解像度かつ長時間の解析を行い、第1波だけでなく第2波も考慮することで、浸水域をより詳細に評価できるものと考えている。また2次元解析と3次元解析を連成する境界位置を何処に設定すべきか(浅水長

波の仮定による2次元解析の限界を何処に設定すべきかを明確にし、無理のない境界領域の設定方法を確立すべきである。

謝辞

本研究はJSPS科研費15K12484, 26282106の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 高瀬慎介, 加藤準治, 森口周二, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 野島和也, 桜庭雅明, 樫山和男: 安定化有限要素法を用いた 2D-3D ハイブリット手法による津波解析, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.70, No.2, I_307-I_315, 2014.
- 2) 本橋英樹, 野中哲也, 中村真貴, 原田隆典, 坂本佳子: 広域 3 次元シミュレーションにおける造波境界の設定方法, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 70, No.2, I_181-I_185, 2014.
- 3) 宮川欣也, 浅井光輝: 粒子法による多段階ブーミング津波解析に向けたマトリックスアレイ状の仮想造波板, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.71, No.2, I_267-I_277, 2015.
- 4) 室谷浩平, 越塚誠一, 金山寛, 安重晃, 藤沢智光, 玉井祐, 柴田和也, 三目直登, 吉村忍: 津波波源から浅水波方程式を用いて生成した入力境界条件による MPS 法市街地遡上解析, 日本機械学会 第 26 回計算力学講演会, 2013.
- 5) 諏訪多聞, 今村文彦, 菅原大助: 非線形長波モデルと流体粒子法による津波シミュレータの開発, 土木学会論文集 B2(海岸工学) Vol.70, No.2, I_16-I_20, 2014.
- 6) Imamura, F., S. Koshimura, T. Oie, Y. Mabuchi and Y. Murashima: Tsunami simulation for the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earth-quake (Tohoku University model ver. 1.0), p.12, 2011.
- 7) 気象庁: 潮位表鮎川 <http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/tide/suisan/suisan.php> (2016 年 1 月 22 日閲覧).
- 8) 原口強, 岩松暉: 改訂保存版東日本大震災津波詳細地図, 古今書院, 2013.

(2015. 11. 6 受付, 2016. 1. 29 修正, 2016. 2. 20 受理)

TSUNAMI RUN-UP SIMULATION INTEGRATING THE PLANE 2D SIMULATION AND THE 3D PARTICLE METHOD BY USING VIRTUAL WAVE-MAKING PLATE

Yoshiya MIYAGAWA, Mitsuteru ASAI, Abdul MUHARI and Fumihiko IMAMURA

In order to perform the large tsunami simulation effectively, multi-scale tsunami simulation having both advantages of two-dimensional tsunami analysis based on the shallow water equation and three-dimensional tsunami analysis is being developed. The authors have selected the three-dimensional particle method as three-dimensional analysis method and proposed a new boundary treatment which can manipulate measured values in the pre-analysis by two-dimensional tsunami analysis. In this study, a matrix array shaped virtual wave-making plate is enhanced as an improved boundary treatment method for multi-scale tsunami simulation within the framework of the particle method, and then the accuracy and adequacy has been investigated through a three-dimensional numerical example. Finally, a three-dimensional tsunami run-up simulation, in which the inflow condition is given by a two-dimensional shallow water solution, is conducted at Minami-Sanriku-cho in the 2011 Tohoku earthquake tsunami by using proposed method in order to validate the accuracy.