

平成 30 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：2015～2017

課題番号：15K00167

研究課題名(和文) GPU-CPU連成クラスタにおける固気液多相の熱流体計算の高速化と分散可視化

研究課題名(英文) Fast Numerical Simulation and Distributed Visualization of Gas-Liquid-Solid Multiphase Thermal Flow on GPU-CPU Cooperating Cluster

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：GPUとCPUが連携しながら計算を効率的に分担し、CPU側のメモリ空間をGPU側から効率よく利用することで小規模クラスタにおいても可能な限り大規模計算に対応する仕組みを考案した。その結果従来の単一GPU上で実行した場合よりも大幅に細かい格子でのシミュレーションが可能となるとともに、GPUとCPU間の通信の遅延を隠蔽することで計算時間の遅れを最小限に留めることができた。実装された固気液多相の熱流体計算によって様々な工学的なシミュレーションが可能となることが示された。またGPU上でのフォトンマッピング法を用いた先進的分散可視化と高精度な熱輻射計算の実現にも成功した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a method where GPU and CPU effectively cooperate to achieve large-scale computation under small size GPU cluster, by using CPU side of memory from GPU. Proposed method realized fluid simulation using higher resolution grid while minimizing data communication delay between GPU and CPU. Experiments showed our implementation of multiphase thermal flow computation could handle various thermal flow simulations under many different kinds of situation. We have introduced the photon mapping method for advanced distributed visualization, and also for highly accurate thermal radiation computation.

研究分野：GPUコンピューティング

キーワード：高性能計算 可視化 多相流体シミュレーション GPU

1. 研究開始当初の背景

高速化が頭打ちとなりつつある CPU に代わる新たな計算資源として GPU(Graphics Processing Unit)が近年非常に注目されている。大規模な GPU クラスタも国内外で続々構築されており、2014 年の段階でスパコンの演算性能ランキングの代表格である TOP500 では 2 位と 6 位が GPU クラスタであった。GPU は CPU と比較して絶対性能に優れるだけでなく消費電力当たりの演算性能も圧倒的に優れており、それを比較した Green500 では上位 15 位までが全て GPU クラスタであった。日本においては低酸素社会を実現するためにも、GPU クラスタは有力な並列型計算資源であり、その構成法と GPU クラスタ上で高速に実行可能な計算手法の開発は以前にもまして重要な意義を持っている。

近年 GPU 上には様々な数値計算手法が構築されてきているが、工学分野で有用な流体シミュレーションにおいては特に固気液多相流体シミュレーションが重要である。GPU 上での固気液多相流体シミュレーションについては、優れた計算スキームの設計や GPU 上での効果的な実装が困難な問題の一つである。

2. 研究の目的

本研究では現在までに GPU の特性を最大限に活かし、多相流体計算において単精度浮動小数点数を用いた場合にも倍精度演算と同等の極めて高い体積保存性と計算安定性が得られた。これを含めた現在までの GPU 上での流体計算と可視化の研究成果を踏まえ、以下の項目について研究を行う。

(1)従来の気液二相流による津波やダム決壊のシミュレーションのみならず、震災時に目撃されたような車両や家屋等の流される固体の運動も考慮する事が可能となった。研究期間内にはこれを大規模化すると共に伝熱現象も含めて計算し、固気液多相の熱流体計算へと発展させる。これにより相変化を伴う多相の熱流体シミュレーションが可能となる。

(2)固気液多相流体計算のための高速・高精度で安定な計算スキームの開発と GPU-CPU 連成クラスタへの最適化を行う。現状では GPU と CPU は PCI-Express バスを介して接続されるため、GPU-CPU 間でのデータ転送が常にボトルネックとなっており、GPU から CPU 側の広いメモリ空間にアクセスするのに時間を要するため大規模化に支障がある。2016 年に登場する GPU では CPU との接続に専用の高速インタフェース NVLink が導入されるため、データを基本的に CPU 側の広いメモリ空間に置いた状態での計算が現実的となり、計算の大規模化が容易になり、CPU と GPU の役割分担が従来と変わる。本研究の代表者が世界で初めて GPU 上に実装した MGCG 法や、GPU の苦手とする逐次

的な ILU(0)前処理の効率的な実装方法も新しい GPU-CPU 連成クラスタ向けに最適化し、固気液多相の熱流体計算に適した反復計算法を開発・評価する。

(3)本研究ではクラスタの各ノード内 GPU で計算から分散可視化までを行い、作成した画像を GPU 上で圧縮した後にネットワーク上で転送して統合する。高品質で高速な分散可視化のための圧縮手法の開発と最適化を目指す。

3. 研究の方法

これまでの研究成果として GPU 上で高い計算精度と計算安定性を兼ね備えた固気液多相流体の計算スキームを構築した。この優れた成果を拡張する形で、1)固気液多相の熱流体計算への発展、2)基礎的数値計算手法の発展、3)分散可視化手法の高度化を行ってゆく。初年度には既設の 8 ノード程度の GPU クラスタを用いて開発と評価を行なってゆき、翌年度の新 GPU 登場時に NVLink に対応する部品を購入して GPU-CPU 連成クラスタを構築する。

計算スキームの基本的な設計や計算手法の評価については、計算時間と通信時間のオーバーラップによる隠蔽効果等を十分に検討した上で GPU クラスタ上での分散環境での実装・評価へと移行してゆく。可視化手法と高速画像圧縮による転送時間の短縮についても同様に、単一 GPU・複数 GPU 環境での評価の後に GPU クラスタ上へと展開してゆく。

4. 研究成果

平成 27 年度は、固気液多相流体シミュレーションのうち固体の表現方法と計算手法の再検討、GPU 上での効率的な実装方法の開発、固気液多相流体シミュレーションの統一した計算手法への対応の検討、分散可視化における動的負荷分散の導入、を行ってゆく計画であった。

このうち固体の表現については固体の変形に対応するための有限要素法の導入の検討と、固体専用の座標系を別途用いることによる数値計算上の誤差の累積の排除を行った。有限要素法の計算の中には比較的逐次性の高い処理があるため、この部分を CPU 側で担当し、その間に GPU は別の並列度の高い計算に取り組むような実装の検討を行った。さらに熱流体解析へ発展させるための伝熱計算を導入した。これにより従来よく用いられていた温度と密度の線形近似ではなく、高精度な計算が可能となった。また小規模な GPU クラスタ構成でも大規模計算が可能となるように、限られた容量の GPU メモリだけでなく CPU 側のメモリを活用する手法を導入し、計算中にデータを移動させることで演算装置を有効活用する手法を考案した。具体的に MGCG 法においてホスト側のメモリを使用する実装を行い、データ転送による遅

延を評価した。従来の手法では単一の GPU では格子数 256^3 程度での計算が限界であったが、今回の実装により格子数 600^3 まで計算が可能となった。また、ホストメモリとの転送時間の隠蔽を行った。隠蔽ができなかった転送時間は 1 反復あたりの実行時間の 1% 程度の時間であり、高い隠蔽率を達成した。さらに統一的な計算手法については格子法をベースとして従来から開発を継続している手法を拡張することで、固気液多相の熱流体計算に統一的に対応可能であることを確認した。可視化における動的負荷分散については分散レイトレーシング法をベースとしてフォトンマッピング法に拡張する手法を検討した。また動的負荷分散の効果的な実装方法も設計し、これを GPU 上で高速に実行するために Nvidia が提供している OptiX ライブラリでの実装した。これらの項目を既存の手法に拡張する形で導入し、シミュレーションを行い、正しく動作することが確認された。

平成 28 年度は前年度に開発された手法を実装し、CPU と GPU の連成を効率的に図り、GPU クラスタ全体での効率的な計算手法を検討する計画であった。そのために、28 年度に登場する CPU と GPU をつなく新しい高速インタフェース NVLink が安価な GPU でも利用できるようになるのか、高価なシステムのみで利用可能になるのか大きなポイントであった。結局 NVLink は高価な GPU システムのみで利用可能となり、我々が目指す安価な GPU で構成されるクラスタシステムでは残念ながら使うことができなくなった。そのため CPU と GPU の効率的な連成のためには従来通り GPU のカーネル実行中に CPU 側での処理やデータ転送処理を非同期に行うことなどの方法を取ることにした。その上でより複雑な固気液多相流シミュレーションを実現するためには、複数の固体同士の相互干渉を流体の計算としてでなく、剛体同士の衝突判定および衝突応答として処理する必要があり、その効果的な実装を検討した。その際に特に多数の剛体間の衝突判定を効果的に行うためには包含立体等を用いた多段階の衝突判定方法が非常に効果的である。これは固体の数を N とした場合に衝突判定の計算量は N^2 に比例してしまうため、剛体数の増加による衝突判定の計算時間が非常に深刻になる可能性があるためである。GPU での衝突判定に適した包含立体の選定と衝突判定処理の実装を行った。

研究最終年度は今まで個別に設計・実装してきた手法を組み合わせ、全体的に効率的に固気液多相流環境での熱流体計算と可視化の実現に取り組んだ。まず GPU 上での効率的な固体間の衝突判定処理を実現した。衝突判定処理としては固体の包含形状として AABB(Axis Aligned Bounding Box)を使用

し、CPU 上および GPU 上での効率的な交差判定手法を実装して比較した。(図 1)

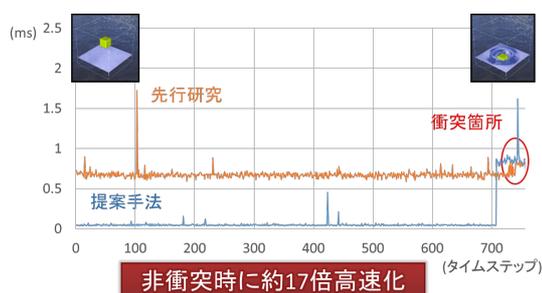


図 1：包含形状による固体間的高速交差判定

多層熱流体解析において沸騰・融解・昇華などの相変化に対応する手法の開発と実装を行ったが、特に相変化を伴う計算には界面の正確な表現が必要であることが改めて確認された。このため単一 GPU や小規模な分散計算では、小規模な物理現象のシミュレーションには十分対応可能であるものの、実用的に十分な大規模計算に対応することはメモリ容量的にも容易でないことが確認された。今後は適応型格子等の導入が重要となると考える。ただし将来的には GPU 側から CPU 側の拡張可能で大容量なメモリにアクセスすることも技術的に可能になるとも見られるため、常に最新動向を把握した上で最適な技術的選択をしてゆく必要がある。

さらに GPU を上でのフォトンマッピング法を熱の輻射計算として利用可能かどうか評価し、反射や屈折を伴う状況においても正確な輻射計算を可能とした。フォトンマッピング法は写実的可視化の手法としても有用であり、これにより GPU の強みである計算と可視化の高度な融合を実現した。(図 2)

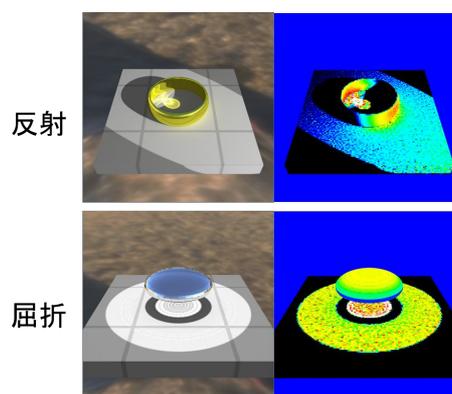


図 2：フォトンマッピング法による輻射計算と可視化

分散可視化の際には GPU 上での高速ウェーブレット変換による圧縮も実現した。これにより GPU-CPU 連成クラスタ環境での高速多相熱流体計算と分散可視化を実現した。今後はさらに計算と可視化の高度化を目指してゆく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

Takuya Kobayashi, Koji Toriyama, Shumpei Funatani, "Heat transfer and flow characteristics of water flow with air injection in polyethylene tube placed over metal rods: Influence of pitch length and tube width", Journal of Flow Control, Measurement & Visualization Vol.6, No.1, pp.1-14, 【査読有り】(2017)
DOI: 10.4236/jfcmv.2018.61001

井上瑛広, 安藤英俊, 吉澤邦夫, 上木耕一郎, 加藤広祿, 野口夏代, 川尻秀一, "口腔扁平上皮がん病理組織標本のデジタル画像による機械学習に基づくがん浸潤様式の自動判別法", Medical Imaging Technology, 第34巻, 5号, pp.279-286, 【査読有り】(2016)
DOI: 10.11409/mit.34.279

Koji Toriyama, Shigeru Tada, Koichi Ichimiya, Shumpei Funatani, Yosuke Tomita, "A New Method of Temperature Measurement Using Thermochromic Liquid Crystals (Extension of Measurable Range Based on Spectral Intensity in the Narrow-Band Wavelength)", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.92, pp.483-489, 【査読有り】(2016)
DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.002

鳥山孝司, 鈴木亘, "傾斜した加熱円管内に生じる自然対流熱伝達の数値解析", Thermal Science & Engineering, Vol.23, No.4, pp.81-88, 【査読有り】(2015)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/tse/23/4/23_81/_pdf/-char/ja

〔学会発表〕(計5件)

杉崎俊介, 安藤英俊, 鳥山孝司, "格子法ベースの固気液多相流体シミュレーションにおけるGPUに適した衝突判定手法", 第22回計算工学講演会論文集, CD-ROM, 【査読なし】(2017)

Hidetoshi Ando, Yuki Niitsu, Masaki Hirasawa, Hiroaki Tedula, Masao Yajima, "Improvements of classification accuracy of film defects by using GPU-accelerated image processing and machine learning frameworks", Proceedings of NICOGRAPH International 2016, CD-ROM 【査読有り】(2016)

丸山雅広, 安藤英俊, 鳥山孝司, "固体の相互干渉を組み入れたGPU上の格子ベース多相流体シミュレーション", 第21回計算工学講演会論文集, CD-ROM, 【査読なし】(2016)

丸山雅広, 安藤英俊, 鳥山孝司, "CPU側メモリを活用した固気液多相流体解析の大規模化", 第29回数値流体力学シンポジウム講演論文集, CD-ROM, 【査読なし】(2015)

丸山雅広, 加藤義和, 安藤英俊, 鳥山孝司, "小規模GPUクラスタ内での大規模計算化に向けたMGCG法の開発と評価", 第20回計算工学講演会論文集, CD-ROM 【査読なし】(2015)

〔産業財産権〕

出願状況(計2件)

名称:画像分類装置、画像検査装置、及び、プログラム
発明者:安藤 英俊, 平澤 昌樹, 矢島 正男
権利者:国立大学法人山梨大学, タカノ株式会社
種類:特許
番号:特願 2016-132921
出願年:平成 28 年 7 月 4 日
国内外の別: 国内

名称:分類器生成装置、画像検査装置、及び、プログラム
発明者:安藤 英俊, 平澤 昌樹, 矢島 正男
権利者:国立大学法人山梨大学, タカノ株式会社
種類:特許
番号:特願 2016-132923
出願年:平成 28 年 7 月 4 日
国内外の別: 国内

〔その他〕

<http://live.yamanashi.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)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

(2)研究分担者

鳥山 孝司 (TORIYAMA, Koji)
山梨大学・大学院総合研究部・准教授
研究者番号:50313789