

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	AMR法を導入した格子ボルツマン法による混相流の大規模GPUシミュレーション
Title(English)	
著者(和文)	渡辺勢也
Author(English)	Seiya Watanabe
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11126号, 授与年月日:2019年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:青木 尊之,奥野 喜裕,末包 哲也,肖 鋒,長崎 孝夫
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11126号, Conferred date:2019/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

## 論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	渡辺 勢也	
		氏名	職名		
論文審査 審査員	主査	青木 尊之	教授	審査員	長崎 孝夫
	審査員	末包 哲也	教授		
		肖 鋒	教授		
		奥野 喜裕	教授		

## 論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「AMR法を導入した格子ボルツマン法による混相流の大規模 GPU シミュレーション」と題し、6 章より構成されている。

第 1 章「緒言」では、研究背景として混相流シミュレーションの重要性に触れ、その高精度な解析には自由界面や固体表面近傍を高解像度で計算する必要があり、必然的に大規模計算となることを述べている。大規模流体解析に適した格子ボルツマン法に基づく混相流の解析手法を提案し、高解像度格子を局所的に配置する AMR (Adaptive Mesh Refinement) 法と GPU (Graphics Processing Unit) による計算の導入により、これまで難しかった大規模シミュレーションによる混相流の詳細な解析が実問題で可能になることを実証することが本研究の目的であると述べている。

第 2 章「格子ボルツマン法に基づく混相流解析手法の開発」では、格子ボルツマン法による流体計算、フェーズフィールド法による界面捕獲計算、個別要素法による剛体衝突計算を組み合わせることを提案し、固体と自由界面を含む混相流解析手法について説明している。格子ボルツマン法の衝突モデルとしてキュムラントモデルを混相流計算に導入することにより、高レイノルズ数の激しい流れ場においても安定した計算が可能になることを示している。球形粒子の沈降計算やダム崩壊計算などの典型的なベンチマーク問題を行い、既往研究での実験結果と計算結果のよい一致を示すことで、提案手法の妥当性を検証している。

第 3 章「複数 GPU を用いた大規模混相流解析」では、GPU のスレッド並列化や階層的なメモリ構造について説明し、第 2 章で提案した計算手法の単一および複数 GPU 実装について述べている。格子ボルツマン法に対して 2 次元領域分割による並列化を行い、個別要素法の計算に対しては計算負荷が低い各 GPU が全粒子の計算を冗長に行う方法を提案し、256GPU において並列化効率 83% を達成している。東京工業大学の TSUBAME を用いた大規模混相流シミュレーションを行い、48GPU を用いた噴流層の固気二相流シミュレーションでは粒子の循環と混合を再現している。流木を含む津波流の水槽実験に対する計算を実施し、津波で流された流木が壁面に衝突した際の衝撃力は津波波力の 15 倍以上になることを明らかにし、瓦礫や流木など浮遊する固体の構造物への影響を直接評価できることを明らかにしている。

第 4 章「AMR 法を導入した格子ボルツマン法の大規模 GPU 計算」では、格子ボルツマン法に基づく混相流解析への AMR 法の導入と複数 GPU 計算の実装に関して述べている。木構造に基づくブロック構造の細分化格子により、物体表面や自由界面近傍に局所的に高解像度格子を適合させることで、計算精度を維持しつつ格子点数の大幅な削減を可能にしている。空間充填曲線としてモートン曲線を用いた領域分割による動的負荷分散手法を実装し、各 GPU に割り当てられるブロック数を均一にした複数 GPU による効率的な計算を可能にしている。固定された細分化格子では、8GPU から 128GPU の間で 98% 以上の並列化効率を達成し、演算している間に GPU 間通信を行う手法を導入することで実行性能を 1.37 倍に向上している。動的な格子生成を行う場合には、並列化効率が 128GPU で 65%、256GPU で 48% となり、格子点数の増加に伴い格子生成に要する時間が増加することが並列化効率低下の原因であることを示している。検証計算として、高レイノルズ数の球周りの流れにおけるドラッグ・クライシスの再現や自由界面に高解像度格子を適用したダム崩壊計算を行い、動的負荷分散手法の有効性を検証すると共に、AMR 法による格子点数の削減効果を明らかにしている。

第 5 章「マルチフェーズフィールド法に基づくノード間通信削減のための動的負荷分散手法の開発」では、多結晶組織の成長過程の解析に用いられるマルチフェーズフィールド法を、混相流シミュレーションにおける新しい領域分割法に適用する提案を述べている。各結晶粒が占める範囲を分割された計算領域とみなし、界面エネルギーの減少に基づく結晶粒成長が混相流シミュレーションの計算領域の表面積を最小化し、通信コストも削減していることを明らかにしている。AMR 法を導入した界面移流計算に適用した場合、各 GPU の負荷バランスの誤差を 5% 以下に保つことができ、モートン曲線を用いた領域分割と比較して通信コストを約 80% に削減できることを示している。

第 6 章「結言」では、各章において得られた成果を要約し、結論を述べている。格子ボルツマン法に基づく混相流の大規模シミュレーション手法を提案し、界面に高解像度格子を適合させる AMR 法と GPU を利用した並列計算により、混相流の詳細な解析を実現可能にしたことを本論文の結論としている。

これを要するに、本論文は格子ボルツマン法に基づく混相流解析手法を構築し、安定かつ高精度に計算可能であることを示し、固体表面と自由界面の近傍に高解像度格子を適合させる AMR 法と複数 GPU を用いることで大規模混相流解析が実現可能になることを示している。これにより、これまで計算資源の問題から実現できなかった混相流の詳細なシミュレーション解析が可能となり、工学上および工業上貢献するところが大きい。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として十分価値のあるものと認められる。