

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月11日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21500052

研究課題名（和文） GPUクラスタ上での高速並列計算およびリアルタイム分散可視化

研究課題名（英文） Fast Parallel Computation and Real Time Visualization on GPU Cluster

## 研究代表者

安藤 英俊（ANDO HIDETOSHI）

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授

研究者番号：50221742

## 研究成果の概要（和文）：

安価で高性能なため優れた計算資源として注目される GPU を複数用いてクラスタを組み、この上で高速な並列分散計算とリアルタイムな分散可視化を実現した。この上に世界で初めて CIP 法や ILU(0)前処理付き共役勾配法、THINC/WLIC 法や VSIAM3 といった先進的な手法を実装し、安定で精度良い計算と CPU よりも大幅な高速化を実現した。また計算結果を即時に分散可視化し、結果を統合する手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：GPU based cluster was developed for fast parallel computation and simultaneous distributed visualization. Advanced numerical methods such as CIP, ICCG, THINC/WLIC, and VSIAM3 were effectively implemented on GPU and were confirmed to work stably and much faster than on CPU.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

## 研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：ハイパフォーマンスコンピューティング，可視化，GPU

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 演算装置としての CPU は近年単一コアでの性能向上が頭打ちとなっており、一方で性能向上の著しい GPU(Graphics Processing Unit)を汎用計算に用いる研究が近年盛んになってきた。GPU は本来 3D コンピュータ・グラフィクス処理を高速化することに特化したハードウェアで、最新家庭用ゲーム機から携帯電話にまで搭載されるほど身近な存在となっている。また GPU は毎年 2 倍近い性能向上を達成してきており、す

に最新 GPU は 1TFLOPS 程度の浮動小数点演算能力を持ち最新 CPU の 10 倍以上の性能備えているといわれている。

(2) 今後は現在の GPU のように高度に並列化された演算装置を活用する技術が極めて重要になることに間違いなく、多くの研究者が GPU の利用に注目し始めてきている。しかし GPU で比較的容易に実装できる手法は早期に実現されて成果を挙げているものの、数値シミュレーションの分野で高く評価さ

れている本格的な手法はほとんど実装されていない。

(3) 大部分の GPU が単精度演算を主体としていることと、非常に高価なものを除いて GPU のメモリ容量が 1 GB 程度であり拡張も出来ない点などから、GPU を用いた大規模で本格的な数値シミュレーションが行えていないのが現状である。本研究ではこれらの点を打破し、GPU クラスタ上で本格的な大規模数値シミュレーションとリアルタイム分散可視化を行う手法を開発する。

## 2. 研究の目的

(1) 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、その上で大規模な並列数値計算および計算結果のリアルタイム分散可視化を行うための手法を開発する。これにより従来のスーパーコンピュータの性能をはるかに凌ぐ演算能力を備え、計算結果の高速・高品位な表示を可能とする GPU クラスタ環境を、身近な装置を使い誰でも構築可能となる。

(2) 研究代表者は単独 GPU 上では世界で始めて CIP 法に基づく高速高精度数値シミュレーション環境を実現し、また高速に計算するだけでなく可視化も同時に行うことでさらにその魅力を高めることを示した。本研究では単独 GPU 上ですでに高い評価を得た高速計算とリアルタイム可視化の技術を、GPU クラスタにおける分散環境上で実現する。

## 3. 研究の方法

(1) 研究代表者は世界で初めての単一 GPU 上に CIP 法と MGCG 法に基づく高速で安定な数値シミュレーション環境を実装し、さらに計算結果の可視化も高速・高品位に行うことを可能とした。本研究ではこの先駆的成果を元に、GPU クラスタ環境での大規模計算およびリアルタイム分散可視化へと発展させる。

(2) 比較的安価に構築可能なギガビットイーサネット環境での 8 ノード程度の GPU クラスタを構築し、この上で現在までに開発した GPU 上のシミュレーション手法および可視化手法をクラスタによる分散処理に対応させる。研究初年度は基礎的な部分を完成させることに集中し、翌年度以降にさらに手法の大規模化・本格化をはかり、最終的には大規模なクラスタ環境に対応可能な手法を開発し、研究を発展させてゆく。

## 4. 研究成果

単一 GPU 上で実装していた数値シミュレーションおよびリアルタイム可視化手法を GPU クラスタ環境での分散処理に対応させるために、平成 21 年度においては Linux 上の MPI を基本とした環境へ移行する準備と、数値計算手法のさらなる拡張と可視化の高速化をはかった。数値計算および可視化を従来 Windows 上のシェーダ言語 HLSL で実装していたものを、数値計算については CUDA への移行を行い、可視化については OpenGL 環境でのシェーダ言語 GLSL に移行した。これにより Linux を含む複数のプラットフォームへの対応が可能になった。

特に数値計算部分については CUDA へ移行したことにより、オーバーヘッドの減少による高速化と、自由度の高い並列処理が可能となった。これによりクリロフ部分空間法の前処理手法として有効な不完全 LU 分解を世界で初めて GPU 上に効率的に実装することが可能となった。この ILU(0)前処理を適用した共役勾配法は、他の前処理を用いた従来の GPU 上での共役勾配法と比較して圧倒的に高速かつ安定的に問題を解くことが可能であり、CPU 実装と比較しても大幅に高速であることが示された。(図 1)

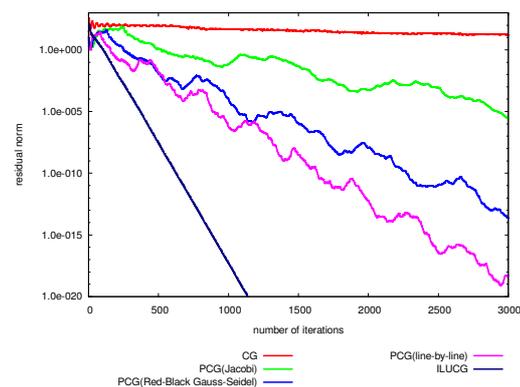


図 1 : T 字問題における反復ごとの残差ノルムの減少傾向

本研究では主に流体の数値シミュレーションを対象として研究しているが、この GPU 上での高速な ILU(0)前処理付き共役勾配法は有限要素法へも GPU が本格的に利用可能であることを示した。当時最速の CPU と比較しても 10 倍以上の性能を発揮することが確認された。

また可視化については 2 次元でのスカラー場の色付けや等値線の表示、流れ場の矢印による表示とパーティクルの移流による流れ場の可視化を実現した。これを Linux 上の MPI による分散並列化に対応させ、構築した GPU クラスタ環境において高速なリアルタイム分散可視化が可能となることを示した。

これらの成果により GPU クラスタ環境で高速に数値計算および分散可視化を行うための基盤が出来上がった。

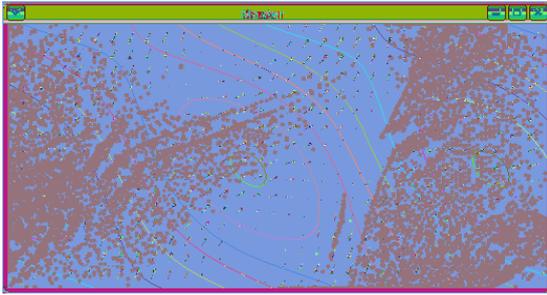


図 2 : 2次元流れ場の等値線, 矢印, パーティクル移流の分散可視化と画像の統合

平成 22 年度は 21 年度の成果を元に数値シミュレーション手法の高度化とリアルタイム可視化の分散化への対応を中心に、研究開発を推進した。数値シミュレーション手法のうち多相流体計算に必要な保存性の高い界面獲得スキームとして MARS 法、THINC/WLIC法をNvidia社の新しいFermiアーキテクチャ GPU 上に CUDA を用いて実装した。数値実験の結果どちらの手法も十分に精度良く計算可能であることが確認されたが、3次元における実装の容易さから THINC/WLIC 法が GPU に向いているという結論を得た。

さらに精度と安定性で定評のある VSIAM3 を世界で初めて GPU 上に実装することに成功した。この時点で VSIAM3 は CPU クラスタ環境ですら並列化の報告がないため、GPU 上での並列化は画期的である。VSIAM3 と THINC/WLIC および CIP-CSL3 を組み合わせた多相流体計算スキームは、3次元ダムブレイク問題や Rayleigh-Taylor 不安定性問題に対しても非常に高い体積保存性と計算安定性を示した。

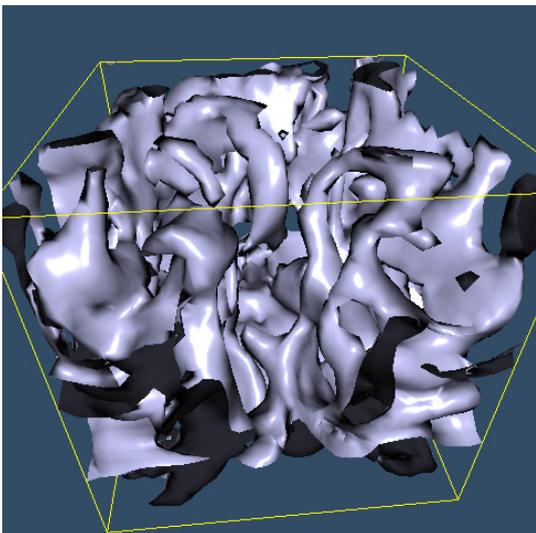


図 3 : Rayleigh-Taylor 不安定性問題

そしてさらにそれを複数 GPU 上で分散計算および可視化させることに成功した。

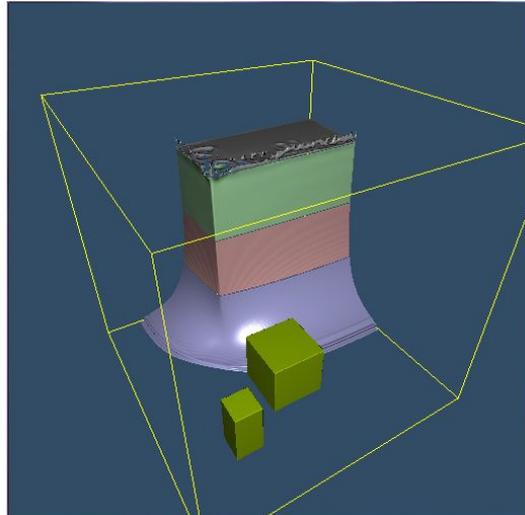


図 4 : 複数 GPU による分散計算と可視化

リアルタイム可視化については 3次元の等値面表示として CUDA による Marching Cube 法を効率的に実装し、界面表示等に大いに役立てた。さらに GPU 上で CUDA によりレイトレーシング法を実現し流体の界面における反射や屈折を扱えるようにしたため、科学的可視化のみならず GPU 上での流体シミュレーション結果を写実的に表示する手法も実装した。GPU 上でのレイトレーシングはシェーダによる科学的可視化と組み合わせることも可能なため、可視化の表現形式がさらに豊富になった。

平成 23 年度は 22 年度の成果を元に、数値シミュレーション手法のさらなる発展と、分散可視化における画像データ転送の高速化、そしてノード内複数 GPU 上対応などの拡張を行った。数値シミュレーション手法としては昨年度実装した GPU 上での VSIAM3 に基づく多相流体解析手法に液体の表面張力を考慮する計算を導入した。これにより高い保存性を有しながら物理的により忠実な計算が可能となった。また圧力ポアソン方程式の反復解法については前処理付きクリロフ部分空間法等による効率化を行った。Nvidia 社自身が GPU 上での ICCG 法をライブラリとして提供し始めたのでこれも評価したが、我々の実装の方がより効率的で安定的に収束することが確認された。また圧力と速度の計算を同時に反復計算する手法についても GPU 上で効果的に実装した。さらに分散可視化の際にノードごとに作成した可視化画像をクラスタ内でギガビットネットワークを介して通信する際に、転送時間を短縮するために事前に GPU 内で高速にウェーブレット変換に基づく画像圧縮を行ってから転送する

手法を実装した。これにより画質の劣化を人目に感じさせない範囲で画像自体は数十分の1程度に圧縮し、転送時間を大幅に短縮することに成功した。また可視化手法についてはNvidia社のOptixライブラリを活用することで、昨年度実装した手法よりも高品位なレイトレーシングによる可視化をGPU上で高速に実行可能とした。

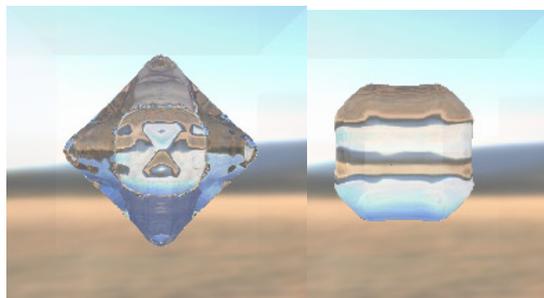


図5：表面張力の導入とレイトレーシングによる高速な写実的可視化

またクラスタ間での通信を軽減するために同一ノード内に複数GPUを搭載してノード内の分散並列計算を実装した。これによりノード内での単一GPUを用いた場合よりも高速な計算が可能となり、また通信と計算の同時実行による通信の隠蔽も効率的に実装したため、今後のGPUクラスタの大規模化を想定した際のスケラビリティの確保に成功した。

## 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)

① 安藤英俊, “GPU上でのILU前処理の実装と評価”, 計算工学, 【査読有り】, 15巻4号, pp.2412-2415, (2010)

② 安藤英俊, 藤木史郎, 鳥山孝司, “GPUのための前処理付き共役勾配法”, 応用数理, 【査読有り】, Vol.20, No.2, pp.19-28, (2010)

[学会発表] (計10件)

① Hidetoshi Ando, Takuma Shibuya, Koji Toriyama, “Simultaneous Simulation and Visualization of Multiphase Flow on GPU”, Proceedings of the 11th Asian Symposium on Visualization, 【査読有り】, CD-ROM, (2011年6月7日)

② Yu Suzuki, Hidetoshi Ando, Koji Toriyama, “Numerical Simulation and Visualization of Acoustic Wave Propagation

using the CIP Method on GPU”, Proceedings of the 11th Asian Symposium on Visualization, 【査読有り】, CD-ROM, (2011年6月7日)

③ 安藤英俊, 澁谷卓磨, 鳥山孝司, “GPU上でのVSIAM3による多相流体シミュレーション”, 日本計算工学会第16回計算工学講演会論文集, 【査読なし】, CD-ROM, (2011年5月25日)

④ 澁谷卓磨, 安藤英俊, 鳥山孝司, “GPU上での界面獲得スキームの評価”, 日本流体力学会第24回数値流体力学シンポジウム論文集, 【査読なし】, CD-ROM, (2010年12月20日)

⑤ 安藤英俊, 藤木史郎, 鳥山孝司, “GPU上でのKrylov部分空間法のためのILU(0)前処理の実装と評価”, 日本計算工学会第15回計算工学講演会講演論文集, 【査読なし】, pp.107-110, (2010年5月26日)

⑥ Hidetoshi Ando, Tomoya Sakashita, Shotaro Seki, Koji Toriyama, “Real-Time Distributed Visualization of CFD Using GPU Based Cluster”, Proceedings of The 7th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, 【査読有り】, CD-ROM, (2009年11月17日)

⑦ 関将太郎, 安藤英俊, 鳥山孝司, “GPUクラスタによる3次元数値シミュレーションの高速分散可視化”, 情報処理学会第136回グラフィクスとCAD研究集会講演論文集, 【査読なし】, CD-ROM, (2009年8月20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・大学院医学工学総合研究部・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・大学院医学工学総合研究部・准教授  
研究者番号：50313789

### (3) 連携研究者

なし