

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

2011年の東北地方での津波被害以降、防災・減災の検討における一手段として、津波被害予測シミュレーションの開発が期待されている。そこで、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各種3次元流体解析による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、平面2次元津波解析結果、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、マルチスケール津波解析が有効な手段として提案されてきた。これまでに筆者らは、3次元津波解析を粒子法にて行うこととし、平面2次元津波解析結果、あるいは観測データなどの情報から、3次

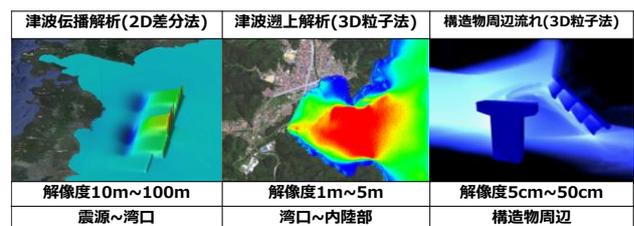


図-1 マルチスケール津波解析の概要

元粒子法津波解析を実施する際に有効となる仮想造波板境界処理法を開発した。この手法は、事前解析により得られた波高と流速、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。本報では、実際の津波遡上解析に適用するために、3次元の流速分布を有する複雑な波の受け渡しにも可能なマトリクスアレイ状仮想造波板へと機能の拡張を行い、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有用性を確認する。最後に、改良したマトリクスアレイ状仮想造波板を用い津波遡上解析を実際の被災地域において実施し、被災報告との比較を行う。

2. 解析手法

(1) マルチスケール津波解析の概要

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）。各解析手法の詳細は省略するが、前者はGPS波浪計との比較により精度が確認されたもの、後者は小型模型実験との比較により、津波外力評価の精度検証を行ったもの⁹⁾を用いる。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。

(2) マトリクスアレイ状仮想造波板

マルチスケール津波解析を実現するための各解析間での連成手法として、仮想造波板境界処理法をこれまでに開発した。仮想造波板境界処理法の入力情報は、ズーム前の解析より計測した津波の波高、流速、圧力を用いることとし、水の流入・流出に関しては水粒子の生成・吸収、波高は水粒子生成時の粒子配置により表現する（図-2）。同時に、ズーム前解析の圧力を参照し、境界周辺へのマッピングを行うことでズーム前後間での流れの不整合を解消し、スムーズに造波することができるという特徴を持つ。

前報では、深さ方向に流速分布を持つ波を再現する際に、深さに応じて仮想造波板の挙動を制御する、深さ方向変動型の仮想造波板境界処理法の検証にとどまってい

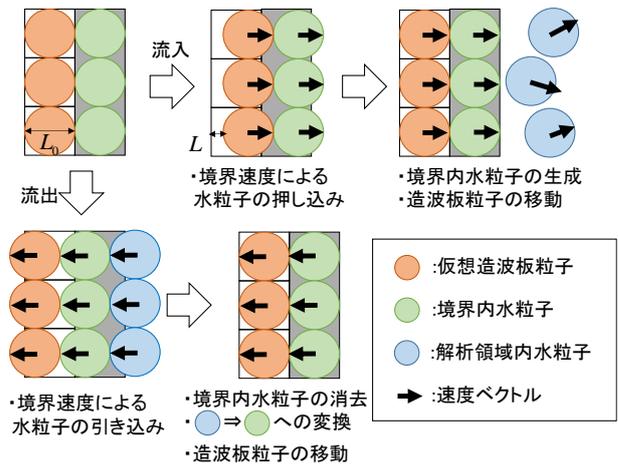


図-2 流入・流出時の境界付近粒子の取り扱い

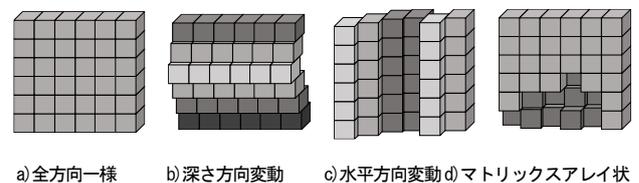


図-3 仮想造波板のイメージ

た。そこで本研究では、津波遡上解析のような、深さ方向のみならず水平方向の流速分布を流入条件に必要とする場合にも対応可能な、マトリクスアレイ状の仮想造波板境界処理法へと拡張を行う（図-3）。

前報において検証した主流方向以外にほぼ流速の無い2次元的な波であれば、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次元的な波を再現するためには、全方向の流速すべてを考慮する必要があり、全方向の流速に合わせて仮想造波板粒子を移動させれば、解析時間の経過に伴い仮想造波板粒子の配列が乱れ、継続した連成解析は不可能である。そこで本研究では、主流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、主流方向以外の変位を制限することで、この問題に対処する。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、以下の判定式を用いて容易に流入・流出判定が可能となる。

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

ここで、 L は仮想造波板粒子の移動距離、 \mathbf{v} 、 \mathbf{n} はそれぞれ流速、主流方向ベクトルを示し、 L が粒子間隔 L_0 を上回った場合粒子を生成、 $-L_0$ を下回った場合は粒子を消去することで水の流入・流出が表現される。

以上、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²⁾、および諏訪ら³⁾にも提案されているが、事前検証の結果、圧力値についても情報伝達する必要があることを確認している。本稿では、波高・流速のみを

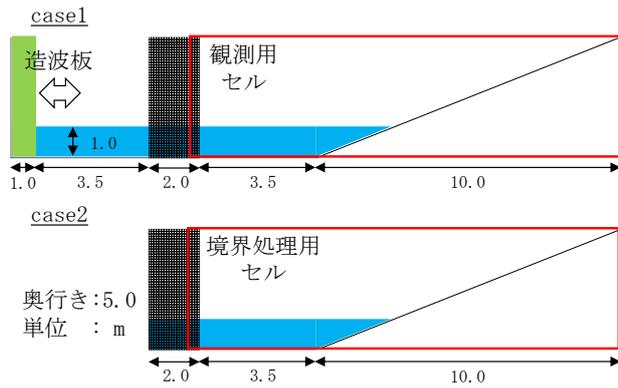


図4 解析モデル

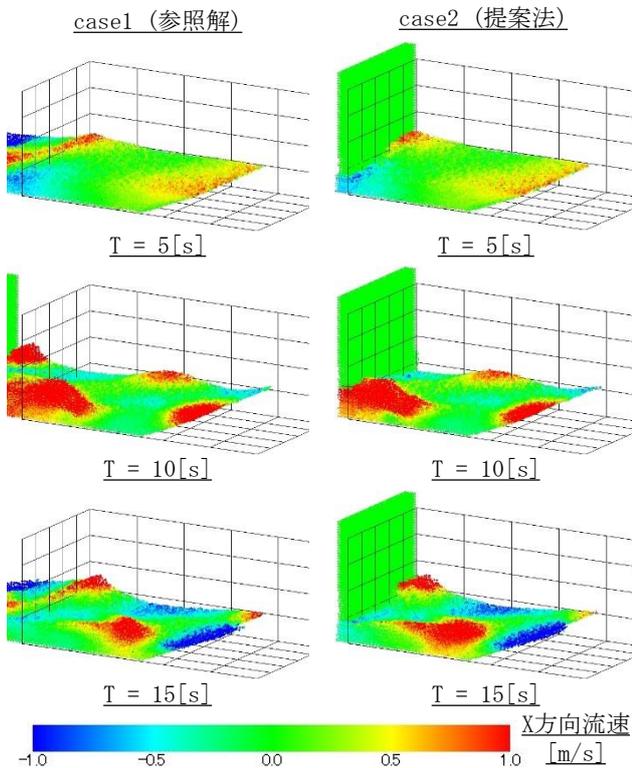


図5 解析結果 (コンター圧力)

入力情報とする手法を従来法として参照し、ズーム前解析の圧力のマッピングを行う手法を提案法と呼ぶことにする。

3. 検証例題

提案手法の妥当性の確認を行うため、従来の物理的なピストン型造波板を用いた解析 (case1) との比較を実施した。図4に解析モデルを示す。ここで、case1の解析領域の左端部に、ピストン型造波板を5枚設置し、位相差を持たせてx方向速度で強制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再現した。また、x=4.5mより20層観測用のセル(セル幅は粒子

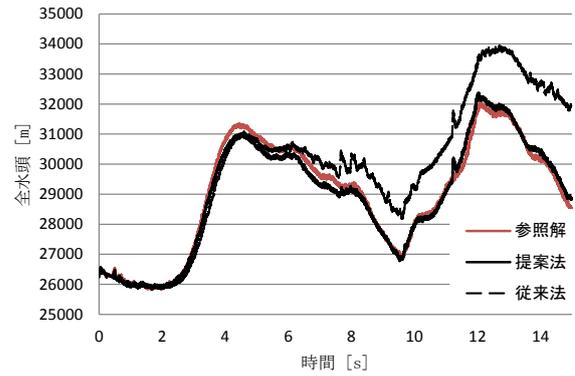


図6 全水頭の時刻履歴

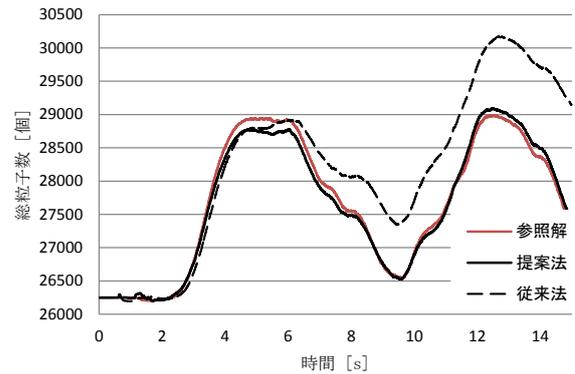


図7 総粒子数の時刻履歴

間隔と同様)を配置し、観測点における波高、流速、圧力をステップごとに記録する。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、case1の波を再現することを試みる (case2)。ここでは、case1, case2共に粒子間隔を0.1mとし、同スケール間の片方向連成解析を行う。各ケースの任意時間における流速分布の比較 (図-5) より、case2はcase1の波形、流速分布をおおむね再現していることが分かる。また、図4の赤枠で囲まれた領域の全水頭、総粒子数の時刻履歴を比較したものをそれぞれ図-6、図-7に示す。ここで全水頭は以下の式より算出した。

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

同図より、全水頭において最大でも約2.1%の誤差に収まっており、case1で生成された波のエネルギーを正確にcase2へと受け渡せていることが確認できた。この結果より、3次元の流速分布を有する波を連成する際の、マトリクスアレイ状仮想造波板の有用性を示した。加えて、圧力のマッピングを行わない従来法は、全水頭が単調増加するT=5[s]までは提案法とほぼ同等の全水頭を示しているものの、参照解において全水頭の減少が始まると、解析時間の経過につれて参照解との誤差が大きくなっていることが分かる。これは、圧力をマッピングし

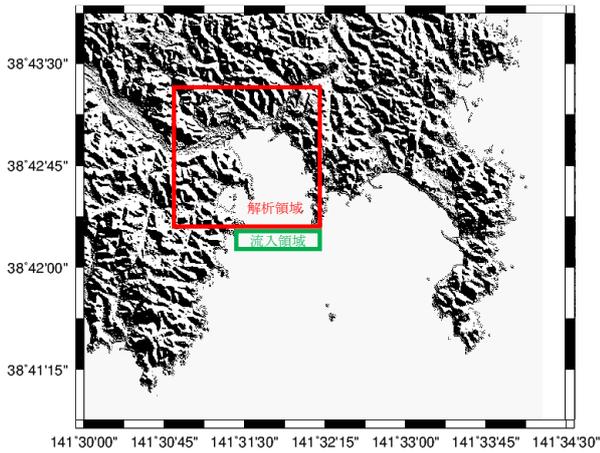


図-8 歌津地区解析領域と流入境界

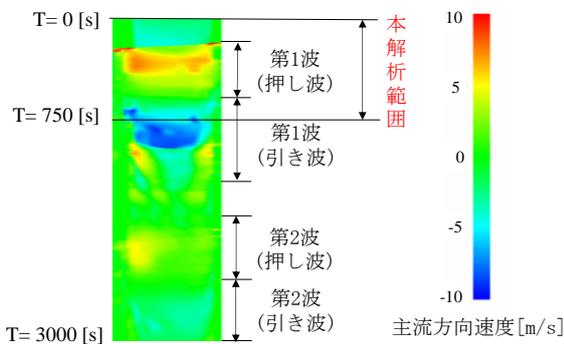


図-9 流入領域における2次元解析結果と全体時間における本解析時間の対応

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	0.005sec	750sec	300時間

ていないために、スムーズな流出を再現することができず、流出できなかった解析領域内の水粒子が蓄積していたものと考えられる。このことから、従来法と比較しても、提案手法の優位性が示された。

4. 2次元津波解析を流入条件とする粒子法による3次元津波遡上解析

ここでは、提案手法を用いて宮城県南三陸町歌津地区における津波遡上解析行った事例を報告する。図-8に解析領域と流入領域の位置関係を示す。レベル0解析として、東日本大震災の津波を再現した2次元差分法に基づく津波伝播解析を実施し、流入領域における波高、水平方向流速を5m間隔に出力し、流入領域において大きな流速の変化が見られた3250秒時以降を、津波遡上解析の入力情報として用いた(図-9)。また、浅水長波理論より流入領域における圧力分布は静水圧分布が成り立つと

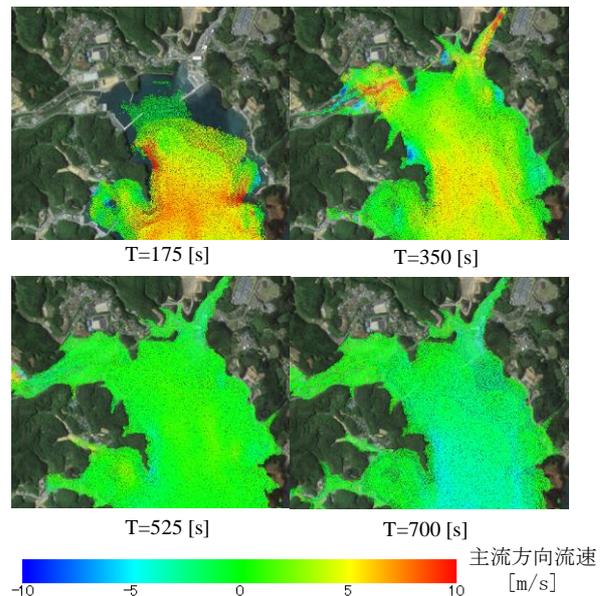


図-10 津波遡上解析結果



図-11 津波被害報告⁴⁾と解析結果の比較

仮定し、流入領域の圧力は、レベル0解析における波高より毎ステップ算出し付与することとした。また、解析領域の周囲には壁を設け、流入領域以外からの解析領域への流入、流出が無いようにしている。解析条件の詳細は表-1に示す。

図-10に各時刻における津波遡上解析結果を示す。なお、コンターは主流方向(図上向き)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、引き波では青色示す。図より、 $T=175[s]$ から $T=350[s]$ にかけて押し波により浸水域が広がり、 $T=700[s]$ においては引き波の発生により浸水域が減少していることが確認された。

次に、図-11に歌津地区における実際の浸水範囲と本解析結果を比較したものを示す。実際の被災状況と比較し、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、本解析の解像度が5mと比較的荒く、浸水域の広がりを表現できていないこと、また第1波の押し波引き波までの解析で終了しており、第2波を再現できていないことが原因として考えられる。一方で、主流方向だけでなく、水平方向の流速も付与していることにより、図左向きへの浸水域の広がりが再現できていることも確認し、提案手法の有効性が確認された。

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おこなった。検証例題として実施した斜面遡上問題において、ズ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ズーミング前解析の波が精度よく受け渡されていることが確認され、提案手法の有効性が示された。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、解析時間の経過に伴う境界付近の差を解消できる双方向連成への発展が必要であると思われる。

最後に提案手法を流入条件に用い、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における津波遡上解析を実施した。流入境界に付与したレベル0解析の情報に応じ、押し波引き波が再現されていることが確認された。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られる。

参考文献

- 1) 田邊将一、浅井光輝、中尾尚史、伊津野和行：3次元粒子法による橋桁に作用する津波外力評価とその精度検証、構造工学論文集、60A, 293-302, 2014.
- 2) 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 (CMD2013)
- 3) 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) 70(2),I,16-I_20,2014
- 4) 原口強、岩松暉：改定保存版東日本大震災津波詳細地図、2013,10

(?受付)