

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	適合細分化格子法を導入した格子ボルツマン法による複雑形状物体周りの複数GPUを用いた空力解析
Title(English)	
著者(和文)	長谷川雄太
Author(English)	Yuta Hasegawa
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11123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11123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

(博士課程)

## 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	長谷川 雄太	
		氏名	職名	氏名	職名
論文審査 審査員	主査	青木 尊之	教授	長崎 孝夫	准教授
	審査員	奥野 喜裕	教授		
		末包 哲也	教授		
		肖 鋒	教授		

### 論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「適合細分化格子法を導入した格子ボルツマン法による複雑形状物体周りの複数 GPU を用いた空力解析」と題し、7 章から構成されている。

第 1 章「緒言」では、研究背景として空力解析に求められる乱流計算は計算機性能の向上とともに RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation) から高精度計算が可能な LES (Large Eddy Simulation) へと変わりつつあることを述べている。必然的に大規模計算になり、高性能演算プロセッサである GPU (Graphics Processing Unit) を用いたスパコンを利用することの有用性と、物体近傍に高解像度格子を配置することの必要性を示している。LES に基づいた大規模計算による空力解析を効率的に行う方法の開発と、実問題での実証を研究目的とすることを述べている。

第 2 章「格子ボルツマン法および適合細分化格子法」では、空力解析に用いる格子ボルツマン法の計算において、木構造アルゴリズムを用いた適合細分化格子法を導入する方法を提案している。キャビティ流れやチャネル乱流などのベンチマーク計算において、提案する手法が単相の非圧縮性流れを精度よく計算できることを確認している。

第 3 章「単一 GPU 計算の実装と高速化」では、単一 GPU による計算の実装方法と高速化について述べている。木構造を用いる適合細分化格子法において、末端のリーフに割り当てる計算格子点数が少ないと GPU 計算では高い性能が引き出し難いこと、リーフの境界部分の外殻格子は隣接格子へのアクセスパターンが複雑になっていることから、内部格子を計算するカーネルと外殻格子を計算するカーネルに分離し、外殻格子点数を削減するために 8 分木構造の 1 段上のノードにも格子を割り当てるマザーリーフ法を提案している。さらに本論文で用いている D3Q27 型格子ボルツマン法の場合は隣接格子へアクセスパターンが外殻格子では 702 通りに分類されることを示し、計算速度を低下させる条件分岐を無くすために 702 通りの GPU カーネル関数の作成が必要となり、生産性や保守性の観点から C++テンプレートにより GPU カーネル関数の自動生成をコンパイル時に行い、これらにより 17.8 倍の高速化を達成している。

第 4 章「複数 GPU 計算の実装」では、高速化が望まれる大規模な空力解析に対して、複数 GPU を用いて計算するための方法とその実行性能について述べている。計算領域をほぼ同じ計算負荷になるように領域分割することが最も重要であり、アコーディオン曲線とヒルベルト曲線を組み合わせた独自の空間充填曲線を用いることを提案し、同じ格子点数を含む線分に切断することで計算負荷が均一な領域間通信の少ない領域分割を行うことができることを示している。複雑形状を含む計算に対し、8 GPU から 128 GPU において理想的な実行性能の 72.8% という実用上十分な性能を達成している。

第 5 章「球周りの流れの大規模計算によるドラッグ・クライシスの再現計算」では、検証計算として本研究で開発した空力解析コードを球周りの非圧縮性流れの解析に適用している。球の近傍に直径の 1/1000 サイズの格子を割り当て、本学のスパコン TSUBAME2.5 の 64 GPU を用いて計算することにより、球にかかる抗力が高レイノルズ数領域で急激に低下するドラッグ・クライシスを再現することに成功している。

第 6 章「自転車競技における集団走行の大規模空力解析」では、本手法のスポーツ工学への適用として自転車競技の空力解析を行っている。単体走行および 4 人の集団走行の計算では、実験値と比較して十分妥当な結果が得られていることを確認している。8 人の集団走行の計算では、縦 1 列に並ぶ配置は集団全体への抗力を下げる点で有利であるが、ある特定の選手への抗力を下げるには、ひし形配置のように横に広がる配置が有効であることを示し、8 人の 2 集団が前後に並んだ場合には、前方の集団がひし形配置になると後方の集団に対して風除けの効果を示すことなどの知見が得られている。また、72 人の集団に対する 22.3 億格子点を用いた大規模計算が 192 GPU を用いて約 4 日で計算できることを示している。これまで RANS でしか行われていない大規模な集団走行の解析に対して LES に基づく解析を初めて実現し、本手法の大規模空力解析への有用性を示している。

第 7 章「結言」では、本研究の結論として、乱流を伴う流れに対して格子ボルツマン法に基づいた空力解析を行い、適合細分化格子法の導入と複数 GPU 計算による高速化を行い、これらの手法の有用性を示すことができたことについて述べている。

これを要するに、本論文は格子ボルツマン法に基づいた LES 計算による大規模な空力解析を実現するために、物体近傍に高解像度格子を割り当てる適合細分化格子法を導入し、GPU 計算による高速化の方法を開発し、自転車競技という実問題へ適用することにより実用上十分な精度および計算性能を達成したことを明らかにしている。これまで主に RANS で行われてきた空力解析に対し、実用問題に対しても LES 計算が可能であることを示したことは、空力解析の高度化に対する新しい指針を示すものである。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として十分価値あるものと認められる。

注意: 「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポータル(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。