

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)	論文要旨
Type(English)	Summary

# 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 (工学) Academic Degree Requested Doctor of
学生氏名： Student's Name	渡辺 勢也		指導教員 (主)： 青木尊之 教授 Academic Supervisor(main)
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)

## 要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

複数の相が混ざり合う混相流は化学プラントでの流動層、土石流や津波などの自然災害で現れ、その解析には界面および物体表面での現象を捉えるための高解像度計算が必要である。本研究では、スパコンに搭載された複数台の GPU を用い、大規模な混相流シミュレーションを実現するための計算手法を提案した。大規模解析に適した格子ボルツマン法を混相流計算に適用し、界面と物体表面に高解像度格子を適合する AMR (Adaptive Mesh Refinement) 法を導入することで格子点数を大幅に削減した。AMR 法の計算では計算負荷の空間分布が時間変化するため、計算領域を動的に分割することで各 GPU の計算負荷を均一化し、高い実行性能と高い並列化効率を達成した。数億格子点を用いた流動層や流体構造連成解析、津波の大規模計算を実行し、提案手法により大規模な混相流解析が実現可能であることを示した。

第 1 章「緒言」では、研究背景と研究目的を述べた。混相流の高精度な解析には、物体と流体の相互作用や界面の運動を捉えるための直接計算が必要であり、必然的に大規模流体計算となる。本研究では、混相流の直接計算を高効率に実行するための計算手法を開発し、複数 GPU 計算により混相流の詳細な解析の実現を目指す。格子ボルツマン法に基づく混相流計算手法の構築、および界面に高解像度格子を適合する AMR 法を用いた大規模計算を GPU スパコンで高効率に実行するための高速化手法と並列化アルゴリズムの開発を目的とする。

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、混相流計算の高速化・大規模化に向けた、完全陽解法である格子ボルツマン法に基づく混相流解析手法の開発について述べた。格子ボルツマン法による流体解析、フェーズフィールド法による界面捕獲、個別要素法による物体計算を組み合わせた、自由界面を含む混相流の解析手法を構築した。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、提案手法が高レイノルズ数の激しい流れ場においても安定して十分な精度で計算可能であることを示した。

第 3 章「複数 GPU を用いた大規模混相流解析」では、第 2 章で提案した計算手法の複数 GPU 実装、および均一格子を用いた大規模混相流計算について述べた。GPU の階層的なメモリ構造やスレッド並列化の概念について説明し、格子計算と粒子計算の単一 GPU 実装を説明した。複数 GPU 実装では、格子ボルツマン法に対し領域分割による複数 GPU 並列化を行い、個別要素法に対しては各 GPU が全ての粒子の計算を冗長に行う方法を提案した。弱スケールリングでは、256GPU での並列化効率は約 83% であり、16GPU に対して 13.3 倍の実行性能を達成した。複数 GPU を用いた噴流層や流木を含む津波流などの混相流の実問題に対する大規模計算を実行した。

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、格子ボルツマン法への AMR 法の実装および AMR 法の複数 GPU 計算について述べた。木構造に基づく細分化を行い、木構造の末端であるリーフに均一格子のブロックを割り当てる。複数 GPU 実装では、空間充填曲線であるモートン曲線を用いた領域分割を行い、各 GPU に割り当てられるブロック数を均一にする動的負荷分散を実装した。固定された細分化格子での弱スケールリングでは、8GPU から 128GPU で 98% 以上の並列化効率を達成し、演算と通信のオーバーラップにより実行性能を 1.37 倍に向上した。一方、動的な格子細分化・粗大化を行う場合、GPU 数の増加に伴う格子生成に要する時間の増加が確認でき、木構造の処理や負荷分散に関しての並列化が必要であることを明らかにした。

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計算手法であるマルチフェーズフィールド法を用いた領域分割手法について述べた。マルチフェーズフィールド法では表面積が最小化された結晶組織が得られるため、結晶組織に基づき細分化格子を分割することで、小領域の表面積を小さくし通信量を削減できると考えた。提案手法は各 GPU の負荷バランス誤差を 5% 以下に保ちつつ、通信コストをモートン曲線の約 80% に削減することに成功した。

第 6 章「結言」では、各章の内容をまとめ、GPU スパコンを用いた混相流の直接シミュレーションを高効率に実行するための計算手法を提案し、大規模並列計算により混相流の詳細な解析が実現可能であることを示したことが本論文の結論である。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ (T2R2) にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)  
Doctoral Program

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	渡辺 勢也		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	青木尊之 教授	
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)		

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

Multi-phase flows appear in various fluid phenomena such as fluidized beds, debris flows, and tsunamis. In multi-phase flow simulations, high-resolution grids are required to capture phenomena at free-surfaces and object surfaces. Therefore, multi-phase flow simulations require huge computational cost and memory usages. This research aims to develop a simulation method to realize large-scale multi-phase flow simulations using the lattice Boltzmann method and multiple GPUs. By introducing the adaptive mesh refinement (AMR) method which adapts high-resolution grids to the free-surface and the object surface to the lattice Boltzmann method, the number of lattice points can be greatly reduced. In the calculation of the AMR method, the spatial distribution of computational load changes in time, therefore the number of lattice points assigned to each GPU is kept equal by dynamic domain partitioning using a space-filling curve. In the weak scaling measurement on locally refined meshes, 98% parallel efficiency is achieved when scaled from 8 GPU to 128 GPU, and the performance is improved 1.37 times by overlapping calculation and communication. On the other hand, in the performance measurement of the dynamic AMR method, it is confirmed that the time of the mesh generation process increases as the number of GPUs increases. In order to realize larger-scale AMR applications, it is necessary to parallelize the mesh generation process. In addition, in order to reduce the communication cost between GPUs, the domain partitioning method based on the multi-phase-field method are presented. As examples, large-scale multiphase flow simulations such as a spouted bed and a tsunami including driftwoods are demonstrated using multiple GPUs on the TSUBAME supercomputer. Large-scale multiphase flow simulations are realized by the lattice Boltzmann method with the AMR method on a GPU system.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).