

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500057

研究課題名(和文) GPUクラスタ環境での固気液多相流体計算の高速化および分散可視化

研究課題名(英文) Fast Numerical Simulation of Gas Liquid Solid Multiphase Flow with Distributed Visualization

研究代表者

安藤 英俊 (ANDO, Hidetoshi)

山梨大学・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) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：GPUクラスタ環境において固気液多相流体シミュレーションを高速かつ安定的に計算する手法を開発した。さらに計算と並行して動的に負荷分散しながら高速にレイトレーシングにより可視化する手法も実現した。さらに流体シミュレーションに伝熱現象を組み込むことにより、多相熱流体シミュレーションも実現可能とした。小規模GPUクラスタ環境においても大規模数値計算を可能とするために、ノード内のCPUメモリ上にデータを保持しつつ必要に応じてGPU側とデータ通信を行いながら計算を進める手法を開発した。データ転送時間はGPUの計算実行中に行われるために、通信による遅延はほぼ隠蔽可能となった。

研究成果の概要(英文)：We developed a fast and stable method to compute gas-liquid-solid multiphase simulation on GPU cluster environment. We also implemented distributed photorealistic visualization method based on ray tracing technique with dynamic load balancing capability. Heat transfer is also considered to realize multiphase thermal flow simulation. To run large scale numerical simulation under small size GPU cluster, a GPU computation technique using data on CPU memory with data transfer on demand is implemented. Data communication time is almost completely hidden by transferring data while running GPU kernel code.

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 流体シミュレーション GPU

1. 研究開始当初の背景

GPU(Graphics Processing Unit)は本来コンピュータグラフィックスの高速化装置であるが、高速化が頭打ちとなった CPU に代わる新たな計算資源として近年非常に注目されている。大規模な GPU クラスタも続々構築されており、スパコンの演算性能ランキングの代表格である TOP500 では上位 5 位のうち 3 つが GPU クラスタである。また 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優れており、それを比較した Green500 でも上位 5 位のうち 3 つが GPU クラスタである。特に震災以降の電力供給に不安のある日本において、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。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多相流体シミュレーションが重要である。GPU 上での多相流体シミュレーションについての成功例は少なく、優れた計算スキームの設計や GPU 上での効果的実装が困難な問題の 1 つである。

2. 研究の目的

本研究では高性能で安価な並列演算装置として近年世界的に注目されている GPU 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流体の並列数値計算および計算結果の高速分散可視化を行うための手法を開発する。多相流体計算は工学的分野で特に重要であるが、現行では GPU クラスタ環境では気液二相流計算の研究が行われている程度で、固体を含めた多相流体計算スキームの設計及び実行評価の例はない。

本研究の代表者は CIP 法・MGCG 法・並列 ILU(0)前処理・VSIAM3 などの先端的な計算手法を常に世界に先駆けて GPU 上に導入してきた。GPU の特性を活かした先端的な計算手法の開発、可視化技術の開発、画像圧縮と分散可視化を高度に融合させて新しい GPU コンピューティングのあり方を提案する。本研究の成果として開発される GPU クラスタ環境での高速な固気液多相流体計算と分散可視化によって災害シミュレーションが高度化されるだけでなく、熱流体への対応によって工学的・社会的に重要なシミュレーションが高速・高精度に実行可能となる。しかもそれが比較的安価なハードウェアの組み合わせで可能となり、またそれが電力効率に優れる点も今日の日本においては特に重要である。

最近までは高速な InfiniBand 製品が非常に高価であり、ノード間通信がボトルネックである GPU クラスタの普及の大きな問題であった。しかし近年クラウド技術の中核とし

て InfiniBand が爆発的に普及したため大幅に価格が下がり、GPU クラスタ構築には絶好のタイミングとなった。本研究で開発される手法が GPU クラスタ上で活用され、広い分野において貢献することを目指す。

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)固体も含む固気液多相流体計算への発展、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 InfiniBand で結合された 8 ノード程度の GPU クラスタを構築し、その上で開発と評価を行なってゆく。

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、初期段階では単一 GPU 上での実行および単一ノード内での複数 GPU 環境において開発・評価を行い、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 24 年度は、表面張力計算手法の検討、固体を含めた多相流体計算スキームの検討、上記手法の GPU 上への実装と評価、圧力ポアソン方程式のための反復計算の拡張、可視化手法の拡張、を行なってゆく計画であった。このうち表面張力計算手法の検討については IBM(Immersed Boundary Method)と Level Set 法を GPU 上で効果的に実装することにより表面張力計算のためのなめらかな法線の獲得に成功し、予定通り実装することができた。固体部分についてもカラー関数を VOF 法で同様に表現した上で、流体と異なり外力や加速度の総計をとることで剛体としての運動を実現することに成功した。

これを GPU 上に実装し、固気液多層流体シミュレーションを実行・評価したところ数値的に安定で保存性に優れた手法であることが確認された。これで GPU 上の固気液多層流体シミュレーションの基盤が確立された。さらに圧力ポアソン方程式のための反復計算の拡張については、前処理付きクリロフ部分空間法を GPU 上で実装すると共にいくつかの前処理手法を比較検討し、マルチグリッド前処理を用いた場合に非常に優れた収束特性を示すことが確認された。さらに安定的な収束性を確保するためには通常は倍精度や 4 倍精度の演算が必要となるところを独自の工夫を施すことで単精度計算だけで十分な収束性と安定性を実現した。

これによりメモリ消費量および計算速度の点で従来手法よりも圧倒的に優れた手法の

開発に成功した。

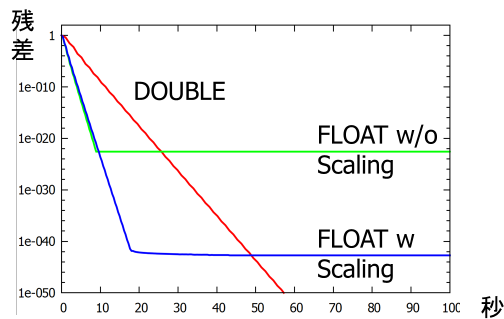


図 1：単精度でも良好な収束を実現

可視化手法の拡張については従来の科学的可視化のみならず、写実的可視化を可能とする GPU 上での高速レイトレーシング法を実装し、高品位な可視化を実現した。

平成 25 年度は多相流体計算スキームの再検討、可視化手法のさらなる拡張、計算・可視化の処理と通信の最適化、画像圧縮手法の発展、を行ってゆく計画であった。

このうち計算スキームについては GPU の限られたメモリ容量の圧迫を最小限に抑えながら高精度な界面獲得および移流を実現するスキームを実装し評価した。具体的には数値計算に用いる格子のうち VOF 値を格納する格子の解像度を他の物理量を格納する格子と比較して高くする手法を導入した。VOF 値の解像度は界面形状に直接的な影響を及ぼすが、メモリ使用量全体に占める割合は高くないため、この部分の格子の解像度のみを上げることは効果的である。また熱流体計算の基礎的要素としてブシネスク近似を導入した。可視化手法については GPU クラスタ環境における分散レイトレーシングを実現した。

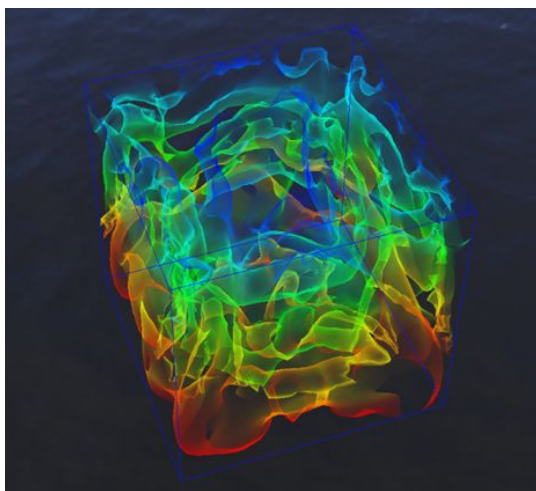


図 2：多相熱対流シミュレーションと可視化

さらに可視化の負荷のロードバランスを自動的にとる仕組みを開発・実装した。これにより可視化における描画時間が短縮化され、

GPU の効果的利用による高速化が可能となった。また分散可視化によって作成された複数の画像をネットワーク上で収集する際に、高速な圧縮を用いることで転送時間を短縮し、全体の計算および可視化時間の短縮を図った。圧縮手法としてはウェーブレット変換を用いる手法をベースとした。フレーム間圧縮は行っていないが、これは前述したロードバランスの仕組みによりフレームのサイズが動的に変更されるためである。結果としてギガビットイーサネット環境においては事前圧縮が転送時間の短縮にある程度有効であった。

研究最終年度は計画通りに、多相流体計算スキームの再検討、熱流体計算を考慮したスキームの拡張、新たな計算スキームの GPU 上への実装、多相流体問題への適用と評価、可視化手法の拡張と全体処理の最適化、等について研究開発を行った。

計算スキームとしては多相熱流体計算に十分対応するために圧力ポアソン方程式の解法の拡張と効率化を行った。また大規模計算への対応のための検討として、CPU 側の比較的大容量なメモリ上にデータを置きつつ GPU 上での計算をデータ通信と非同期処理することで効率的に実現する手法を考案した。

計算スキームに伝熱工学の効果を導入するために温度による体積変化と密度変化を導入し、さらに相変化による急激な密度変化が起きても安定的に計算が可能となる手法を導入した。さらにこれらを最新 GPU の特性を考慮した上で高速に計算可能な実装方法を考案した。CPU/GPU の役割分担も再検討し、部分的な計算を CPU 側に負担させる余地の検討とスキーム上でのタイミングについて検討・評価した。また多相流体計算の災害シミュレーションへの適用として、障害物付きのダムブレイク問題と変形・移動する固形物が単一の場合の固気液多層流体シミュレーションの実行に成功した。

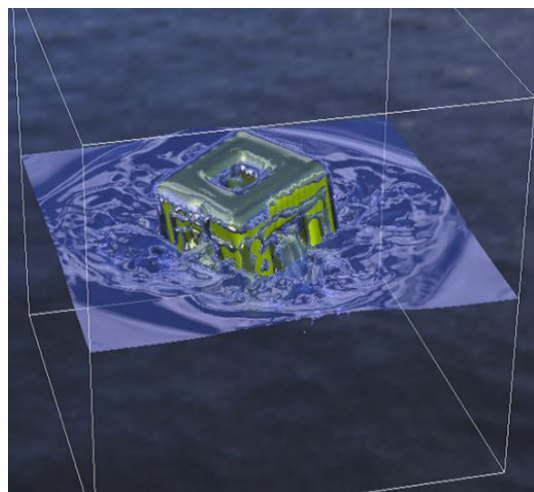


図 3：固気液多層流体シミュレーション

GPU クラスタ環境における分散可視化についても動的負荷分散に対応したレイトレーシングの実装を行った。

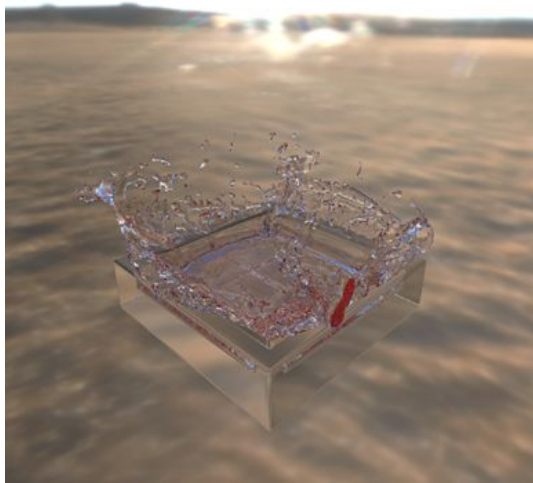


図4：動的負荷分散に対応した分散レイトレーシング可視化

映像の高速転送のためのフレーム間圧縮技術については、低速なネットワーク環境下では効果が高い一方で Infiniband 等の高速なネットワーク環境下では圧縮処理を行わないほうがむしろ高速に処理可能であることが改めて確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

Koji Toriyama, Koichi Ichimiya, Masakazu Kaneko, " Effects of Aspect Ratio on Mixed Convection in a Horizontal Rectangular Duct with Heated and Cooled Side Walls ", Heat Transfer Asian Research, Vol.42, Issue 6, pp.544-555, September, 【査読有り】,(2013)

Shumpei Funatani, Koji Toriyama, Tetsuaki Takeda, " Temperature Measurement of Air Flow Using Fluorescent Mists Combined with Two-Color LIF ", Journal of Flow Control, Measurement & Visualization, Vol.1, No.1, pp.20-23, 【査読有り】,(2013)

〔学会発表〕(計14件)

Hidetoshi Ando, Takamasa Sueyoshi, Koji Toriyama, " DISTRIBUTED PHOTOREALISTIC AND SCIENTIFIC VISUALIZATION OF MULTIPHASE FLOW IN MULTIPLE GPU ENVIRONMENT ", Proceedings of the 25th International Symposium on Transport Phenomena, 【査読有り】 , CD-ROM, (2014年11月6日)

丸山雅広, 安藤英俊, 鳥山孝司, " 物体移流に細密格子を用いた GPU 上での固気液多相流体シミュレーションの改善 ", 日本計算工学会 第 19 回計算工学講演会論文集, 【査読なし】 , CD-ROM, (2014年5月11日)

Hidetoshi Ando, Takamasa Sueyoshi, Koji Toriyama, " A Fast and Stable Gas-Liquid-Solid Three-Phase Flow Simulation and Visualization on Multiple GPUs ", Proceedings of 5TH ASIA PACIFIC CONGRESS ON COMPUTATIONAL MECHANICS, No. PS-53, 【査読有り】 , CD-ROM, (2013年12月12日)

末吉飛将, 安藤英俊, 鳥山孝司, " 固気液多相流体シミュレーションの GPU 上でのレイトレーシングによる分散可視化 ", 可視化情報全国講演会(会津 2013)論文集, 【査読なし】 , CD-ROM, (2013年9月27日)

Hidetoshi Ando, Takamasa Sueyoshi, Koji Toriyama, " Real-Time Visualization of Multiphase Thermal Flow Simulation with Variable Transparency on GPU ", Proceedings of The 9th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, PSFVIP9_a0046, 【査読有り】 , CD-ROM, (2013年8月26日)

加藤義和, 安藤英俊, 鳥山孝司, " GPU 上での Krylov 部分空間法のための Multi Grid 前処理の評価 ", 日本計算工学会 第 18 回計算工学講演会論文集, 【査読なし】 , CD-ROM, (2013年6月19日)

村上敬亮, 安藤英俊, " 動的変型圧縮に対応した映像配信および GPU による高速化 ", 動的画像処理実利用ワークショップ 2013 講演論文集, 【査読なし】 , CD-ROM, (2013年3月7日)

〔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