

Level set 法を用いた Adaptive Mesh Refinement による三次元波浪計算

Application of Adaptive Mesh Refinement to 3D Numerical Wave Simulation Using Level Set Method

北海道大学大学院工学研究科 〇 学生員 小玉努 (Tsutomu Kodama)
北海道大学大学院工学研究科 正 員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

1. はじめに

海洋での津波や高波などの防災を考えた場合、数値シミュレーションは有効な手段である。しかしながら、沿岸域における複雑な地形や詳細な建設物を考慮に入れ、計算を行い、より精度の高い予測をする必要があるため、効率の良い数値計算は困難である。このような背景のもと、これまでは有限要素法などが細部の流れを再現し、効率の良い計算グリッドの生成手法として広く採用されてきた（例えば、桜庭ら¹⁾）。しかし、有限差分法などの方法と比較すると要素の生成が複雑となり、迅速な予測には設備の大規模化などといった複雑な問題が発生する。

本研究では、効率的な計算グリッドの生成を行なう手法として注目を集めている Adaptive Mesh Refinement（適応格子法、以後 AMR と略する）を今後、3次元流体・波浪計算に応用するために、Level set法を用いた3次元の簡単なモデルに適用し、その有効性について考察するものである。

2. 数値解析手法

本研究で用いる AMR 法は、マルチスケールの現象に関する物理量を空間変化や時間変化に応じて局所的に計算グリッドを細分化あるいは結合化を行なう手法である。そのため、複雑な構造をもつ数値シミュレーションの高精度高解像度計算が可能となる。本研究では形状変化に応じて予め設定しておいた Level set 関数を閾値として設定し、計算グリッドの分割・結合を行なう。

なお、本研究では、AMR ライブラリの 1 つである PARAMESH^{2), 3)} を導入して計算を行なった。

2.1 計算グリッド生成方法

AMR では、差分計算が行なわれる多数の計算グリッド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。計算領域全体を覆う計算ブロックを Level 1 とし、レベルの増加に伴って計算ブロックを各座標軸方向に二分し分割を行なっていく。分割はあらかじめ設定されたレベルまで行う（図 - 1 参照）。この処理を繰り返すことで局所的に計算グリッドの細分化を行なうことができる。また、別に設定された結合閾値以上に計算グリッドの値がなれば、計算ブロックの結合を行なうことも可能である。本研究では後述する level set 関数を細分化の閾値として設定しており、気液界面を中心として計算グリッドの細分化が行なわれ、気液界面を高解像度で捕捉することが可能となる。

また、生成された計算グリッドのデータは quad-tree 構造（四分木構造）で保存され、管理が行なわれる。

2.2 Level set 法の概要

Level set 法は高精度な解析手法として海岸工学の分野にも広く適用されている。この方法は、混相流での液相・気相界面の関係を Level set 関数として表すことにより、容易に界面を捕捉することが可能な方法である。この Level set 関数は気液界面とその周辺距離を表す関数であり、(1) 式のように与えられる。

$$\begin{cases} f > 0 (x \in \text{Liquid}) \\ f = 0 (x \in \Gamma) \\ f < 0 (x \in \text{Air}) \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 ϕ は気液界面からの距離を表す Level set 関数、 Γ は気液界面を表している。この ϕ の値が 0 である界面周辺のみ計算グリッドの細分化が行なわれる。また、Level set 関数は (2) 式のような等距離関数としての性質を持つ。

$$|\nabla f| = 1 \quad (2)$$

3. 計算条件

本研究では、図 - 2 および図 - 3 に示すような 3 種の簡単なモデルを用いて計算を行なった。なお、図 - 2 に示した水柱試験計算については、最大分割レベルや細分化閾値などを変化させた 4 種類を行い、それぞれの AMR の分割パラメータを表 - 1 に示す。また、全ての計算において、1 ブロックあたりのグリッド数は $20 \times 20 \times 20$ とした。

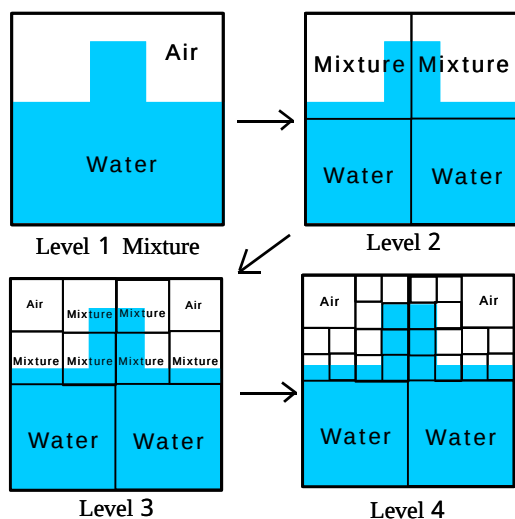


図 - 1 計算グリッド生成方法

4. 計算結果

図 - 4 は図 - 2 に示した一様水深水槽上の水柱モデルで AMR により計算ブロックを分割したものである。なお、図中の青色の部分は level set 関数が 0 である界面を

表 - 1 水柱計算条件

	最大分割 レベル	最小分割 レベル	細分化閾値 (Level set関数 絶対値)
Case1	5	5	0.3
Case2	6	1	0.3
Case3	5	1	0.3
Case4	5	1	3.0

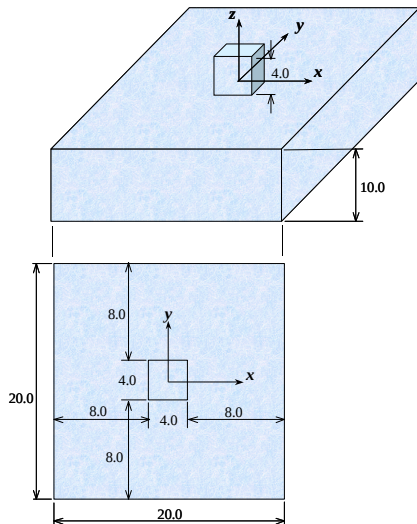


図 - 2 水柱試験計算領域，投影図（上），平面図（下）

描いている。AMRを適用しているCase2からCase4は全ての計算領域を均等に分割しているCase1と比較して、水柱の形状を表現する上で重要となる界面に対して計算ブロックの細分化が行なわれており、効率よくブロックの分割が行なわれている。また、Case3よりも最大分割レベルが1大きいCase2は、より局所的なブロックの分割が行なわれている。さらに、細分化閾値が他のケースよりも大きいCase4は、同じ最大分割レベルのCase3よりも総ブロック数が約2倍であり、細分化閾値を適切に設定することが重要であることがわかる。

図 - 5 は、図 - 2 で示した一様水深水槽上の水柱モデルから水槽部分を抜いたモデルの計算結果である。この計算も立方体部分を中心として計算ブロックの分割が行なわれており、適切に計算が実行されていることがよく分かる。

図 - 6 は 図 - 3 に示した水粒子を空中に浮遊させたモデルの計算結果である。この場合も水粒子の界面付近で計算ブロックの細分化が行なわれ、効率よく計算が実行されている。今後、マルチスケールでの越波飛沫や碎波の飛沫に対するシミュレーションへの応用に期待できる。

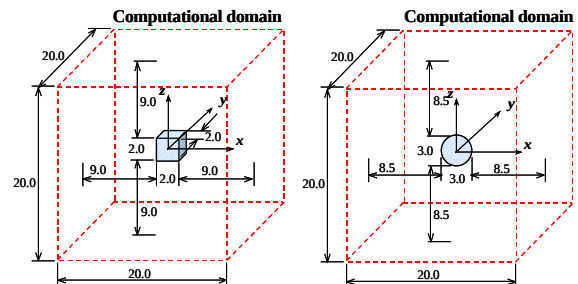
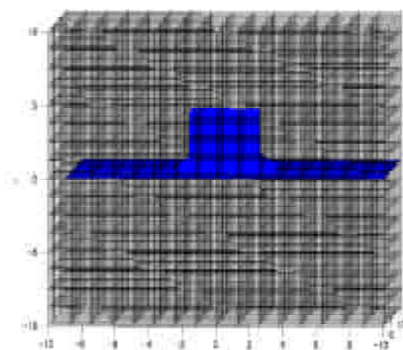
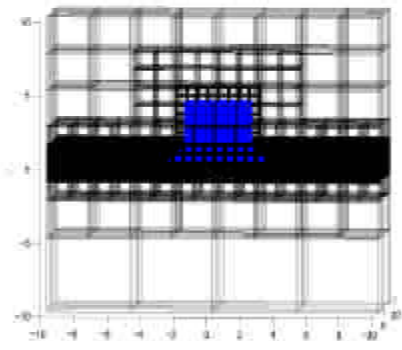


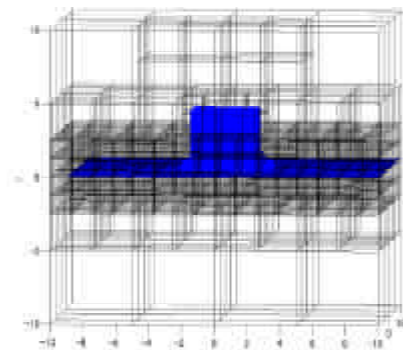
図 - 3 立方体（左），水粒子（右）試験計算領域



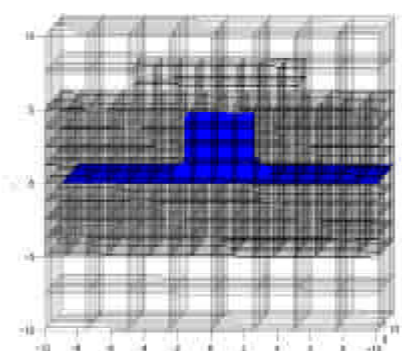
(a)Case1 (ブロック数4001)



(b)Case2 (ブロック数6121)



(c)Case3 (ブロック数1417)



(d)Case4 (ブロック数2761)

図 - 4 水柱試験計算結果

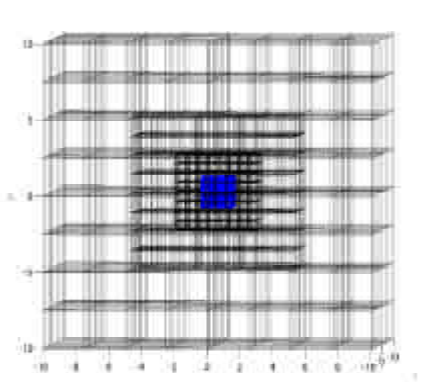


図 - 5 立方体試験計算結果
(最大分割レベル 5
最小分割レベル 1
細分化閾値 0.3)

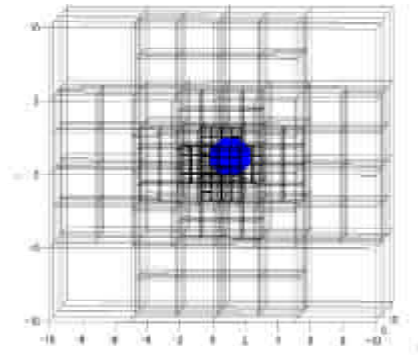


図 - 6 水粒子試験計算結果
(最大分割レベル 5
最小分割レベル 1
細分化閾値 0.3)

5. まとめ

本研究では, Level set法を用いてAMRの3次元数値計算を行い, その有効性について考察した.

本研究で得られた結論は, 以下の通りである.

- (1) Level set関数を閾値として計算ブロック分割を行い, 気液界面を中心に細分化を適切に行なうことができた.
- (2) 様々な形状の定常状態に対して計算ブロックの細分化を行なうことができた. これより, 気液界面の様々な形状にAMRは対応が可能である.

AMRのメリットは, 高精度なシミュレーションを効率よく実現することが可能なことである. また, 動的なシミュレーションにも有効であることも明らかになっている(渡部ら⁴⁾, 2009). この手法を応用することで気液界面の捕捉が重要である高波による越波飛沫のシミュレーションや碎波のシミュレーションにも応用可能である. 今後は, 動的なシミュレーションの例として水柱崩壊試験計算を行なう所存である.

参考文献

- 1) 桜庭雅明, 櫻山和男: Level set法を用いた安定化有限要素法による自由表面流れの数値解析, 海岸工学論文集, 第50巻, pp16-20, 2003.
- 2) MacNeice P., Olson, K.M., Mobarry, C., Fainchtein, R., Packer, C.: PARAMESH: A parallel adaptive mesh refinement community toolkit, Comp. Phys. Comm., Vol.126, pp330-354, 2000.
- 3) Pancheshnyi S., Segur, P., Capeillere, J., Bourdon, A.: Numerical simulation of filamentary discharges with parallel adaptive mesh refinement, J. Comp. Phys., Vol.227, pp6574-6590, 2008.
- 4) 渡部靖憲, 小玉努: Adaptive Mesh Refinementによる高解像津波シミュレーション, 海洋開発論文集, 第25巻, pp849-854, 2009.