

遡上波先端流れの高解像計算

High resolution calculation of run up wave with tip flow

北海道大学 学生員 新川理(Osamu Nikawa)
北海道大学 正会員 渡部靖憲(Yasunori Watanabe)

1. はじめに

2011年東北太平洋沖地震津波による甚大な被害が残した教訓は、津波予測、防御において著しい技術革新をもたらしている。特に前者は津波遡上過程における建物の崩壊、土地利用に応じた摩擦、地表の浸食を含む総合的なモデル化が進められており、高度な浸水被害予測が期待されている。一方広く使われている非線形長波モデルにおいて遡上波先端先端部近傍では、計算が不可能となる水深ゼロに近づく位置における計算グリッド上での計算を避け遡上位置手前の水深を代表値とする⁽¹⁾岩崎・真野(1977)や小野ら(1998)の方法が使われている。即ち、微分方程式を解くために不可欠な流体境界(遡上波の先端)における境界条件を陽的に与えずにあいまいな計算を行っていることになる。一方、⁽²⁾渡部・堀井(2013)は、遡上波高解像可視化実験を行い、遡上先端(コンタクトライン)が底面のせん断、回転流れ場の形成に重要な役割をもつだけでなく、その背後の境界層流れにも大きな影響を与えることを明らかにした。即ち、コンタクトラインの力学的特性が遡上流れを支配しているにもかかわらず、この影響を全く含まない現行遡上モデルを用いて過去の津波浸水域に適合する様に底面粗度に森林、建造物モデルのパラメータをチューニングする現行の研究手法は物理的に誤った回答を与える可能性がある。本研究は、津波先端部における、いわゆるムービングコンタクトラインを適切に評価しその津波浸りに対する影響を明らかにすることを目的とし、Adaptive Mesh Refinementを導入した高解像度三次元 Large Eddy Simulationにより、ムービングコンタクトを含むダムブレイク浸水流れを再現しようとするものである。

2. 計算手法

2-1. paramesh について

本研究においては、コンタクトラインとダムブレイク浸水流れモデル間の長さスケール差克服のため、Adaptive Mesh Refinement(以下 AMR)のライブラリの一つである⁽³⁾PARAMESHを用いた、PARAMESHソフトウェアはNASA Goddard Space Flight CenterとDrexel Universityで開発されたFortran90用パッケージである。AMRの特徴は、指定した物理量を空間及び時間的变化に応じて局所的に計算グリッドを細分化する点である。この特徴により、本研究のような長さスケールの差が大きいモデ

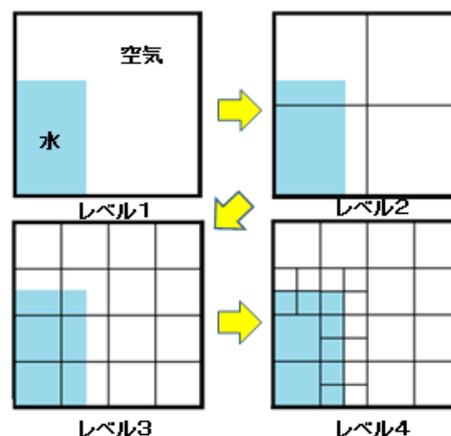


図-1 計算グリッドの生成例

ルの計算を行う際は、効率がよく高解像度な計算を行うことが出来る。

2-2. Level set 法を用いた閾値の設定

本研究ではレベルセット法により水面の検出を行う、レベルセット関数 Φ の符号が負の場合は空気、正の場合は水、0の場合が境界と定義され $\Phi=0$ 近傍厚さ ϵ 内の計算グリッドの分割を行う。

2-3. AMR 法によるグリッドの細分化方法

AMRでは差分計算が行われる計算グリッドの集まりから形成される計算ブロックによって計算領域が覆われている。まず初めに計算領域全体を覆う計算ブロックをレベル1とする、その後レベルの増加に従い計算ブロックを各座標方向に二分し分割を行っていく。分割する際は2-2に示したレベルセット関数 Φ に対する閾値を基に細分化する。また、生成された計算グリッドのデータは八分木構造で保存され、管理が行われる。

計算ブロックとレベルの関係を表す概略図を図-1に示す。なお図-1は水が左側に堰き止められているダムブレイク水槽の初期状態を想定している。このように $\Phi=0$ 、気液界面のみ分割していく事により高解像度でグリッドの生成を行い、詳細な局所水面変動並びに流況を計算することができる。

3. PARAMESH を用いたテスト

PARAMESH をダムブレイク浸水流れのモデルに適用する前に、簡単なモデルに適用し、その適用性をテストした。採用したモデルは計算領域中央に濃度の高いスカラー量を初期条件として設定し、拡散方程式に基づく濃度分布の時間変化を計算するものである。同一の初期条件に対して二次元及び三次元空間内の拡散現象について数値テストを行った。紙面の都合上三次元計算についてのみ考察する。

3-1. 計算条件

式 (1) に示す三次元拡散方程式を支配方程式として計算を行う。ここで κ は拡散係数であり、単位量を設定した。式 (2) で表す四角柱状の初期濃度が式 (1) のもとに拡散し、濃度勾配に応じてグリッドの細分化、粗視化が動的に行われる。計算領域は、 $-4 \leq x \leq 4, -4 \leq y \leq 4, -4 \leq z \leq 4$ の立方体領域とし、全ての面においてゼロ勾配条件とした。

$$\frac{d}{dt}U(x,y,z,t) = \kappa \left(\frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z^2} \right) U(x,y,z,t) \quad \dots(1)$$

$$U(x,y,z,t) = 10.0 \text{ (if } -1 \leq x \text{ and } y \text{ and } z \leq 1) \quad \dots(2)$$

$$U(x,y,z,t) = 1.0 \text{ (otherwise)}$$

3-2. 計算結果

図 2 はタイムステップ 30 における計算ブロックを示している。濃度勾配の高い計算領域中央部付近が細かく分割され、その周囲には粗いグリッドが配置されている様子を確認できる。図-3 及び図-4 は図-2 の赤線で示した計算領域中央の切断面での拡散の様子を表したものである。拡散に応じた動的な適合座標生成が行われ効率的に高解像計算を実行可能であることを確認した、この AMR 環境をベースとしたダムブレイク浸水流れの流体計算について次章で説明する。

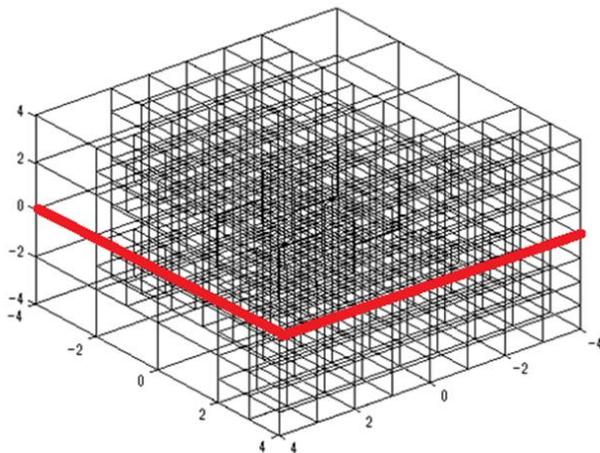


図-2 分割されたブロック

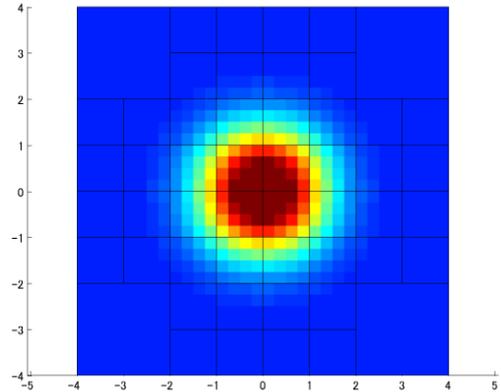


図-3 タイムステップ 30 時点での切断面

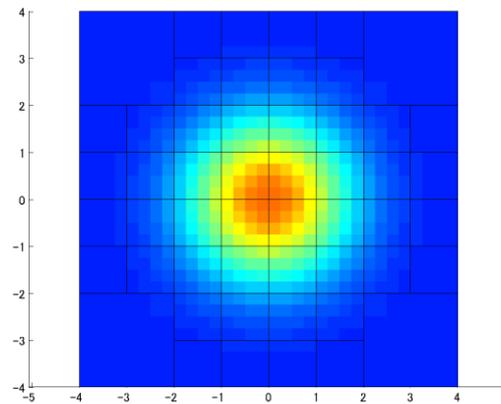


図-4 タイムステップ 80 時点での切断面

4. ダムブレイク浸水モデルへの PARAMESH の適用

4-1. 計算条件

ダムブレイク浸水流れに対して Large Eddy Simulation を適用する。式(4)に示すフィルター操作された Navier-Stokes 方程式を支配方程式として計算を行う。(4)式の \mathbf{u} はオイラー系表示の無次元流速ベクトル、 p は無次元圧力、 ν_0 は無次元動粘性係数、 \mathbf{g} は外力である。なお(5)の SGS 応力の求め方やその他の計算方法は⁽⁴⁾Watanabe ら (2008)の方法と同一である。

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla \bar{p} - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \nu_0 \nabla^2 \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{g} \quad \dots(3)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \overline{\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}} - \bar{\mathbf{u}} \otimes \bar{\mathbf{u}} \quad \dots(4)$$

$$\frac{D\Phi}{Dt} = 0 \quad \dots(5)$$

計算領域は実験条件を模擬するため、 $0 \leq x \leq 2, 0 \leq y \leq 2, 0 \leq z \leq 2$ の立方領域とし、全ての面において不透過反射条件を導入した。モデルの初期条件は図 1 に示したように、 $0 \leq x \leq 0.75, 0 \leq y \leq 2, 0 \leq z \leq 1.12$ の範囲に水が存在するようにレベルセット関数 Φ の設定をした。 Φ は(5)の移流方程式に従い輸送される。

4-2.計算結果

図-5 は最大ブロックレベル 3 に対するブロック座標をプロットしたものである。このケースでは水面を十分に解像していないため水面に粗い凸凹が生じ適当な計算は行えない。図-6 は最大ブロックレベル 6 に対するブロック座標をプロットしたものである。レベルセット関数 $\Phi=0$ となる気液界面近傍が細かく分割され、その周囲には粗いグリッドが配置されている様子を確認できる、水面形は図 5 に見られる様な変形を含まず、適切な自由水面流れの計算が可能となる、以上よりレベルを上げていくことにより遡上波先端流れを捉える事も可能だと考えられる。また、図-7 に示すよう分割最大レベルの増加に応じてブロックの生成個数が増えるため適切な閾値と最大分割レベルの設定が必要である。

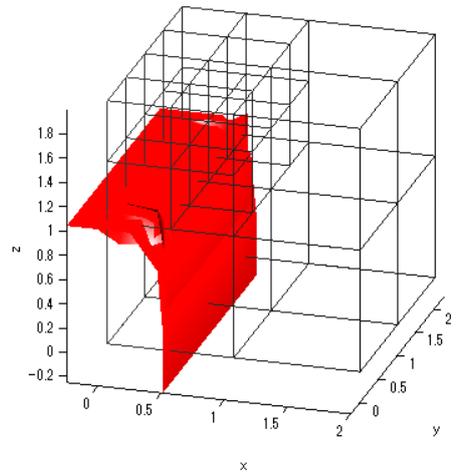


図-5 レベル 3 まで分割を行ったダムブレイク水面形

5. おわりに

本研究で得られた結論は以下の通りである。

(1)AMR の適用により、効率良くグリッドの分割を行い高解像度計算が可能になる。また、実現象のスケール差を考えても分割レベルを増やせばスケール差の問題を充分克服することが出来る。

(2)AMR ライブラリを用いて遡上波先端流れを計算することは可能である。今後は動的な遡上波先端流れの計算を適切な境界条件のもと行っていく所存である。

参考文献

- 1)岩崎敏夫, 真野明: オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算, 第 26 回海岸工学講演会講演集, pp.70-74, 1979.
- 2)渡部靖憲, 堀井正輝, 新井田靖郎: 遡上波の力学的バランスと流れ構造, 土木学会論文集 B2 vol69, 2013
- 3)PARAMESH
http://www.physics.drexel.edu/~olson/paramesh-doc/Users_manual/amr.html
- 4)Yasunori Watanabe et al :
 Free-surface flows under impacting droplets ,JOURNAL OF COMPUTATIONAL PHYSICS pp2346-2348

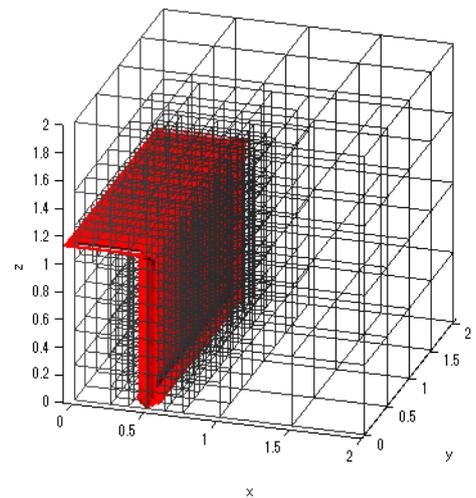


図-6 レベル 6 まで分割を行ったダムブレイク水面形

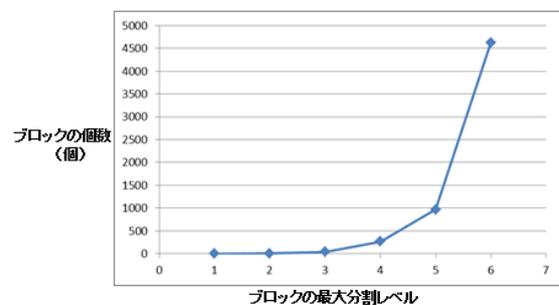


図-7

ブロックの最大分割レベルと個数の関係