

AMR 法を導入した格子ボルツマン法による数値解析

東京都立大学 笠原 豪, 新谷 哲也

1. はじめに

汽水域を含む沿岸域では内部波や津波など、重要な水理現象が生じるが、これらのような現象を解明する手法として数値計算は非常に有効な手段である。その中で、格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method, 以降 LBM と呼ぶ) は 1990 年代に入ってから提案された比較的新しい非圧縮粘性流体の数値計算法である。しかし、津波や内部波のような現象は規模が大きく、一般的な LBM で利用されることが多い一律の空間・時間解像度での解析は困難であると考えられる。そこで本研究では空間・時間解像度を動的・局所的に変更することができる適合格子細分化法 (Adaptive Mesh Refinement 法, 以下 AMR 法と呼ぶ) を LBM に適用し、効率的な計算処理を目指した。

2. 数値計算手法

LBM は流体を特定の速度を持つ仮想粒子に近似し、各粒子の衝突と並進を粒子の速度分布関数を用いて計算し、その速度分布関数のモーメントから巨視的流れ場を求める計算手法である。LBM は Poisson 方程式を解くことなく圧力場を求めることができる完全な陽解法であり、計算格子ごとの計算が独立しており並列化に適しているため計算処理の高速化が期待できる。また仮想粒子は衝突と並進を繰り返しながらも常に計算領域内に存在

するため保存性に優れている。このため LBM は、気液混相流計算や塩分等の移流拡散問題の等土木分野において重要な問題に適した手法といえる。

AMR 法は図-1 のように空間・時間解像度を動的・局所的に変更することができる計算手法である。空間解像度を一律で 2 倍にする場合、二次元では 4 倍の格子が、三次元では 8 倍の格子が必要となる。また同時に時間解像度も 2 倍にすると計算処理量が二次元・三次元の場合でそれぞれおよそ 8 倍、16 倍になるため AMR 法の導入によって計算時間・メモリコストの削減が期待できる。本研究では格子の構造に木構造を用いている。この構造では各ノードが条件を満たした場合設定した段階までノードの枝が分岐していき、末端のリーフノードに計算格子が割り当てられる。ノードを細分化する条件は自由に設定できる。例として $\phi \approx 0$ を気相・ $\phi \approx 1$ を液相としその間の値を界面相として表現する Phase-Field 法を用いて気液混相流を行う場合、「 $0.01 < \phi < 0.99$ のとき細分化される」と条件を設定すれば図-1 のように気液界面付近を細分化することが可能である。解像度境界面では解像度が粗い格子を一時的に細分化し細かい格子とのやり取りを行うことで処理を行う。細かい格子とのやり取りの後、粗い格子に統合し、粗い格子から再度仮想粒子を受け取る事で仮想粒子の総量を保存している。

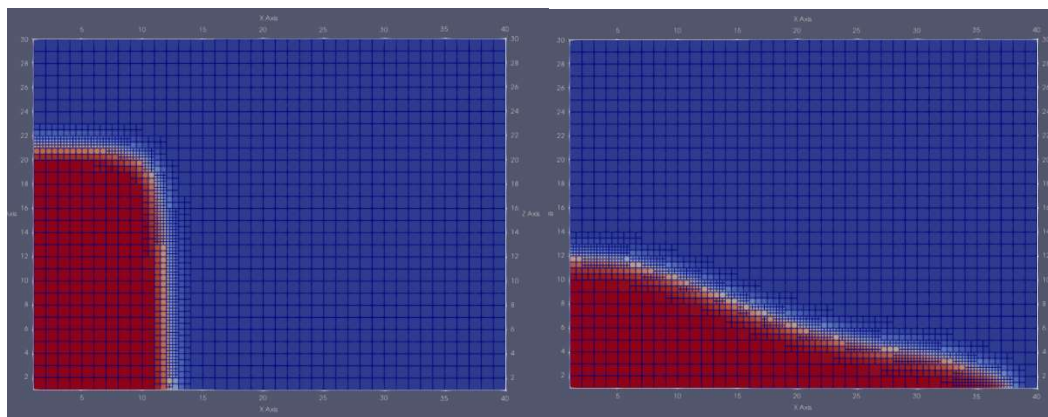


図-1 AMR 法によって動的に・局所的に細分化を行っている様子
(赤い層(液相)と青い層(気相)の界面を細分化している)

3. モデルの性能検証

モデルの性能検証として dam break 問題を均一の解像度、及び AMR 法を適用した 2 ケースで解析した。AMR 法を適用したケースでは解像度を 2 段階用意し、高い解像度が均一の解像度で用いるものと同じになるようにした。計算寸法は図-2 のように設定し、均一格子の空間解像度を $dx = 0.005m$ 、時間解像度を $dt = 0.0001s$ とした。合計計算時間を $1.0s$ とし、AMR 法では $0.01s$ ごとに計算格子の再構築を行った。また壁面との境界条件については一律解像度・AMR 法のどちらのケースでも slip 条件を適用した。

解析結果を図-3、表-1 に示す。図-3 より AMR 法を適用した解析は一律解像度での解析と同様の精度であったと言える。表-1 は case uniform (一律解像度) と case AMR での生成された最大計算格子量と総計算時間を示している。表-1 より case AMR は case uniform と比較して総計算時間を大幅に削減できていると言える。また最大格子量についても case AMR では case uniform のおよそ半分程度となっており、メモリコストの観点からも AMR 法の導入により高効率な計算処理が実現できていると言える。

4. まとめ・今後の課題

今回は AMR 法を格子ボルツマン法に適用することによって精度を維持したまま計算効率を向上させることに成功した。

今回は解像度を 2 段階用意し解析を行い、LBM で用いる仮想粒子の総量を保存することに成功しているが解像度を 3 段階用意した際に仮想粒子の総量に変化し、また流体の挙動も不自然になってしまうことが確認されている。よってより多い段階の解像度を用意しても正常に解析できるようにすることが今後の課題として挙げられる。また塩淡水による密度流に AMR 法を適用したところ解析に不具合が生じた。これは密度比が比較的小さ

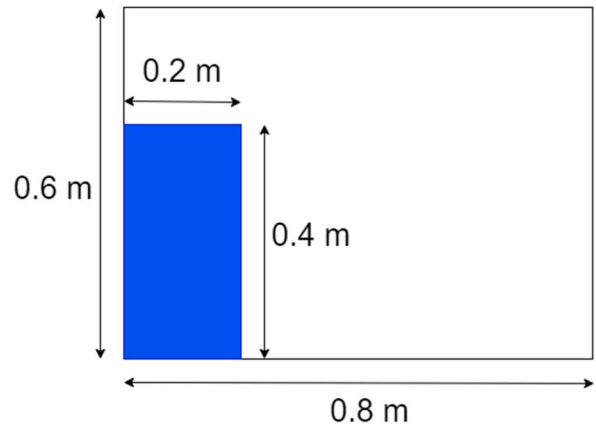


図-2 計算寸法

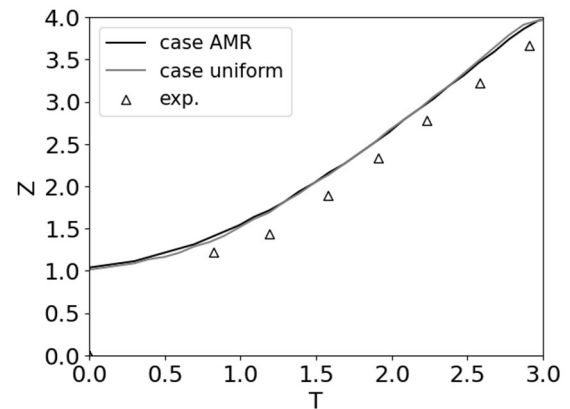


図-3 液塊の先端位置の比較

表-1 計算時間の比較

	Uniform	AMR
Δx_{max}	0.005 m	0.010 m
最大格子量	37842	18864
Δt_{max}	$5.0 \times 10^{-5}s$	$1.0 \times 10^{-4}s$
総計算時間	487s	216s

い解析において、解像度境界面での圧力計算が精密に行われなかったことに起因すると思われるため、こちらも今後の課題である。

参考文献

- (1) J.C. Martin, W. J. Moyce : Phil. Trans. R. Soc. Lond., Vol. 244, pp. 312 – 324, 1952