

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)	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	長谷川 雄太		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main) 青木 尊之
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)

### 要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

複雑形状の物体周りの高精度な空力解析を目的として、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数 GPU を用いた大規模計算のシミュレーション・コードを開発した。第 1 章では、研究の背景及び目的について述べた。第 2 章では、本研究で用いる数値計算手法として適合細分化格子法を導入した格子ボルツマン法について述べるとともに、いくつかの検証計算を実施した。2 次元キャビティ流れ、3 次元球周りの流れおよび平行平板間乱流の検証計算により、本手法が単層非圧縮流れを妥当に計算できていることを確認した。第 3 章では、格子ボルツマン法に適合細分化格子法を導入した単一 GPU 計算の実装と高速化手法について述べた。適合細分化格子のリーフに割り当てられる格子点数は等間隔直交格子に比べて少ないため、GPU で効率的な並列計算を行うことが難しい。特に、リーフの境界部分にある外殻格子は隣接参照のために他のリーフの格子を参照する必要があり、アクセスパターンが悪く高い実行性能が出ない。外殻格子点数を削減するため、Octree の 1 段上のノードに格子を割り当てる「マザーリーフ法」を提案し、外殻格子計算で 1.96 倍、全体で 1.78 倍の高速化を達成した。さらに、外殻格子計算では隣接格子へのアクセスパターンを適切に分類して実装する必要があるが、D3Q27 格子ボルツマン法による 3 次元計算の場合、リーフの外殻格子のアクセスパターンは 702 通りになり、すべてのパターンを手動で列挙して実装することはプログラムの生産性や保守性の観点から現実的でない。これまで格子ボルツマン法や適合細分化格子法には適用されていない「C++テンプレートによる GPU カーネル関数生成」の方法により、実行性能の低い外殻格子計算を 2.29 倍に高速化し、全体でも 1.86 倍の高速化を達成した。第 4 章では、適合細分化格子法を導入した格子ボルツマン法の複数 GPU 計算の実装およびその計算性能について述べた。直方体形状の計算領域を取る Forest-of-octrees 構造において、アコーディオン曲線と Hilbert 曲線を組み合わせた独自の空間充填曲線を用いることで、空間局所性の高い領域分割法を導入した。また、袖領域通信の最適化を行い、最適化前に比べて MPI 通信の通信時間を 20.9%まで大幅に削減した。複数 GPU 計算の弱スケーリングは、自転車のような複雑形状を含む計算条件において 8 GPU から 128 GPU のスケーリングにおいて効率 72.8%と、実用上十分な性能であった。第 5 章では、応用計算のひとつとして球周りの流れにおけるドラッグ・クライシスの再現計算を行った。計算資源の問題から困難とされていた、 $Re > 10^5$  オーダーの高レイノルズ数条件下で抗力が急激に低下するドラッグ・クライシスという現象について、本計算で実装した複数 GPU を使い、球の直径に対して 1000 格子を割り当てる高解像度の大規模計算により、現象の再現に成功した。複数 GPU の大規模計算により、球の直径に対して 1000 格子という極めて細かい解像度の計算を実施でき、ドラッグ・クライシスという高レイノルズ数かつレイノルズ数依存性の高い難問を解くことが可能になったことから、本手法の有用性を示すことができた。第 6 章では、本手法のスポーツ工学への応用事例として、細分化格子法を導入した格子ボルツマン法に基づく大規模 LES 計算により、自転車競技の単体走行および集団走行の空力解析を実施した。単体走行および 4 人の集団走行の検証計算を行い、実験値と比較して本手法の妥当性を確認した。応用計算として、集団の形状や 2 集団の間の距離などの条件を変えていくつかの計算を行った。8 人の集団走行の計算では、集団全体の抗力は縦 1 列に並ぶ縦列配置がよいが、ある特定の選手の体力を温存させる目的で同選手に掛かる抗力を最小化したい場合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た。2 集団が前後に並んだ条件の計算では、前方の集団は後方の集団に風除けとして利用されるおそれがあること、前方の集団がひし形配置を採ると風除けの効果が増大し後方の集団に有利になってしまうことなど、いくつかの知見が得られた。上記のすべての計算は 64 GPU 以下かつ 5 日以内と実用上十分な資源で実行できた。また、72 人の集団の大規模計算を、22.3 億格子・192 GPU で行い、約 4 日で計算を完了した。このように大規模並列計算においても実用上十分な性能で計算を行うことができるため、本手法は数十人から百人規模の選手を含むペロトン集団の空力解析への応用も可能である。これらにより、これまで主に RANS で解析が行われてきた自転車競技の集団走行の解析について、LES に基づく計算としては初めてこれを実現し、本手法の実用空力解析への有用性を示した。第 7 章では、本研究のまとめと結言を述べた。

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).

(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)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	( 工学 )
学生氏名： Student's Name	長谷川 雄太		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	青木 尊之
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)	

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words )

In this thesis, a multi-GPU code of lattice Boltzmann method with adaptive mesh refinement was developed to realize the large-scale aerodynamics simulations for complex shape boies. Chapter 1 is the introduction, which describes the background and the aim of this study. Chapter 2 describes the numerical method used in this study; that is, lattice Boltzmann method (LBM) with the collision operators such as multiple-relaxation-time (MRT) or cumulant model, adaptive mesh refinement (AMR), and large eddy simulation (LES) using coherent-structure Smagorinsky model (CSM). Chapter 3 describes the implementation and optimization of single GPU computation. Chapter 4 describes the implementation and optimization of multi-GPU computation. The multi-GPU code achieved 72.8% efficiency in weak scaling from 8 GPUs to 128 GPUs. Chapter 5 shows a large-scale simulation of a flow past a sphere at drag crisis. The high-resolution mesh which is one-thousands of the sphere diameter is employed to resolve the boundary layer on the surface of the sphere. With such high-resolution mesh, the simulation reproduced the drastic decreasing of drag coefficient around  $Re > 10^5$ . Chapter 6 shows large-scale aerodynamics simulations of racing bicycles. The simulations treat some bicycle groups 72 cyclists. The largest scale simulation treated 72 cyclists by using 2.23 billion mesh points, 192 GPUs parallel computing, and took about 4 days for the calculation. These resources are enough acceptable to perform the application simulation, so it was shown that the code developed in this study seems to be useful for analyzing the real aerodynamics problems. These simulations also claim the possibility of LES calculation for the aerodynamics of racing bicycles, which was traditionally analyzed by RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes simuation). This indicates the expectation of future progress in aerodynamics. Chapter 7 is the summary and conclusion of this study.

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).