2D-3D ハイブリッド津波解析手法の精度 及び大規模化に関する検討

凌国明¹・松本純一²・檜山和男³

¹学生会員 修(工) 中央大学大学院 理工学研究科都市環境学専攻(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: lingguoming@civil.chuo-u.ac.jp

²正会員 博(工) 産業技術総合研究所 機能材料コンピュータシミュレーションデザイン研究センター
(〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第2) E-mail: matsumoto-junichi@aist.go.jp

³正会員 工博 中央大学教授 理工学部都市環境学科(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: kaz@civil.chuo-u.ac.jp

本論文は、著者らが提案した任意領域に基づくオーバーラッピング手法を用いた2次元・3次元ハイブリッド津波解析手法の精度および大規模化について検討を行ったものである。精度に関する検討としては、界面の捕捉手法に Phase-Field Model の導入を行い、大規模化への対応としては領域分割を用いた MPI に基づく並列計算手法の導入を行った。本手法の妥当性と有効性を検討するために、実験結果との比較検討を行うとともに、実スケールの大規模計算を実施した。

Key Words: 2D-3D parallel computing, free surface flow, phase-field model, Allen-Cahn equation, mass conservation

1. はじめに

東日本大震災を契機として、津波に対する被害予測には従来の浸水域の予測のみでなく構造物の被害予測も含めたものが求められるようになってきている。著者らは、既報¹⁾において、広領域の津波解析を合理的に行う手法として、波源域を含む沖合から海岸近くに対しては2次元浅水長波方程式を用い、対象とする構造物を含む沿岸地域に対しては3次元 Navier-Stokes 方程式を用いるハイブリッド津波解析手法を提案した。この手法は、任意格子に基づくため、複雑な地形や構造物形状への適合性に優れるとともに、3次元解析領域の設定が2次元解析領域とは独立に行えるため適用性が高い特徴がある。しかし、3次元解析領域に対する界面捕捉手法としては、VOF 法²⁾が用いられており、気液の界面位置を高精度に捕捉するには工夫が必要であった。また、並列計算手法の実装は3次元解析領域のみで、2D-3D ハイブリッド手法における並列化がなされていなかったため、計算効率および大規模化への対応に課題があった。

そこで、本論文では、3次元領域の自由表面流れ解析をより高精度にかつ高速に計算を行うことを目的として新たに、Allen-Cahn 方程式^{3),4)}を用いた Phase-Field Model (PFM) の導入を行うとともに、MPI に基づく 2D-3D ハイブリッド並列計算手法を提案する。なお、離散化手法としては、非構造格子に基づく安定化有限要素

法^{5),6),7)}を用いた。

次章以降では、2D-3D ハイブリッド解析手法の概要、界面捕捉手法の検討、MPI に基づく並列化手法について述べる。本手法の有効性を検討するため、角柱に作用する流体力問題、孤立波遡上問題を取り上げ、既報に用いた VOF 法¹⁾による結果および実験結果との比較を行う。また、大規模計算への適用事例として、2011 年の東北地方太平洋沖地震により発生した津波のシミュレーションを行う。

2. 2D-3D ハイブリッド解析手法

本節では、本手法で用いる 2D-3D ハイブリッド解析手法の概要、支配方程式、離散化手法について述べる。

(1) 2D-3D ハイブリッド解析手法の概要

本研究は、図-1 に示す任意格子に基づくオーバーラッピング手法¹⁾を用いる。図のように解析対象に対して、2次元解析領域と3次元解析領域の一部がお互いに重なっているオーバーラップ領域を設置する。なお、津波の影響が3次元解析領域に及ぶまでは、全体を浅水長波方程式に基づく2次元解析のみで行うため、2次元メッシュは陸域を含む解析領域全体に対して用意する。そのため、3次元解析領域の設定とメッシュ分割は2次元解析領域のそれらとは独立に自由に設定可能であり、適用性が高い特徴をもっている。2次元解析領域と

3次元解析領域の接続は、図-2に示す接続境界上で、水位の適合条件と連続条件（流量の保存）の考慮により行う。流量の保存については、図-2に示すように2次元解析により計算された流速と水深を3次元解析領域の3D接続境界条件とし、同様に、3次元解析により得られた流速とVOF関数を2次元解析領域の2D接続境界条件として相互に与えている。なお、既往研究においてオーバーラップ領域に含まれる要素数については4要素程度とすることで滑らかな接続が可能となる知見が得られている¹⁾。

図-3に本ハイブリッド手法のフローチャートを示す。

(2) 支配方程式

波源域を含む沖合から海岸近くまでの津波伝播解析に用いる支配方程式としては、浅水長波近似を用いた2次元浅水長波方程式を採用する。浅水長波方程式(1)と連続式(2)を以下に示す。

$$\frac{\partial(U_i H)}{\partial t} + \frac{\partial(U_j U_i H)}{\partial x_j} + \nu_e \frac{\partial^2(U_i H)}{\partial x_j^2} + \frac{g n^2 U_i \sqrt{U_j U_j}}{H^{\frac{1}{3}}} + g H \frac{\partial(H+z)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(U_i H)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

ここに、 U_i は x_i 方向の断面平均流速、 H は全水深、 g は重力加速度、 ν_e は渦動粘性係数、 n はマンニングの粗度係数、 z は地盤高である。

一方、3次元領域に対しては、Navier-Stokes 方程式(3)と連続式(4)を用いる。

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - f_i \right) + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

ここに、 u_i は流速、 p は圧力、 f_i は物体力、 ρ は密度、 μ は粘性係数である。

(3) 離散化手法

支配方程式(1)、(2)に対してはSUPG法に基づく安定化有限要素法^{5),7)}を、式(3)、(4)に対してはSUPG/PSPG法に基づく安定化有限要素法^{6),11)}を適用する。そして、2次元解析領域に対しては三角形1次要素、3次元解析領域に対しては四面体1次要素を用いて、空間方向の離散化を行う。一方、時間方向の離散化にはCrank-Nicolson法に基づく差分近似を適用する。また、連立一次方程式の解法にはElement-By-Element処理によるBi-CGSTAB法を適用する。離散化及びアルゴリズムの詳細は、文献¹⁾を参照されたい。

図-1 オーバーラッピング手法

図-2 接続境界における流量保存性条件

3. 界面捕捉手法

3次元解析領域における界面の捕捉手法として、本論文では既報に用いたVOF法¹⁾と今回新たに用いるPFMの比較を行う。

(1) 支配方程式

支配方程式としては、VOF法は移流方程式(5)、PFMはAllen-Cahn方程式(6)^{3),4)}を用いている。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_j \frac{\partial \phi}{\partial x_j} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_j \frac{\partial \phi}{\partial x_j} = -M_a [\xi(\phi) - k_\phi \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_j^2} + \kappa \left| \frac{\partial \phi}{\partial x_k} \right| \right)] \quad (6)$$

ここで、 ϕ は界面関数であり、液体であれば1.0、気体であれば0.0、気液界面は0.5と定義する。また、Allen-Cahn方程式において、 M_a 、 $\xi(\phi)$ 、 k_ϕ 、 κ は次式のように

に表される.

$$M_a = \frac{2b^2}{\delta^2} M\gamma, \quad b = 2 \tanh^{-1}(1 - 2\lambda), \quad \delta = a_\delta h_\delta, \quad (7)$$

$$\xi(\phi) = \frac{\partial f(\phi)}{\partial \phi}, \quad f(\phi) = \phi^2(1 - \phi)^2, \quad (8)$$

$$k_\phi = \frac{\delta^2}{2b^2}, \quad (9)$$

$$\kappa = \nabla \cdot \mathbf{n}, \quad \mathbf{n} = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}. \quad (10)$$

ここに, M , γ , δ , h_δ , κ , $\mathbf{n}$ はそれぞれ界面モビリティ, 界面エネルギー, 連続的に変化する気液界面幅, 要素の代表長さ, 界面曲率, 界面法線ベクトルである. なお, a_δ は気液界面幅を決める係数で, 本論文では $a_\delta = 3.0$ としている. また, $\lambda = 0.1$ としている.

各要素における密度 ρ と粘性係数 μ に関しては, 次式¹⁰⁾で決定される.

$$\rho = \frac{\rho_l + \rho_g}{2} + \frac{\rho_l - \rho_g}{2} \sin\left[\frac{\phi - (\phi_l + \phi_g)/2}{\phi_l - \phi_g} \pi\right] \quad (11)$$

$$\mu = \frac{\mu_l + \mu_g}{2} + \frac{\mu_l - \mu_g}{2} \sin\left[\frac{\phi - (\phi_l + \phi_g)/2}{\phi_l - \phi_g} \pi\right] \quad (12)$$

ここに, $\rho_l, \rho_g, \mu_l, \mu_g$ はそれぞれ液体, 気体の密度及び粘性係数である. なお, PFM 法ではダブルウェルポテンシャルの項を用いているため, 界面幅を一定に保つ効果に加え, 界面関数のオーバーシュートおよびアンダーシュートが発生しない特徴がある. このため, 高精度でかつ保存性の高い計算が期待できる.

(2) 離散化手法

Allen-Cahn 方程式の離散化に対して, SUPG 法に基づく安定化有限要素法を適用すると, 以下に示すような重み付き残差式が得られる.

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \psi^* \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_j \frac{\partial \phi}{\partial x_j} + M_a \xi(\phi) - M_a k_\phi \kappa \right) \frac{\partial \phi}{\partial x_k} d\Omega \\ & - \int_{\Omega} \psi^* M_a k_\phi \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_j^2} d\Omega + \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{\Omega} \tau_{SUPG} u_j \frac{\partial \psi^*}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right. \\ & \left. + u_j \frac{\partial \phi}{\partial x_j} + M_a \xi(\phi) - M_a k_\phi \kappa \right) d\Omega = 0 \quad (13) \end{aligned}$$

ここで, ψ^* は式 (6) に対する Galerkin 項の重み関数である. 第 3 項は安定化項であり, τ_{SUPG} は次式で定義される安定化パラメータである.

$$\tau_{SUPG} = \left[\left(\frac{2}{\Delta t} \right)^2 + \left(\frac{2\|\mathbf{u}^h\|}{h_e} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (14)$$

ここで, Δt は時間増分量, h は要素長である.

空間方向の離散化には四面体 1 次要素を用い, 時間方向の離散化には 2 次精度を有する Crank-Nicolson 法を適用する. ここで, 式 (13) の $\xi(\phi)$ 及び界面曲率に関する項の ϕ は式 (15), (16) に示す Adams-Bashforth 法

図-3 解析のフローチャート

により陽的に近似し, 線形化した Phase-Field 関数を代入している.

$$\phi^* = \frac{3}{2}\phi^n - \frac{1}{2}\phi^{n-1} \quad (15)$$

$$\tilde{\phi}^{n+1} \approx 2\phi^* - \phi^n \quad (16)$$

連立一次方程式の解法には, Element-By-Element 処理による Bi-CGSTAB 法を適用する.

4. 2D-3D ハイブリッド津波解析手法における並列化

(1) 並列計算手法

2D-3D ハイブリッド計算における計算の高速化, 及び大規模化を行うための手法として, MPI (Message Passing Interface) に基づく並列計算手法の導入を行う. 並列計算手法としては, 領域分割法に基づく手法¹²⁾を用い, 領域分割手法としては METIS を用いる. これにより各ノードに割り当てる要素数はほぼ均等化されたものとなる.

(2) 2D-3D オーバーラッピング手法の並列化

本項では, 2次元・3次元のオーバーラッピング手法¹⁾ (解析のフローチャートは図-3 参照) に対する並列化について述べる. 図-4 に, 2次元領域と3次元領域のオーバーラップ領域付近におけるメッシュ図 ((A) は底面のメッシュ図, (B) は表面メッシュの鳥瞰図) を示す. オーバーラップ領域の3次元メッシュの境界は3D接続境界, 2次元メッシュの境界は2D接続境界と定義する. そして, 2次元解析領域と3次元解析領域に対しては領域分割に基づく並列計算を行うため領域分割を行う. なお, 図-4 中の○数字は領域番号を示してい

● : 2D接続境界上における任意の節点P

(A) 底面のメッシュ図

● : 3D接続境界上における任意の節点Q

○ : 節点Qが2次元領域に投影した点Q'

(B) 表面メッシュの鳥瞰図

図-4 オーバーラップ領域の付近における領域分割図

図-5 2D 接続境界の任意節点 P の物理量の算定法

る。図-5に2D接続境界上の2次元メッシュの任意節点P(図-2における2D接続境界)における物理量(流速と水深)を求める模式図を示す。まず、プリプロセスとしてあらかじめ図-4(A)に示す2D接続境界

(A) 波が2次元領域のみに存在する場合

(B) 波が2次元と3次元領域に存在する場合

図-6 移動境界処理

上における2次元メッシュのすべての節点の鉛直方向に等間隔で補助節点を配置し、それぞれの補助節点が領域分割された3次元領域のどの小領域及びどの要素に含まれるかを検索して記憶する(図-5において点Pの補助節点3は小領域の境界上に存在している)。そして、各時間ステップにおいて、補助節点が含まれる要素内で1次補間することで、補助節点の界面関数、流速を求める。なお、補助節点の間隔については、3次元領域のメッシュ幅に応じて決めている。次に、点Pにおける平均流速と水深は鉛直方向の補助節点の値を用いて積分することで算出する。なお、図-5に示すように鉛直方向の補助節点が複数の領域に存在する場合には、小領域ごとに求めた値を節点Pが属する小領域に通信を行う。また、その際には小領域間の共有節点(図-5では節点3)ではその点が含まれる領域数で割ることで、重複の影響を除く。また、3D接続境界上における3次元メッシュの任意節点Qの値を求めるために、2次元のメッシュへの投影節点Q'がどの小領域及びどの要素に含まれるかを探索する。そして、含まれる要素の節点値を用いて1次補間によりQ'の値を求め、Q'の値を用いてQ点の値を算出する。

(3) 2D-3D ハイブリッドモデルにおける2次元領域の移動境界処理

2次元領域における浅水長波方程式に基づいた津波解析においては、水際線の先端の移動を考慮する必要がある。本研究では固定メッシュを用いるEuler的手法に

基づく移動境界手法^{5),7)}を適用する。まず、プリプロセスとしてあらかじめ図-6の3D 接続境界上に等間隔で2次元の補助節点を配置し、補助節点の毎ステップの水位を求めるために、その補助節点を含む要素を記憶する。また、図中の黒点は領域分割された各小領域の境界上の点であり、それらの点については何番目の小領域上にあるかを記憶する。各時間ステップにおいて以下の手順により移動境界処理を行う。

- (1) 各小領域の全節点に対し、微小水深を用いて水域要素、水際要素、陸域要素の判別を行う。図-6(A)は波が2次元領域のみに存在する場合であり、この場合には、ハイブリッド計算は行わず2次元計算のみが実施される。左の図は水色の領域が水域を表しており、右図では波の先端は水色で示している。Euler的手法では水際線を含む要素は水際要素であり赤色で示す計算領域に含める。
- (2) 3D 接続境界上の補助節点の水位をその補助節点を含む要素の節点値を用いて1次補間により求める。そして、初期水位より高くなった場合には、図-6(B)に示すように3次元領域にも波が存在することになり、その際には3D 接続境界内のオーバーラップ領域以外の2次元要素(図-6(B)の灰色領域の要素)は計算領域から除外する。
- (3) 隣接プロセッサ間通信と全プロセッサ間通信を用いて、連立一次方程式を求解する。その際には、連立一次方程式の内積計算(全プロセッサ間通信)において図中の黒点での重複に注意する。

5. 数値解析例

(1) 角柱に作用する抗力問題

PFM法による3次元自由表面流れ解析手法の妥当性を検証するため、図-7に示すような矩形水槽内の角柱に作用する抗力問題¹³⁾を取り上げ、VOF法とPFM法の比較を行った。初期条件としては、水理実験と同様に、長方形の水槽の片側に水を貯め、瞬時に自由流出させる。水、空気の密度と粘性係数はそれぞれ、 $\rho_l=998.0\text{kg/m}^3$ 、 $\rho_g=1.205\text{kg/m}^3$ 、 $\mu_l=1.01\times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、 $\mu_g=1.81\times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$ を与える。また、PFM法の界面幅は要素の代表長さの3倍と仮定した。解析メッシュとしては、図-8に示すような粗密づけした非構造格子を用いる。最小メッシュ幅は0.005mであり、総節点数は998,071、総要素数は5,757,462である。また、時間増分量は0.001sとし、境界条件としてはslip条件を適用した。なお、本論文では曲率の影響は無視した。

図-9に角柱の x 軸方向に働く抗力の時刻歴を示す。図より、数値解析結果はいずれも実験結果よりやや早く角柱に到達しているが、抗力の最大値は良い一致を示

図-7 角柱に作用する抗力問題

図-8 解析メッシュ

図-9 角柱の x 軸方向に作用する抗力の時刻歴

している。また、PFM法を用いた解析結果はVOF法に比べて、反射波についてより良く抗力の変化をとらえていることが分かる。体積補正手法⁶⁾を適用したPFM法の解析結果は最も実験結果と一致しているが、体積補正の効果はVOF法に比べて限定的であることが分かる。これは、PFM法は界面幅を一定に保つ効果に加え、界面関数のオーバーシュートおよびアンダーシュートが発生しない特徴があることに起因する。図-10に反射波が角柱に戻る $t=1.50\text{s}$ における両者の結果の比較を示す。図より、PFM法を用いた解析結果の方が水面が安定に計算されており、かつVOF法に比べて界面幅がほぼ一定に保たれていることが分かる。また、図-11に体積保存率の時刻歴の比較を示す。図より、同じ安定化手法で離散化した場合には、PFM法の方がVOF

図-10 $t = 1.50\text{s}$ における自由表面形状の比較

図-11 体積保存率の時刻歴の比較

法に比べて保存性が良いことが分かる．なお，保存性が満足されない理由は，移流方程式に非保存系のものを用いていることが起因する．また，体積補正手法⁶⁾を適用することで両手法ともに体積保存率は 100% となることが確認できた．ただし，本例題は 3 次元解析領域内の水の体積は不変であるため，体積補正手法は適用可能であるが，以後のハイブリッド解析を用いた数値解析例では，3 次元領域内の水の体積は流入・流出の影響により変化するため，体積補正手法は用いていない．

(2) 孤立波遡上問題

図-12 に示すような孤立波遡上問題を取り上げ，VOF 法を用いた場合と PFM 法を用いた場合の 2 次元・3 次元ハイブリッドモデルの比較を行った．

初期条件として，波高水深比 $\zeta_0/h = 0.3$ ，初期波高

図-12 解析モデル

(A) VOF法を用いた2D-3D Hybrid Model

(B) PFM法を用いた2D-3D Hybrid Model

図-13 $t = 4.0\text{s}$ における水面形状の比較

は式 (17) で与える．

$$\zeta(x, t = 0) = \frac{\zeta_0}{h} \text{sech}^2 \sqrt{\frac{3\zeta_0}{4h}} (x - x_0) \quad (17)$$

ここで， x_0 は波峰の位置である．初期流速は式 (18) で与える．

$$u(x, t = 0) = \zeta(x, t = 0) \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (18)$$

また，波峰は水深変化点から式 (19) で示される孤立波の半波長 L の位置にある．

$$L = \sqrt{\frac{4h}{3\zeta_0}} \text{arccosh} \left(\sqrt{\frac{1}{0.05}} \right) \quad (19)$$

2 次元解析領域の有限要素分割は，三角形 1 次要素による構造格子 (節点数 2,964，要素数 3,948) を用い，最

図-14 波形の実験結果と解析結果の比較 ($t' = 10, 15, 20, 30$)

小メッシュ幅は 0.05m である。一方、3 次元解析領域では、四面体 1 次要素による構造格子 (節点数 100,614, 要素数 392,160) を用い、最小メッシュ幅は 0.05m である。なお、時間増分量は 0.005s とした。

境界条件として、接続面を除く壁面境界上に slip 条件を用い、渦動粘性係数 ν_e は $1.0 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ 、マニングの粗度係数 n は $0.01 \text{s}/\text{m}^{1/3}$ を仮定した。

図-13 に $t = 4\text{s}$ における 2 次元と 3 次元のオーバーラップ領域付近の水面形状を示す、図より PFM 法を用いた場合の方が水面が滑らかに接続されていることが分かる。図-14 に無次元化した時刻 $t' = t\sqrt{g/h} = 10, 15, 20, 30$ における波形の実験結果¹⁴⁾と解析結果との比較を示す。 $t' = 20$ の図より、PFM 法を用いた場合の方が VOF 法に比べてピーク値及び波形が実験結果と良い一致していることが分かる。

(3) 実地形津波解析

本手法の大規模解析への適用事例として、東北地方太平洋沖地震により発生した津波シミュレーションを

図-15 解析モデル (初期条件)

図-16 3 次元解析領域 (女川町の海岸付近) 及び観測者位置

行った。図-15 に、全体の解析領域と初期条件を示す。3 次元の計算領域は女川町の海岸付近とする (図-16 参照、図中可視化するための視点 (観測者) を示している)。初期条件として与える水位変動量の計算には Mansinha & Smylie の方法¹⁵⁾を用い、断層モデルには佐竹らによる Ver. 8.0 (55 小断層モデル)¹⁶⁾を用いた。境界条件は海岸部で反射境界条件 (non-slip 条件) を与え、沖合 ABCD では開境界条件として与える。また、2 次元メッシュの節点数は 557,252、要素数は 1,103,938 であり、3 次元メッシュの節点数は 23,232,416、要素数は 134,768,640 である。解析領域は METIS により図-17 のように 512 の小領域に分割し、時間増分量を 0.1s と設定して、2,050s 経過時まで計算を行った。なお、並列計算機としては京都大学のスーパーコンピュータ (Cray XC40) 使用した。

図-18 (A),(B) に 720s 時、2,000s 時の 2 次元領域の解析結果を示す。図より、沖合で発生した津波が、時間経過とともに沿岸部へ伝播していく様子が分かる。また、図-19 (A),(B),(C) に高台にいる観測者位置 (図-

図-17 解析領域の分割図（512 分割）

16 参照）からのシミュレーション結果を示す。図-19 中の緑色は 2 次元の解析結果，水色は 3 次元の解析結果を表している。図-19 より，1,920s 後に津波が 3 次元解析領域に到達し，ハイブリッド計算が始まり，そして，建物周辺に浸水してくる様子が確認できる。なお，計算時間に関しては 2 次元で逐次計算，3 次元で並列計算を行う既報の手法の場合では，波が 3 次元領域に到達するまでの計算時間は 184,895s（1 ステップあたり 9.67s）であり，波が到達してからのハイブリッド解析における 2 次元解析と 3 次元解析の計算時間の割合は約 35% と約 65% であった。また，1 ステップあたりの計算時間は約 27s と約 49s（最初の 10 ステップの平均値）であった。一方，2 次元と 3 次元両方に対して提案した並列計算手法を適用した場合では，波が 3 次元領域に到達するまでの計算時間は 2,247s（1 ステップあたり 0.12s，逐次計算に比べて約 1/80）であり，波が到達してからのハイブリッド解析における 2 次元解析と 3 次元解析の計算時間の割合は約 22% と約 78% であった。また，1 ステップあたりの計算時間は約 15s と約 52s（最初の 10 ステップの平均値）であった。なお，Bi-CGSTAB 法の収束判定については，2 次元及び 3 次元の単体で解く場合には，相対残差ノルムで 10^{-12} としているが，流入流出を伴うハイブリッド計算では任意メッシュによるオーバーラップを許容している点及びメッシュサイズの差異により収束がいく分悪くなり，計算時間の観点から 10^{-6} とした。

(A) $t=720s$

(B) $t=2,000s$

図-18 解析結果

6. おわりに

本論文では，任意格子に基づく 2 次元・3 次元ハイブリッド津波解析手法に対して，高精度化と大規模化について検討を行った。精度に関する検討としては，界面の捕捉手法に Phase-Field Model (PFM) の導入を行い，大規模化への対応としては領域分割を用いた MPI に基づく並列化手法の導入を行った。数値解析例を通じて以下の結論を得た。

- 自由表面流れ問題の検証として，角柱に作用する抗力問題を取り上げ，従来の VOF 法による結果との比較を行った。その結果，PFM 法を用いた結果は VOF 法に比べて，保存性も高く実験結果と良い一致を示した。
- 2D-3D ハイブリッド津波解析手法を用いた検証として，孤立波遡上問題を取り上げた結果，PFM 法を用いた場合は VOF 法を用いた場合に比べて，結合部における水面形がより安定であり，実験結果とも良い一致を示した。
- MPI に基づく 2D-3D ハイブリッド津波並列計算手法を東北地方太平洋沖地震津波の大規模計算の事

例に適用した結果、計算の大規模化が実現でき計算時間の大幅な短縮が実現できることを示した。

今後は、2D-3D ハイブリッド計算における並列計算の効率化について検討するとともに、より広領域の3次元領域を設定した解析を行う予定である。

参考文献

- 1) 凌国明, 松本純一, 樫山和男: 任意格子に基づくオーバーラッピング手法を用いた2次元・3次元ハイブリッド津波解析手法, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 72, No. 2, pp. I.285-I.293, 2016.
- 2) Hirt, C.W., Nichols, B.D.: Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries, *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, pp. 201-225, 1981.
- 3) Beaucourt, J., Biben, T., Leyrat, A. and Verdier, C.: Modeling breakup and relaxation of Newtonian droplets using the advected phase field approach, *Physical Review E*, Vol. 75, pp. 021405(1-8), 2007.
- 4) 松本純一, 高田尚樹: 非構造格子を用いた陰的有限要素法による Multi-Phase-Field モデル流体解析, 計算工学講演会論文集, Vol. 20, CD-ROM, 2015.
- 5) 利根川大介, 樫山和男: 安定化有限要素法による津波遡上および流体力の解析手法の構築, 応用力学論文集, Vol. 12, pp. 127-134, 2009.
- 6) 桜庭雅明, 弘崎聡, 樫山和男: 自由表面流れのための CIVA/VOF 法に基づく高精度界面捕捉法の構築, 応用力学論文集, 土木学会, Vol. 6, pp. 215-222, 2003.
- 7) Takase, S., Kashiya, K., Tanaka, S. and Tezduyar, T.E.: Space-time SUPG formulation of the shallow-water equations, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 64, pp. 1379-1394, 2010.
- 8) Kawahara, M., Umetsu, T.: Finite element method for moving boundary problems in river flow, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 6, pp. 365-386, 1986.
- 9) 高橋佑典, 桜庭雅明, 樫山和男: 津波シミュレーションのための CIVA-安定化有限要素法, 応用力学論文集, Vol. 70, pp. I.349-I.356, 2014.
- 10) Inamuro, T., Ogata, T., Tajima, S. and Konishi, N.: A lattice Boltzmann method for incompressible two-phase flows with large density differences, *Journal of computational physics*, Vol. 198, pp. 628-644, 2004.
- 11) 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 ハイブリッド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, pp. I.307-I.315, 2014.
- 12) 樫山和男, 西村直志, 牛島省: 並列計算入門, 計算力学レクチャーシリーズ 3, 丸善株式会社, 2003.
- 13) Gomez-Gesteira, M., Dalrymple, R.A.: Using a Three-Dimensional Smoothed Particle Hydrodynamics Method for Wave Impact on a Tall Structure, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 130, pp. 63-69, 2004.
- 14) Synolakis, C.E.: The runup of solitary wave, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 185, pp. 523-545, 1987.
- 15) Mansinha, L. and Smylie, D.E.: The displacement fields of inclined faults, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 61, pp. 1433-1440, 1971.
- 16) Satake, K., Fujii, Y., Harada, T. and Namegaya, Y.: Time and Space Distribution of Coseismic Slip of the 2011 Tohoku Earthquake as Inferred from Tsunami Waveform Data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, pp. 1473-1492, 2013.

(2017.6.23 受付)

(A) t=1,910s

(B) t=1,920s

(C) t=2,000s

図-19 高台（観測者）から見る解析結果

STUDIES ON ACCURACY AND LARGE-SCALE PROMOTION FOR THE 2D-3D HYBRID TSUNAMI ANALYSIS METHOD

Guoming LING, Junichi MATSUMOTO and Kazuo KASHIYAMA

This paper presents investigation of accuracy and promotion of large-scale for the 2D-3D hybrid method based on the arbitrary domain. The Phase-Field Model (PFM) is applied to capture the free surface which is aimed to increase the accuracy for the 2D-3D hybrid method. The MPI method is used as the parallel computing method. Several numerical examples are examined to show the validity and the effectiveness of the presented method. Finally, the present model is applied to simulate the 2011 Tohoku tsunami.