

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11844

研究課題名（和文）大規模分散GPGPUシミュレーションの対話的In-Situ可視化

研究課題名（英文）Interactive In-Situ Visualization of Large-scale Distributed GPGPU Simulations

研究代表者

河村 拓馬（Kawamura, Takuma）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・研究副主幹

研究者番号：90718248

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：スーパーコンピュータ上でシミュレーションと同時に可視化画像を生成するIn-Situ可視化に関して、従来可視化手法では困難だったシミュレーションのバッチ処理における対話的な可視化が可能な技術を開発した。この技術は、シミュレーションと同時に計算結果データを可視化用の粒子データに圧縮し、ストレージ上のファイルを介したIn-Situ制御によって粒子をユーザPCに転送して可視化する。そして、GPUスーパーコンピュータ上の都市流体シミュレーションに適用し、リアルタイムシミュレーションをリアルタイムで対話的に可視化できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

In-Situ可視化の分野では、可視化処理の大域通信がシミュレーションを阻害すること、そしてシミュレーションのバッチ処理により対話的な可視化が阻害されることが課題であった。本研究は独自の粒子ベース可視化とファイルベースのIn-Situ制御によりそれらの課題を解決した。この技術により、最先端スーパーコンピュータで実行される実時間計算を実時間で対話的に可視化できるようになり、将来における緊急時の放射性物質拡散に関する即時予報システムの構築が可能になる。

研究成果の概要（英文）：With regard to In-Situ visualization, which generates visualized images simultaneously with simulations on a supercomputer, we have developed a technology that enables interactive visualization in batch processing of simulations, which has been difficult with conventional visualization methods. This technology compresses the computation result data into particle data for visualization simultaneously with the simulation, and transfers the particles to a user PC for visualization by a file base In-Situ control. It was then applied to an urban fluid simulation on a GPU supercomputer, and it was shown that the real-time simulation can be visualized interactively in real time.

研究分野：可視化

キーワード：In-Situ可視化 粒子ベース可視化 CFD GPUスーパーコンピュータ

### 1. 研究開始当初の背景

スーパーコンピュータ上のシミュレーションがペタスケールからエクサスケールに成長し、結果データを手元の PC に転送してポスト処理を行う従来の可視化手法は、転送時間の増大やクライアント PC のメモリ容量限界を越え、適用が困難となった。こうした結果データを可視化するため、遠隔地のサーバで可視化処理を行いクライアントで表示する、クライアント・サーバ型の遠隔可視化技術が開発された。更に現在では、メニーコア CPU や GPGPU による演算加速によりデータ I/O が大きな障害となり、結果データの入出力そのものが困難になった。この状況下で確実に可視化結果を得るために、スーパーコンピュータ上でシミュレーションと同時に可視化画像を生成する、In-Situ 可視化が重視されている。

しかし、従来の In-Situ 可視化には以下の課題があった。

課題 1: ポリゴンベースの従来の可視化アルゴリズムは可視化処理にデータ領域構成やデータ探索を伴い、大域的通信が発生する。そのため、並列数が増すほどに通信量が増大し、シミュレーションのスケラビリティを悪化させる。

課題 2: シミュレーションのバッチ処理に伴う視点や可視化パラメータ (色・不透明度) の事前設定により、可視化の失敗が頻発する。

申請者はこれまでに、粒子ベースの並列可視化手法を開発することで課題 1 を、それを活用した対話的な In-Situ 可視化フレームワークを構築することで課題 2 を解決してきた。

他方、GPGPU を用いたスーパーコンピュータ (GPGPU スパコン) の有効性が知られはじめ、既存のシミュレーションの移植や、GPGPU 向けに最適化されたステンシル計算による高解像度の実時間流体解析が実施されるようになった。粒子ベースの対話的な In-Situ 可視化フレームワークは、CPU を搭載したスーパーコンピュータ (汎用スパコン) 向けに開発されてきた。しかし、アーキテクチャの全く異なる GPGPU スパコンにおいて、どのようにすれば十分に最適化された In-Situ 可視化フレームワークを構築できるかどうか明らかではなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、GPGPU スパコン向けの対話的な In-Situ 可視化フレームワークを構築することが目的である。そのために、大域通信を必要としない GPGPU スパコン向けの並列可視化手法を開発し、GPGPU スパコン上での対話的な可視化が可能なフレームワークを構築する。そして、実時間で動作する GPGPU シミュレーションに開発フレームワークを適用し、対話的な実時間の可視化を実現する。

### 3. 研究の方法

この目的を達成するために、申請者が開発してきた独自の In-Situ 可視化フレームワーク “In-Situ PBVR” を活用する (図 1)。この手法は In-Situ 環境下で結果データを十分小さな可視化用粒子データに圧縮し、対話処理可能なノード上で起動されたファイル制御プログラムがストレージ上の粒子データを集約し、クライアントとなる PC に転送する。この In-Situ PBVR は従来手法と比べて以下の点で独自性がある。

- ・ 並列化された粒子生成処理のストロングスケーリング性能
- ・ インターネット回線で転送可能な数十 MB のサイズの粒子データ
- ・ 転送した粒子データにより、シミュレーション実行時に自在な視点変更
- ・ ストレージ上のファイルを利用した対話的 In-Situ 可視化制御
- ・ 多変数データ向けの可視化機能

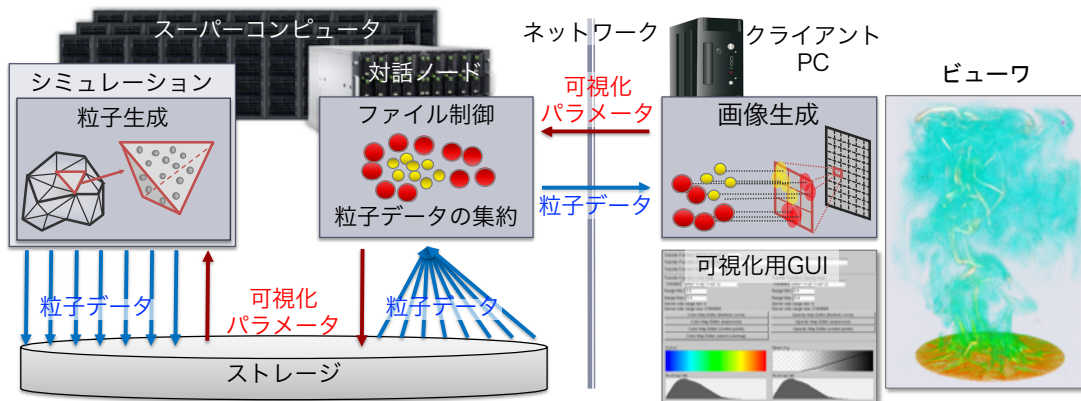


図 1 In-Situ PBVR のフレームワーク概要

このように In-Situ PBVR は高並列かつ省メモリで動作し、対話的 In-Situ 可視化が可能のため、この技術を拡張することで GPGPU 上のシミュレーションを阻害することなく対話的に可視化できるようになる。また、開発する技術は対応するシミュレーションのメッシュ形状に対する自由度も高く、構造格子・階層格子・非構造格子等処理可能で、様々なシミュレーションに適用できる。

In-Situ PBVR を拡張し、GPU スパコン上の大規模 CFD シミュレーションに対して汎用的に動作する対話的 In-Situ ステアリングフレームワークを構築する。この手法では、GPU 上のシミュレーションデータを CPU 側に高速転送し、In-Situ 可視化を CPU で処理することで、異なる計算ノードで可視化処理を行う疎結合モデルと GPU 上で可視化処理を行う密結合モデルの中間的な実装とする。さらに、多くのマルチスケール問題で用いられている適応格子細分化 (AMR) 法に対応した並列可視化機能を開発する。可視化機能として、ボリュームレンダリングによる 3 次元空間における物理値の分布と 2 次元グラフによる物理値の時系列を可視化するインターフェースを実装する。このフレームワークではサーバからクライアントへ、可視化用粒子データと時系列データが送信される。そしてクライアントからサーバ側へ可視化パラメータと計算パラメータが送信される。

研究分担者は、GPGPU スパコン上で階層格子を用いた都市圏気流シミュレーション CityLBM を開発しており、都市部を対象にした汚染物質拡散の実時間による計算を達成している (図 2)。数値実験では、開発したフレームワークを CityLBM に適用し、リアルタイム解析に耐えうる In-Situ 可視化/ステアリングが可能であることを示す。この In-Situ ステアリング機能を活用して、都市街区における汚染物質拡散解析の結果から汚染源を推定する逆問題に対して、可視化とステアリングによる Human-in-the-loop 的アプローチの利用事例を示す。

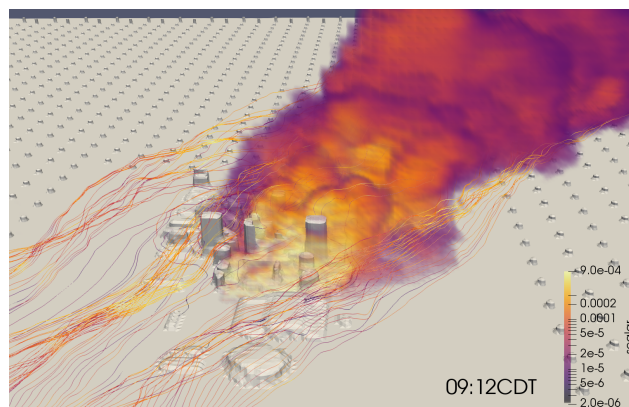


図 2 都市圏気流シミュレーションによる汚染物質拡散解析

#### 4. 研究成果

初年度は、GPU 上で動作する小規模テストケースを対象に In-Situ PBVR のプロトタイプを構築した。大規模な CityLBM で利用されている AMR 格子向けの可視化用粒子生成手法を開発し、格子数が数百万程度の小規模な空気冷却計算に適用した (図 3)。可視化結果を従来可視化ソフトウェア ParaView と比較し、同等の画像を生成するのに 10 倍以上高速であることを示した。

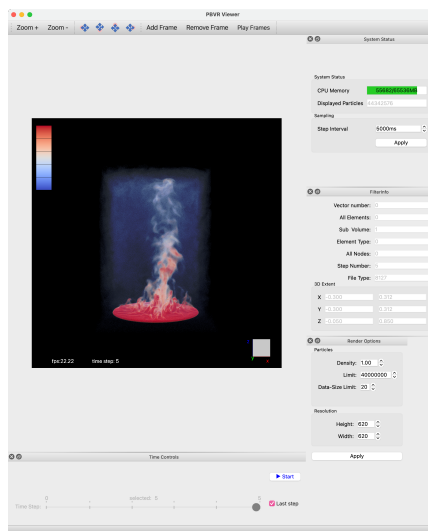


図 3 テストデータの可視化結果

次年度は、GPU スパコン上で動作する都市気流シミュレーション CityLBM を適用対象として移植作業を実施した。GPU スパコン上に最適化された CFD シミュレーションはステンシル計算を GPU 上で実行するため、CPU の利用率が低い特徴がある。そこで、計算容量が十分に空いている CPU 上で可視化処理がシミュレーション性能を阻害しないように、シミュレーションを GPU で、可視化処理を CPU で非同期に行うフレームワークを構築した。このフレームワークでは、シミュレーションの計算中にタスク並列で GPU メモリから CPU メモリに計算結果データを転送する。このフレームワークは可視化処理コストを CityLBM の 10%程度に抑制でき、6 秒に 1 回程度の可視化頻度にすることでリアルタイム性を損なわず In-Situ 可視化できることを示した。

最終年度は、可視化と同時に汚染物質濃度の時系列の値をモニタリングし、その結果を観察しながら計算パラメータを対話的に変更する In-Situ ステアリング機能を開発した。ストレージを利用したファイルベー

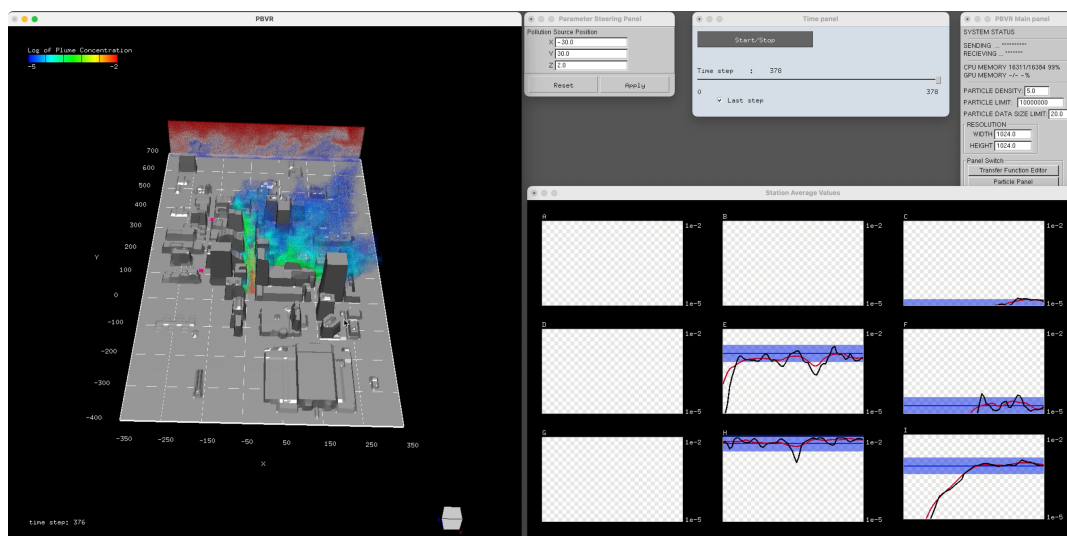


図4 In-Situ ステアリング機能によるリアルタイムの汚染物質挙動解析

スの In-Situ 制御機能を拡張し、計算パラメータや設定した観測地点の時系列データを通信する仕組みを開発した。そして、ステアリングやモニタリングをサポートするために、計算パラメータの制御や時系列データから統計量を計算して可視化する GUI を開発した。開発した機能の有効性を検証するために、モニタリングスポットに汚染物質濃度を試験的に設定し、In-Situ ステアリングにより汚染源の位置を対話的に変更することで、最適な汚染源の位置を探索する実験を実施した（図4）。ユーザはシミュレーションのリアルタイムで可視化される風況やモニタリングポイントの時系列データの情報を参考にして計算パラメータを変更することで、汚染源の位置を特定することに成功した。

本研究により、従来可視化手法では困難だった、実時間解析を阻害しない実時間可視化、および実時間の In-Situ ステアリングを達成した。本研究で構築した In-Situ ステアリングフレームワークは、GPU スパコン上の大規模シミュレーションの計算パラメータをシミュレーション実行時に対話的に変更することを可能にする。この技術は、効率的なデバッグに役立つのはもちろん、可視化とシミュレーションへのフィードバックを繰り返す Human-in-the-loop 的アプローチにより、最適解の探索や逆問題の解析にも有効である。原子力分野では原発事故や核テロの対策に向けて汚染物質大気拡散のリアルタイム予測システムの構築を目指しており、本研究はその成立に重要な役割を果たすことが期待される。

追加して特記したいこととして、当初想定していた以上の成果として、PBVR を VR 機器へと移植することで、遠隔地のデータを対話的に可視化できるアプリケーションを開発することができた。昨今は ParaView 等、従来の可視化アプリケーションが VR 機器での表示に対応しているが、データ転送量と可視化処理時間がボトルネックとなり、その適用対象は手元の PC に保存された小中規模のデータにとどまっていた。PBVR を活用し遠隔地の大規模データを可視化用粒子データに圧縮することで、従来は困難だった遠隔地の大規模データに対する VR 可視化が可能になった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kawamura Takuma, Idomura Yasuhiro	4. 巻 23
2. 論文標題 Improvement in interactive remote in situ visualization using SIMD-aware function parser and asynchronous data I/O	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Visualization	6. 最初と最後の頁 695 ~ 706
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12650-020-00652-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kawamura Takuma, Hasegawa Yuta, Idomura Yasuhiro	4. 巻 1
2. 論文標題 Interactive in-situ steering and visualization of GPU-accelerated simulations using particle-based volume rendering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications + Monte Carlo 2020 (SNA + MC 2020)	6. 最初と最後の頁 187-192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ginga Tabata, Naohisa Sakamoto, Takuma Kawamura	4. 巻 1
2. 論文標題 Intuitive interactions for immersive data exploring of numerical simulation results	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications + Monte Carlo 2020 (SNA + MC 2020)	6. 最初と最後の頁 193-200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 河村 拓馬、坂本 尚久
2. 発表標題 粒子ベースレンダリングによる数値シミュレーションデータ向け遠隔VR可視化システム
3. 学会等名 第49回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 河村拓馬、長谷川雄太
2. 発表標題 粒子ベースによる対話的In-Situ可視化フレームワークを利用した対話的In-Situステアリング
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河村拓馬、長谷川雄太
2. 発表標題 粒子ベースIn-Situ可視化フレームワークを利用したファイルベース制御による対話的In-Situステアリング
3. 学会等名 第48回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 矢野緑里、河村拓馬、長谷川雄太、井戸村泰宏
2. 発表標題 汚染物質拡散解析のIn-Situアンサンブル可視化
3. 学会等名 原子力学会2021年春の年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河村拓馬
2. 発表標題 粒子ベースのIn-Situ可視化とIn-Situステアリング
3. 学会等名 プラズマシミュレーションシンポジウム2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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	小野寺 直幸  (Onodera Naoyuki)  (50614484)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・研究副主幹   (82110)	

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
---------	---------