

令和 3 年 6 月 25 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11323

研究課題名(和文) GPUクラスタ環境における固気液多相熱流体の乱流解析と高速分散可視化

研究課題名(英文) Multiphase thermal and turbulent flow simulation with fast distributed visualization in GPU cluster environment

研究代表者

安藤 英俊 (Ando, Hidetoshi)

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号：50221742

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では安価で電力あたりの計算性能に優れるGPU(Graphics Processing Unit)を用いたクラスタ環境を構築し、その上で固体・気体・液体の混在する固気液多相の熱流体解析において新たに乱流解析を導入するとともに、計算結果の高速分散可視化を実現するための手法を開発した。従来熱流体解析では取り扱うことが困難であった熱輻射計算のために、GPU上でのフォトンマッピング法を拡張し、高速かつ高精度な熱輻射計算を実現した。さらに深層学習技術を組み入れることにより数値計算の高精度化および可視化した際の画像の高精細化を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱流体解析は気象予測や空調設計、原子炉の冷却設計そのほか社会的に重要な様々な分野で必須の技術であり、この研究成果によりGPUという安価なハードウェアを用いて高精度な固気液多相の熱流体解析と可視化を可能にした。GPUは熱効率も高く環境への負荷も小さい計算機資源であり、本研究の成果がエネルギー資源を節約する効果も期待できる。ここで用いられた深層学習技術や高速数値計算技術も個別に様々な分野に広く応用可能であり、生命科学や医学分野での共同研究も進めており、学術的な意義も大きい。さらに個別の分野での学術的な発展の成果を本研究の手法に組み込むことも可能であり、今後の大きな相乗効果が期待できる。

研究成果の概要(英文)：This study constructed a cluster environment using GPU (Graphics Processing Unit), which is inexpensive and has high computational performance per unit of power. It introduced turbulence analysis for solid-gas-liquid multiphase thermo-fluid analysis. In addition, we have developed a method for high-speed distributed visualization of calculation results. For thermal radiation calculations, which have been challenging to handle in conventional thermo-fluid analysis, we have extended the photon mapping method on GPUs to achieve fast and accurate thermal radiation calculations. In addition, by incorporating deep learning technology, we have achieved higher accuracy in numerical calculations and higher resolution images in visualization.

研究分野：高性能計算，可視化，機械学習，画像処理

キーワード：GPU 熱流体計算 深層学習 可視化

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究では安価で電力あたりの計算性能に優れる **GPU(Graphics Processing Unit)**を用いたクラスタ環境を構築し、その上で固体・気体・液体の混在する固気液多相の熱流体解析において新たに乱流解析を導入するとともに、計算結果の高速分散可視化を実現する。

(2) 今日では **GPU** は計算性能と電力効率の良さから有望な計算資源として注目されており、電力あたりの演算性能を競う **Green500** でも常に上位を占めている。2017年6月版では1位～6位を **GPU** 搭載機が独占しており、そのうち1位から4位までが日本で稼働している。特に震災以降の日本では電力消費への意識が高く、低炭素社会を実現するためにも **GPU** は極めて有力な並列計算資源とみなされている。そのため **GPU** 上で高速に実行可能な計算手法の開発は以前にも増して重要な意義を持っているが、それを実現できる研究者は限られている。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、日常生活に於いて非常に有用となる固体と気体と液体が混在する固気液多相の環境において熱流体解析を高速かつ高精度で安定的に実行出来る手法を開発することである。高速化のために大規模並列演算装置である **GPU** を活用し、高精度化のために動的な解適合格子 **AMR(Adaptive Mesh Refinement)**に基づく **LES(Large Eddy Simulation)**を導入する。熱流体解析においては温度勾配の大きな状況では特に格子を細かく取る必要があるが、**GPU** の限られたメモリ上で可能な限り高精度な計算を実現するためには **AMR** が必要となる。

(2) さらに固体周辺の速度変化の激しい部分には乱流が発生し、これが熱伝達に非常に大きな影響を及ぼすことから乱流解析 **LES** も必要となる。これらの計算結果を高精細に可視化するために本来グラフィックス用ハードウェアである **GPU** の能力をフルに活用する。

(3) 本研究における核心をなす学術的問いは、汎用演算装置である **CPU** と比較して果たして **GPU** 上ではどこまで複雑で難しい処理を効率的にこなすことが出来るようになるのか。さらに **GPU** の本来得意とするグラフィックス処理を活かすことにより、どのような新しい付加価値を社会にもたらすことが可能となるかを突き詰めたいということである。

### 3. 研究の方法

(1) 熱流体解析の重要な要素として熱輻射の計算があるが、従来はに空間を面要素に分割し、形態係数を求めて計算していた(ラジオシティ法)。我々はより高精度な熱輻射の計算法として、グラフィックス技術として知られるフォトンマッピング法を拡張する。ここでは熱放射束を粒子的に扱い、熱源からの反射・屈折・吸収等を緻密に計算する。レンズや曲面鏡によるシャープな集光現象を再現可能で、従来よりもはるかに高精度な輻射計算を **GPU** 上で高速に実現する。

(2) 上記で拡張するフォトンマッピング法は計算結果の可視化にも利用するが、高精細な画像を得るためには非常に高い計算負荷を必要とする。そこで可視化画像の高精細化のために最新技術である深層学習を用いる。

(3) 現在までの成果により固体も含めた固気液多相の熱流体解析が可能となった。熱流体によって生じる乱流をさらに高精度に解析するために、動的に変化する格子に基づく **AMR** と **LES** を **GPU** 上で効率的に実装する。これによって世界で初めて **GPU** 上での固気液多相の熱流体環境における高精度な乱流解析を実現する。

### 4. 研究成果

(1) フォトンマッピング法の拡張による熱輻射の実装と評価は、すでに過去の研究成果として実際に **GPU** 上で高速に実行可能なフォトンマッピング法を実装していたため、初期の熱輻射計算の実装は比較的容易に行えた。また計算の効率化のためのデータ構造の工夫、様々な物性値に基づく鏡面反射・拡散反射・屈折・吸収等を扱うためのデータ構造と処理方法について検討した。これにより **CG** のための可視化分野における **RGB** 表現と、熱輻射も含めた計算のための情報の統合を実現した。(図1) そのためにフォトンマッピン

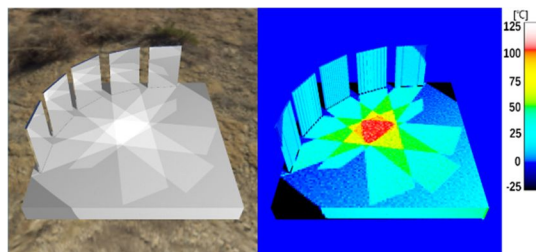


図1：写実的可視化(左)と輻射計算(右)

グ法の最小限の拡張で高精度な熱輻射計算が可能となり、理論計算可能な場合と比較して計算結果の十分な一致も確認できた。

図2は本研究で開発したフォトンマッピング法に基づく輻射計算の精度が、シミュレーション時間ステップの細かさによりどのように変化するかを評価したグラフである。上図が時間ステップを $20 \times 10^{-6}$ [sec]、下図が $5 \times 10^{-6}$ [sec]としたもので、オレンジ色が計算結果、青色が理論値である。ともに理論値に沿った計算結果となっているが、時間ステップを細かく取った方がより高い精度で計算結果が理論値と一致していることが確認できる。これ以外にも熱源から放出するフォトンの数を増やすことなどでも精度の向上がかわりであり、どの程度の計算精度が要求されるかによって適切にパラメータ調整が可能であることを示している。

その後さらに最新GPUアーキテクチャへの対応を更に進めた。さらにモンテカルロ法的な乱数発生方法についても工夫を行ったため、効率よく高精度な計算を実行することが可能になった。

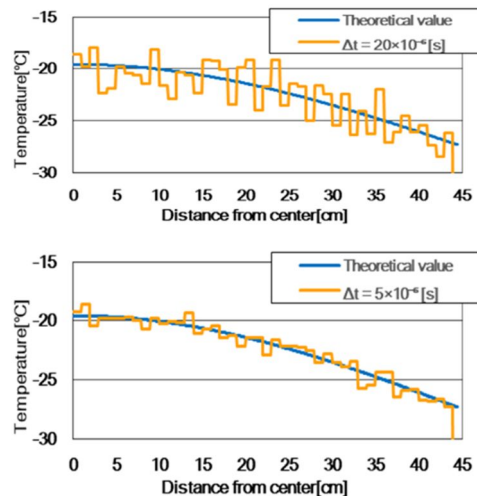


図2：輻射計算の時間ステップによる精度比較

(2) 本研究の分担者である鳥山の担当分として、まずAMRとLESのGPU実装について最新手法の実装検討を行い、2次元空間内での初期的な実装と検討を行った。AMRは適合型格子となるが、当初のフォトンマッピング法による熱輻射計算では均一な格子を用いていた。最終的なフォトンマッピング法との統合を念頭に、格子表現の統一化も含めて十分な検討を早い段階からしてゆく必要があることが確認された。その後上記のように拡張された熱輻射計算をAMRとLESのGPU実装と組み合わせることで、GPU上での高速で高精度な伝熱と乱流解析の統合を目指した。基本的には並行して開発を進めてきた両手法であり、それぞれに独自の適合型格子を持つ構造になっていた。これは流体計算における密度分布に基づく適合型格子と、フォトンマップによる熱輻射計算の際のフォトンの密集具合に基づく適合型格子では、空間的な粗密具合が必ずしも一致しないためである。双方の事情を考慮して新たな基準に基づく適合型格子を導入することで、同じシミュレーション空間を共有して効率的な計算が可能となることが確認された。

(3) 深層学習の導入による高精細な可視化については、他分野との共同研究の成果として深層学習を用いた超解像技術を開発していたため、それをベースとしながらさらに最先端技術を取り入れて改良した。さらに本研究独自の数値計算の際に用いる様々な物理量を併用することで、従来の超解像技術にない高精度化のアプローチを取ることが可能になった。これにより一般的な超解像技術を用いるよりも高精度な、多層流体計算に特化した数値シミュレーションの超解像化を可能とした。このためには一般的な画像のための高性能な超解像手法を基礎として、その入力を自然に拡張する形で実装することができる。そのため今後は基礎となる超解像手法が進歩すれば、非常に容易にその恩恵を活用することが可能であるという利点もある。ただし深層学習の数値シミュレーションへの適用には大きな変化が起きており、従来のシミュレーション手法の中での計算精度向上のみならず、深層学習によって計算結果を直接推定する研究が近年急速に発展している。まだ計算精度には問題があるものの計算時間自体を大幅に短縮できるという大きな利点があるため、まずは初期値の予想に用いることから始め、計算精度自体の向上を目指すのが正しい方向である。本研究の計画当初には存在しなかった技術潮流であるが、今後この分野に大きなインパクトを与えることと考えられる。

(4) 最終年度にはGPU実装について様々な改良・拡張を行った。熱輻射の実装については2020年に登場したNvidia社のAmpereアーキテクチャに基づく最新型GPUにおいて導入された最新のTensor Coreを活用し、大幅な高速化を目指した。本来は開発と実験用に複数のGPUを入手して進める予定であったが、全世界的に深刻なGPU不足となり、1枚入手するのがやっとであった。最新のTensor Coreは性能が大幅に向上しており、これを効率的に活用することで本手法の高速な実装が可能となることが確認された。ただし残念ながら浮動小数演算における丸め誤差が発生することが確認されており、そのため期待された精度向上の達成は困難であった。今後ファームウェアの更新などによって状況が改善されることを期待したい。それ以外に熱輻射部分については新しいRTCoreによりフォトンマッピング法が高速化できることが確認された。これはフォトンマッピング法の基本となるフォントレースを高速化するものであり、熱輻射計算の高速化と高精度化に大きく貢献できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Hidetoshi Ando
2. 発表標題 A VR/AR-based training system for grapes thinning with AI coaching
3. 学会等名 2019 International Conference for Top and Emerging Computer Scientists (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島啓太, 安藤英俊, 山村英樹, 早川正幸
2. 発表標題 人工知能を用いた放線菌コロニー自動識別システムの提案
3. 学会等名 第34回(2019年度)日本放線菌学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 香村恵介, 安藤英俊, 山北満哉, 山田悟史, 宮崎彰吾, 安藤大輔, 大岡忠生
2. 発表標題 AIを活用した子どもの動作発達評価の可能性
3. 学会等名 第74回日本体力医学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中澤翔太, 安藤英俊
2. 発表標題 VRを用いた果樹ぶどうの摘粒指南システムの開発
3. 学会等名 第24回バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taiyo Suzuki, Hidetoshi Ando and Koji Toriyama
2. 発表標題 High precision computation of radiative heat transfer based on photon mapping method on GPU
3. 学会等名 The 29th International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木 太陽, 安藤 英俊, 鳥山 孝司
2. 発表標題 GPU上でのフォトンマッピング法を用いた高精度熱ふく射計算
3. 学会等名 第23回計算工学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Fuminori Amemiya, Koji Toriyama
2. 発表標題 The Heat and Flow Characteristics in The Polyethylene Tube Placed Over Metal Rods Set for Agricultural Greenhouses
3. 学会等名 30th Internatlional Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Endo, Koji Toriyama, Takumi Ono
2. 発表標題 Development of D-Lif Method Using One Fluorescent Dye
3. 学会等名 30th Internatlional Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daisuke Kokui, Koji Toriyama, Shigeru Tada, Koichi Ichimiya, Shumpei Funatani, Jae-hoon Kwon
2. 発表標題 Effects of Elevation Angle on Measurable Range of Temperature Distribution Measurement Method Using Thermo-Chromic Liquid Crystal
3. 学会等名 30th International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fuminori Amemiya, Koji Toriyama, Takuya Kobayashi
2. 発表標題 Heat and flow characteristics of water with air-injection on polyethylene tube for various tube widths placed over metal rods set
3. 学会等名 16th International Heat Transfer Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daisuke Kokui, Koji Toriyama, Shigeru Tada, Koichi Ichimiya, Shumpei Funatani
2. 発表標題 Temperature distribution measurement using ratio of scattered light intensities from thermo-chromic liquid crystal: Uncertainty evaluation
3. 学会等名 16th International Heat Transfer Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Huihuang Cai, Qing Wu, Hidetoshi Ando, Ren Watanabe
2. 発表標題 Automatic Counting of Follicles in Neonatal Mice Ovarian Section Images by Using Deeplabv3+
3. 学会等名 2020 International Conference on Cyberworlds (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松尾恭汰, 安藤英俊, 玉田大輝, 舟山慧, 大西洋
2. 発表標題 Generative Adversarial Networkを用いた合成FLAIR画像の生成
3. 学会等名 第48回日本磁気共鳴医学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中島 啓太, 安藤 英俊, 山村 英樹, 早川 正幸
2. 発表標題 人工知能を用いた放線菌コロニーの自動識別
3. 学会等名 第33回 日本放線菌学会大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 染色画像生成システム、染色画像生成方法および、染色画像生成プログラム	発明者 安藤英俊	権利者 国立大学法人山梨大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-022917	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 情報処理装置、プログラム、情報処理方法、及び医療システム	発明者 安藤英俊, 大西洋, 斎藤正英	権利者 国立大学法人山梨大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-130915	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 コロニー識別システム、コロニー識別方法およびコロニー識別プログラム	発明者 山村 英樹, 安藤 英俊, 早川 正幸	権利者 国立大学法人山梨大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-145688	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	鳥山 孝司  (Toriyama Koji)  (50313789)	山梨大学・大学院総合研究部・准教授    (13501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関