

jh140036-NA20

動的負荷分散による GPU スパコンを用いた粒子法の大規模シミュレーション手法の開発

青木 尊之 (東京工業大学)

概要 GPU スパコンにおいて DEM や SPH の近接相互作用に基づいた大規模粒子シミュレーションを可能にする計算手法の開発を行った。スライス・グリッド法を用いた GPU 間の動的な負荷分散法をそれぞれに適用し、GPU スパコン TSUBAME 2.5 を用いた 1~20 億粒子の粒子法計算に対するスケーリングを検証した。粉体および流体の実問題に対して本提案手法を適用し、DEM ではこれまで実現できなかった現実の粒子サイズを用いた 3 次元バンカーショット計算を実施することができた。スライス・グリッド法による動的負荷分散を SPH にも適用し、複雑形状を含む 1200 万粒子を用いた流体シミュレーションを実現し、本手法の適用性の高さを示した。また、スライス・グリッド法による動的負荷分散の問題点を明らかにし、木構造に基づいた領域細分化に対して空間充填曲線を用いて動的負荷分散のプロトタイプの実装を行った。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東京工業大学・学術国際情報センター

(2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

青木尊之 (東工大) DEM 計算、SPH コードの開発と動的負荷分散アルゴリズムの検討、全体総括

西浦泰介 (海洋研究開発機構) DEM 相互作用の最適化、SPH との連成計算

今井陽介 (東北大) SPH 法の計算手法・精度とアルゴリズム

森口周二 (東北大) DEM 計算の土質力学への適用性の検討とクオータニオンの導入

都築怜理 (東工大) DEM, SPH コード開発と、TSUBAME 2.5 上での大規模シミュレーションの実施、ポスト処理

2. 研究の目的と意義

高速化を目指すレーザープリンターのトナー粒子の挙動解析や、各種の化学工学、錠剤製造プロセスにおいて、粉体シミュレーションを行う重要性は広く認識されている。計算機資源を節約する粗視化モデルには限界があり、現実に近い粒子数で大規模計算を行うことにより計算精度は飛躍的に向上し、粉

体现象の詳細なダイナミクスや新しいメカニズムを明らかにすることができる。粉体シミュレーションの場合、計算精度は粒子数の $2/3$ 乗に比例する。つまり、8 倍の粒子数を使っても計算精度は 4 倍しか向上しないため、どうしても大規模計算が必要となる。さらに複雑形状の物体との大規模連成解析が求められているが、領域再分割による動的負荷分散は実装が容易ではないため、メモリ分散環境では大規模粒子計算が殆ど行われてこなかった。

良く知られている粒子法として重力多体問題や分子動力学シミュレーションがあるが、粒子間相互作用の距離が長いために浮動小数点計算演算の負荷が非常に大きい。一方、粉体シミュレーションでは、接触による粒子間相互作用となるため、メモリアクセスが律速の計算となっている。近年、演算性能・メモリ性能・電力効率などの観点から、世界トップクラスのスパコンにおいて GPU がアクセラレータとして搭載されている。アプリケーション開発の観点からは、CUDA プログラミングなどが必要であるばかりでなく、GPU ボード上のデバイス・メモリや On-Chip の高速な共有メモリなどの階層的メモリ構造を上手に使う必要がある。

近接相互作用に基づく粒子シミュレーションに対して、階層的メモリ構造を持つ GPU スパコンで動的負荷分散を導入した大規模シミュレーションを実現することができれば、粒子法シミュレーションを用いた解析を行う様々な学術・産業分野を進展させることができる。また、格子法の AMR(Adaptive Mesh Refinement) 法などにおいても動的負荷分散は必要であり、複数 GPU を用いた様々なシミュレーションに対して本研究の成果は適用できる。

これまで研究代表者らは粒子法である DEM (Distinct Element Method)による粉体シミュレーシ

ョンを開発してきており、本研究では GPU スパコンにおいて大規模粉体シミュレーションを効率的に実行するための手法を開発する。一方、流体シミュレーションのための陽的 SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法は、相互作用の部分は異なるが、計算アルゴリズム自体は DEM と非常に類似している。そこで、DEM シミュレーションのために開発した動的負荷分散法や様々な手法を GPU スパコンにおける SPH 法のシミュレーションに適用し、大規模流体シミュレーションを効率的に実行するための手法を開発することを目的とする。

DEM や SPH 等の近接相互作用に基づいた粒子法計算では、演算量に対するメモリアクセスが多いため、粒子の位置や速度などの従属変数を GPU のオンボード・メモリ上に置く必要があるため、複数 GPU を用いる場合は多段の分散メモリ環境となる。粒子番号で分割して並列計算を行うことは極めて非効率であり、計算空間を分割する領域分割法を導入する必要がある。しかし、粉体や流体の空間分布は時間とともに大きく変化するため、粒子の初期分布に基づいた領域分割のまま計算すると、時間とともに分割された領域内の粒子数に大きな偏りが生じ、並列計算の効率は著しく低下する。そこで、シミュレーションの実行中に計算領域を再分割し、分割領域内の粒子数をほぼ一定に保つ動的負荷分散を導入する必要がある。GPU スパコンにおける近接相互に基づいた大規模粒子シミュレーションの例は殆どなく、本研究の目的は GPU スパコン TSUBAME 2.5 の Kepler GPU である Tesla K20X を使い、1~10 億個の粒子を用いる超大規模シミュレーションを効率的に実行できる手法を開発し、実用アプリケーションで実証することである。

これまで動的な領域分割にはスライス・グリッド法を導入してきたが、本研究ではさらに木構造に基づいた領域細分化を行い、空間充填曲線による動的負荷分散の検討を行う。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

GPU スパコンにおいて、ステンシル計算の大規模実用アプリケーションで実績のある研究代表者が、地盤工学およびバイオメカニクス分野で DEM 法および SPH 法の研究実績を持つ研究者らと共同研究することができ、粒子法の計算精度や計算アルゴリズムの知見を取り入れた実問題の大規模粒子計算のアプリケーション開発をすることができた。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

(新規課題のため記載なし)

5. 今年度の研究成果の詳細

5.1 スライス・グリッドによる動的領域分割

DEM シミュレーションの動的な領域分割としてスライス・グリッド法の導入を行った。2 次元分割

の場合、 x 方向の分割に対して粒子数を均等化するように y 方向に領域境界をスライスさせる。次に x 方向に分割されたそれぞれの領域をさらに y 方向に分割し、各領域内の粒子数を同数になるように領域境界を移動する。分割領域境界近傍の粒子探索に対して、ATOMIC 処理を用いない効率的なアルゴリズムの提案を行った。図 1 のように粒子が分布している場合のスライス・グリッド法による領域分割を図 2 に示す。

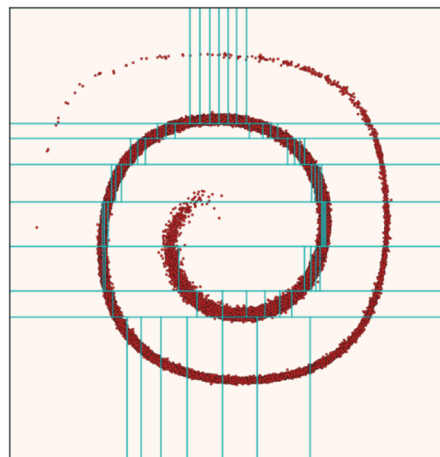


図 1 回転速度場により移動した粒子分布



図 2 スライス・グリッド法による領域分割

スライス・グリッド法は単純な分割アルゴリズムのため GPU スパコンでの実装に適している。しかし、分割された領域が細長く（アスペクト比が大き）くなり粒子が分割領域の境界を横切り易くなるため、ノード間通信のデータ量が増加してしまう。また、1 つの分割領域が複数の領域に接続する場合は発生し、データ通信が複雑になる欠点があることが明らかになった。

5.2 DEM 法の強・弱スケーリング

スライス・グリッド法による動的負荷分散を導入した DEM の GPU コードを完成させ、TSUBAME 2.5 で強スケーリングの実行性能を検証した。実問題であるスクリーが粉体中で回転する粉体の攪拌の計算 (図 3) を、DEM を用いて、約 200 万個、約 1600 万個、約 1 億 2900 万個の粒子計算に対して GPU 数を変えた場合の強スケーリングの性能測定

を図 4 に示す。

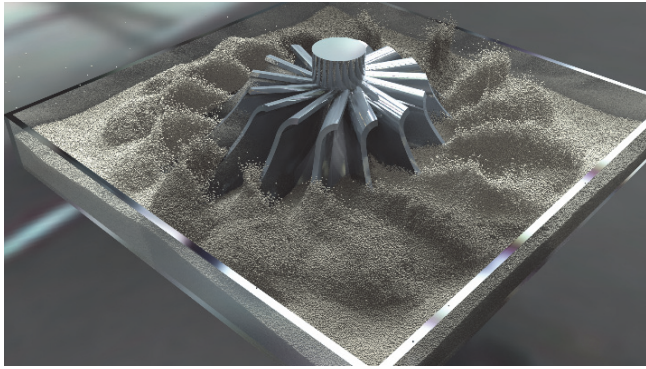


図 3 実行性能検証の対象とした攪拌計算

図 4 の縦軸の実行性能は 1 ステップ当たりの実行時間に粒子数を掛けて定義された性能の相対的な指標値である。×印で表された 2 個の測定点が、1 億 2900 万粒子の計算に対する 256GPU と 512GPU を

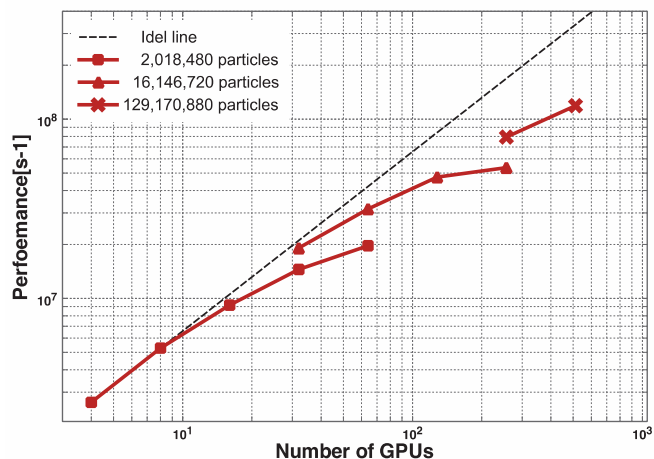


図 4 DEM の実問題に対する強スケーリング。

用いた場合の測定結果である。弱スケーリングとして、200 万粒子と 1600 万粒子に対する実行性能よりも、理想的な性能 (点線) から大幅に落ち込んでいることがわかる。分割領域のアスペクト比の悪化による領域間通信量の増大が原因となり並列化効率が低下したためであり、この問題に対しては図 4 の測定結果から、DEM 計算へのスライス・グリッド法の適用限界が 256GPU~512GPU 程度であることが確認できる。

5.3 DEM 法の実アプリケーションへの適用

ゴルフのバンカーショットはサンドウェッジのスイングによる砂のかき上げと、かき上げられた砂によるゴルフボールへの運動伝達を含む複雑な問題である。解析手法である DEM は計算コストが高いため、これまでは 10 万個程度の粒子による 2 次元計算にとどまっていた。本研究では、実際の砂と同程度のサイズの粒子を数 1000 万個~1 億個用いることにより、実現象のスケールでの 3 次元バンカーショット・シミュレーションを実行した。

バンカー砂に含まれる粗砂を想定し、粒子半径を 0.4mm として 1670 万粒子による大規模バンカーシ

ョット計算を 64 台の GPU を用いて行った。回転及び二重振り子モデルからサンドウェッジの軌道を決

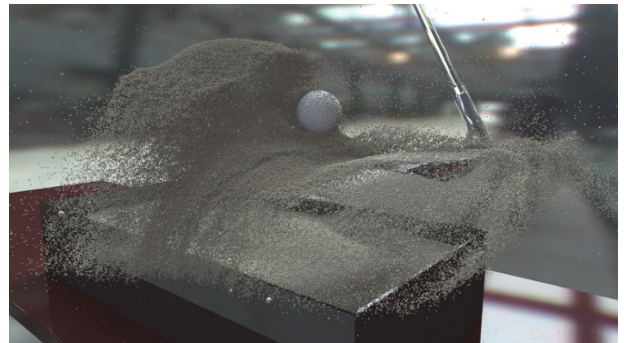


図 5 1670 万粒子によるバンカーショット計算。

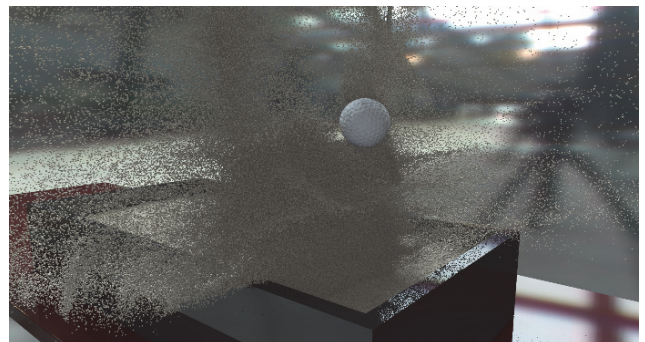


図 6 図 5 と同じ物理条件で、サンドウェッジのスイング速度を変えて計算した結果。

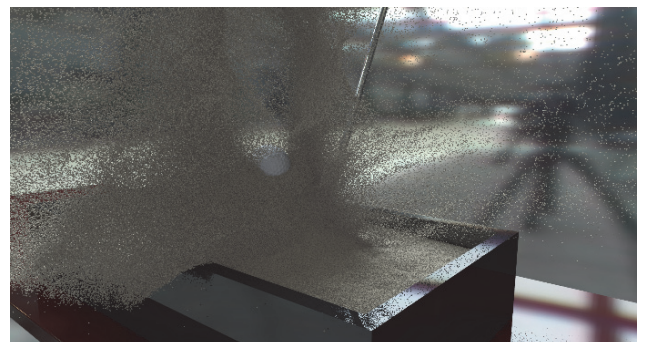


図 7 バンカーショットのミスショット計算。

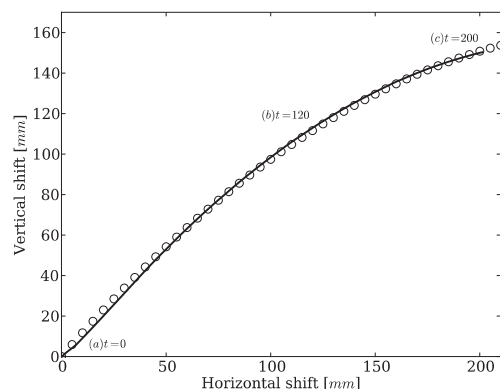


図 8 サンドウェッジのスイング軌道

態を 64000 ステップかけて生成した後、サンドウェッジの先端の最大速度を 5.0m/s としてスイングを開始した。計算結果のスナップショットを図 5 に、

図 5 と等しい物理条件でサンドウェッジのスイング速度と軌道を変えて計算した結果を図 6 及び図 7 にそれぞれ示す。

さらに、図 8 に示すような軌道解析を行い、本研究で実施した大規模バンカーショット計算により、サンドウェッジのスイング速度とボールの打ち出し角、ボールに与えられる初速の関係などの定量的な評価が大規模 DEM アプリケーションで可能であることを示した。

5.4 SPH 法による流体計算コードの開発

DEM で開発した動的負荷分散手法を SPH 計算に適用し、SPH 法による流体アプリケーションの開発を行った。まずは代表的な古典的 SPH の計算手法である WCSPH を用いた 1200 万個の粒子による流体のダム崩壊計算を行った。流れ出した水が複雑物体と相互する問題に対し、時間刻み幅を $\Delta t = 1.5 \times 10^{-4}$ に設定し、物理時間で約 6 秒を 40000 ステップで計算した結果を図 9 に示す。



図 9 複雑形状の物体と流体の相互作用シミュレーション

SPH 法では、高精度な粒子法の流体計算を行うためには、物体や壁面内部に粒子を配置して境界条件として粒子の密度や圧力を計算するのが一般的である。図 10 に示すように壁粒子と物体粒子も考慮した動的負荷分散へと拡張を行った。

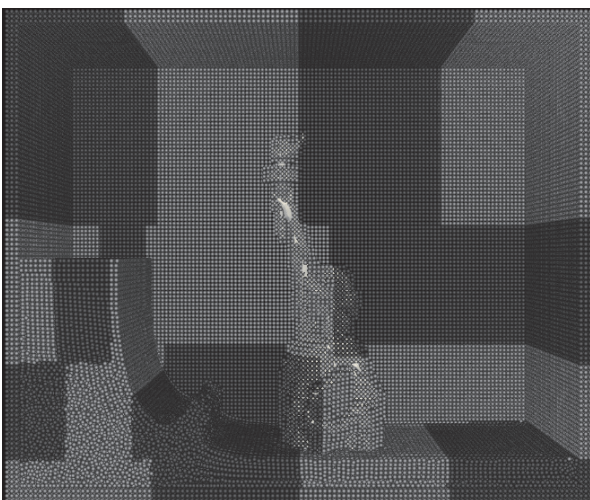


図 10 動的負荷分散を導入した SPH による流体シミュレーションの複数 GPU 計算。

5.5 SPH 法による流体シミュレーションの弱スケーリング

TSUBAME2.5 に搭載されている 8 台から 144 台までの GPU (NVIDIA Tesla K20X) を用いて、最大 20 億個の粒子による WCSPH のダム崩壊問題に対する弱スケーリングを測定した。

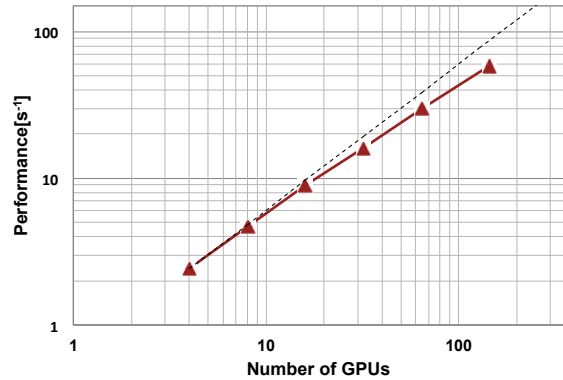


図 11 SPH 計算の弱スケーリング

1 台の GPU あたり約 1500 万粒子を割り当て、初期の 150 ステップにかかる性能を測定した。DEM 計算と同様に、1 ステップあたりの計算時間の逆数に粒子数を掛けた値を性能値の指標として測定した結果を図 11 に示す。100 GPU 以上を用いる領域では DEM 計算と同様に領域間の通信量コストの増加による実行性能の低下が確認でき、大規模並列化にともなう通信コストの削減の検討が今後の課題である。

5.6 空間充填曲線による階層構造をもつ動的負荷分散の検討

スライス・グリッドの欠点である分割領域の高アスペクト比と、分割された領域が多数の隣接領域と接続する問題を解決するために、他の手法による動的負荷分散を検討した。重力多体問題で良く使われる Kd-tree は分割数が 2 のべき乗となるため、実用的な問題には適さない。本研究では、木構造に基づいて領域を細分化し、空間充填曲線を用いて動的負荷分散を行うことを検討した。

まず、4 分木 (3 次元では 8 分木) の領域細分化に対してヒルベルト空間充填曲線に基づいた動的領域分割のプロトタイプの実装を行った。6 万 5000 個の

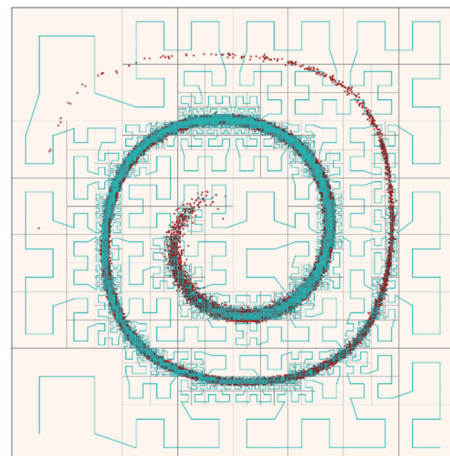


図 12 ヒルベルト空間充填曲線によるリーフの連結

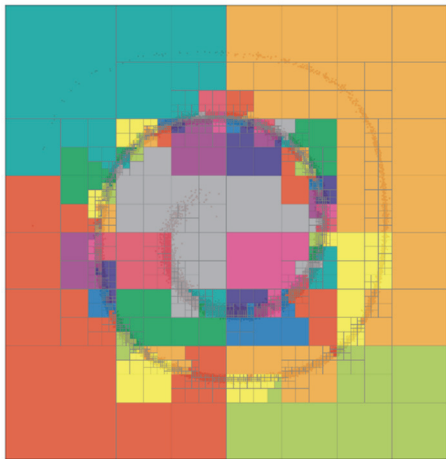


図 13 ヒルベルト空間充填曲線に基づいた領域分割

粒子計算に対して、各分割領域内の粒子数が均等になるように、ツリー構造を用いて階層的に分割し、ヒルベルト空間充填曲線 (図 12) とツリー構造のリーフを辿ることにより負荷分散した結果を図 13 に示す。

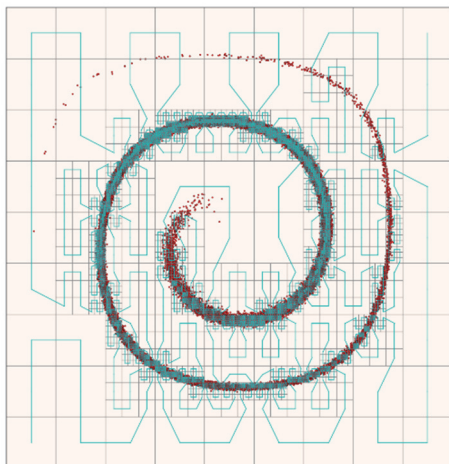


図 14 Peano 空間充填曲線によるリーフの連結

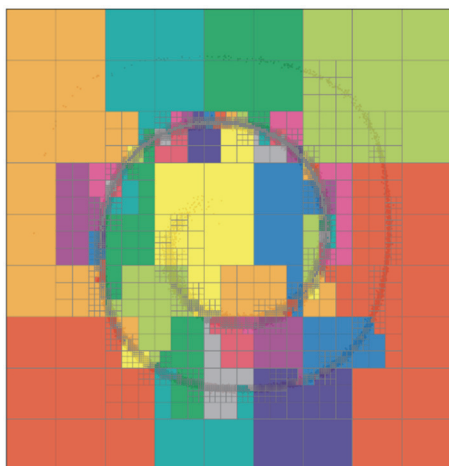


図 15 Peano 空間充填曲線に基づいた領域分割

各分割領域の形状は複雑になる一方、スライス・グリッド方に見られるような縦横のアスペクト比の悪化は改善されており、また隣接する領域は限定され

ているので、領域間での通信コストの削減が期待できる。

また、格子計算と異なり再帰的細分化に 9 分木 (3 次元では 27 分木) を用いても問題がなく、細分化の階層が浅くなり、Peano 空間充填曲線 (図 14) を用いることができる。Peano 曲線に基づいた負荷分散の結果を図 15 に示す。分割領域の形状の複雑さが緩和され、ノード間通信コストの低減が期待できる。

5.7 非球形粒子を用いた DEM 計算

複数の粒子を剛体連結させた非球形の粒子モデルを用いることで、球形粒子よりも粒子間の摩擦を正確に表現でき、より現実の現象に近い粉体シミュレーションが可能となる。1 つの非球形粒子を複数の粒子を用いて表現するため球形粒子を用いた DEM に比べて多くの粒子が必要となり計算コストが増大するため、GPU 計算の必要性が高まる。1 台の GPU で数十万～数百万個の非球形粒子による粉体シミュレーションを実行することができた。

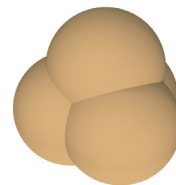


図 16 テトラポッド型非球形粒子

実問題への適用例として、長靴の足跡のシミュレーションを実行した。図 16 のように、4 つの粒子をテトラポッド型に連結させた非球形粒子を約 40 万個用いた。図 17 に (a)球形粒子、(b)テトラポッド型



(a) 球形粒子による計算



(b) テトラポッド型の非球形粒子による計算

図 17 長靴の足跡のシミュレーション

の非球形粒子を用いた場合のシミュレーション結果を示す。非球形粒子を用いた場合は粒子間のインターロックの影響が表われ、靴底の溝が確認できるほど明確な足跡が砂に残った。非球形粒子で計算することで粒子間の摩擦を正確に表現できることを確認した。

次に、大きさの異なる 5 種類の立方体を用いて攪拌シミュレーションを行った。最も小さい立方体は粉体と同程度のサイズであり、最も大きいものは最も小さい立方体の 16 倍の大きさである。計算に用いた粒子数の合計は 6,396,480 個で非常に大規模な計算である。粉体中に設置した板を回転させて攪拌を行ったときの様子を図 18 に示す。攪拌によりサイズ・セグレーションが起こり、大きい立方体が粉体中から表面に出てくる様子が確認できた。表面では中央付近に大きい立方体が集まり、中央付近から粉体中に沈んでいく。壁付近には小さい立方体が増える。

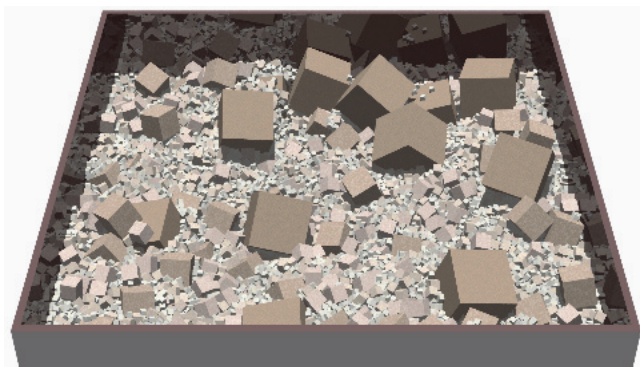


図 18 大きさの異なる 5 種類の立方体の攪拌

5.8 立方体の木片を多数含んだ流体構造連成シミュレーション

粒子法は空間に格子を切らずに任意の領域に対して計算ができるという利点がある。これは、格子法でも AMR 法などを導入することにより、必要な空間に必要な解像度の計算格子を割り当てることができるので、粒子法の利点は「容易に」計算できるという点になる。粒子法のもう一つの利点は、複雑形状の物体と流体の相互作用を同じ計算手続きで行える点である。流体部分を SPH 法で計算し、複雑形状の物体を前節の DEM 法で計算すれば、流体構造連成問題を計算することができる。

平成 26 年度は、予備的な計算として、立方体の木片を多数含んだ流体構造連成シミュレーションを行った。144m×160m×60m の計算領域に初期に深さ 1.6m の水を張り、そこに合計 2,304 個の浮遊する立方体の木片を配置した。各立方体の木片は 1,000 個の剛体連結された粒子で表現されている。流体の挙動を計算するために合計で 8,743 万個の流体粒子を用いている。TSUBAME2.5 の 256 個の GPU を用いて計算し、左側に 4.8m の津波による水柱を初期条件として設定し、津波が押し寄せてくる状況で多数の木片の振舞をシミュレーションにより明らかにした。

多数の物体と津波が相互作用することで津波のエ

ネルギーは弱くなり流れは穏やかになる。一方、物体を含んだ流れが建物などに当たる時の衝撃圧は流体の動圧ではなく、物体との衝突による衝撃圧となるため、遥かに大きな衝撃圧が建物等に加えられる。図 19 に立方体の木片を多数含んだ流体構造連成シミュレーションのスナップショットを示した。

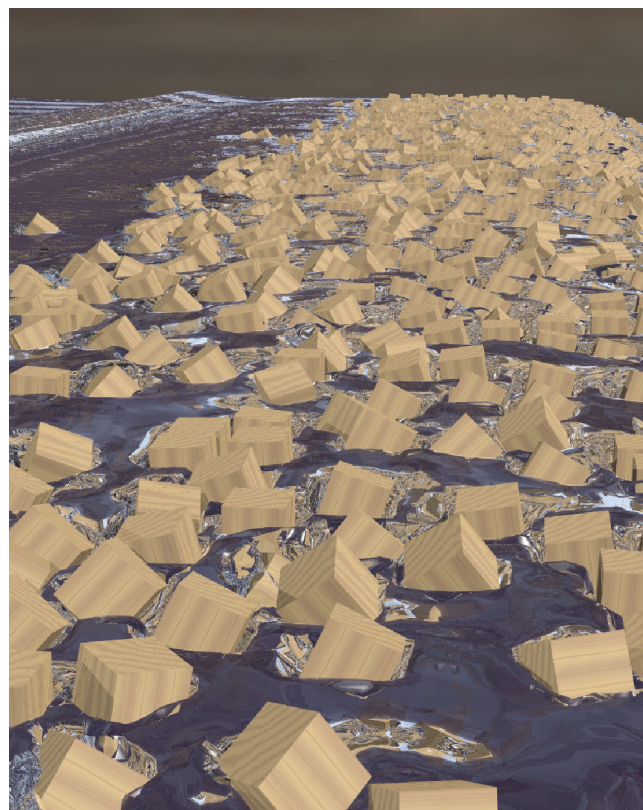


図 19 2304 個の物体を含む 8743 万個の粒子を用いた大規模サスペンション・フロー計算を 256GPU を用いて計算した結果

2 次元のスライス・グリッド法による動的領域分割を行っているが、単純に粒子数で均等分割しているため、流体計算を行う粒子と粉体計算を行う粒子との計算負荷の違いは考慮していない。また、複数領域に跨る複雑形状の物体の計算には力とトルクの総和計算が複雑になり、その効率的な計算方法を情報処理学会 HPCS2015 シンポジウムに「動的領域分割を用いた流体構造連成によるサスペンション・フローの大規模 GPU 計算」と題して投稿した。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

本研究課題では、申請時に Q1～Q4 の 4 項目の課題を掲げている。Q1 ではスライス・グリッド法による DEM シミュレーションの実問題の適用と、開発した DEM 計算コードのメモリ格納形式を Array of Structure (AOS) から Structure of Array (SOA) へ移行する計画を掲げている。このうち、前者については、現実サイズの 3 次元のゴルフ・バンカーショット計算とその定量評価を達成した。後者について、現在 DEM 計算コードを SOA に書き換える過程で性能評価を行っている。複数 GPU の計算コードにも SOA 形式の変更は大きく影響するため、ノード間

通信での性能評価も行う予定である。本研究で新たに開発している SPH の流体計算コードはすべて SOA 形式を採用している。

Q2、Q3 では、スライス・グリッド法による動的負荷分散の SPH 計算への適用と、SPH 計算及び通信部分の最適化を掲げている。複雑形状の物体へのダム崩壊問題など実問題への適用や、弱スケールリングによる性能評価を達成している。今回は簡単のために流体計算手法には、WCSPH という古典的な SPH を用いたが、精度の観点や計算コストの観点からも、WCSPH 以外の改良型の粒子法による計算手法が不可欠であり、本研究計画の範囲を超えて新しい粒子法の導入を進めて、九州大学と共同研究を行い、改良型 SPH 法を GPU 計算に導入することができた。

Q4 では空間充填曲線を用いた SPH 計算の動的負荷分散のプロトタイプの実装を掲げており、達成することができた。さらにコード・チューニングを進めており、実行性能や通信のオーバーヘッドを議論できる段階に至っている。

On-Chip メモリの利用による相互作用計算部分の最適化や SOA と AOS の性能評価を行い、接触による粒子間相互作用の GPU 計算での近傍探索手法についての成果を情報処理学会 ACS 論文に投稿した。また、SPH 法と DEM 法を組み合わせた流体一構造連成問題への展開が大きく進み、平成 27 年度の JHPCN 継続研究課題の中心的テーマとして発展した。また、研究計画の時点では予定に無かった Peano 曲線の検討や、非球形粒子を導入 DEM シミュレーションの開発などでもかなり研究成果が上がっており、それらを考慮すると 150%以上の達成度と言える。

2014 年 9 月 10 日に、九州大学 マス・フォア・インダストリ研究所 田上大助准教授とともに九州・博多リファレンス駅東ビルで「自由表面や気液界面を含む流れの数値解析 -粒子法と格子法, 数理と実践-」というタイトルのワークショップを開催した。本研究課題と深く関係しており、40 名を超える参加者が予定を過ぎて 19 時まで熱い議論を行った。

また、国際会議 SC14 で採択されたポスター発表 (研究成果リスト[3-3]) に対して、発表者の旅費をサポートして頂けることになり、深く感謝の意を表す。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

- [1-1] 渡辺勢也, 青木尊之, 都築怜理, 下川辺隆史: 接触による粒子間相互作用の GPU 計算での近傍探索手法, 情報処理学会論文誌 IPSJ Transactions コンピューティングシステム (ACS) 「投稿中」
- [1-2] 渡辺勢也, 青木尊之, 都築怜理: GPU を用いた個別要素法による粉体シミュレーションに対するメモリ使用量を抑えた高速化手法, 日本計算工学会誌, Transactions of JSCES 「投稿中」

(3) 国際会議発表

- [3-1] S. Tsuzuki, T. Aoki: A large-scale particle simulations using dynamic load balance on GPU supercomputer, 11th world congress on computational mechanics (WCCM), 3355, Barcelona, Spain, July, 2014
- [3-2] T. Aoki: Large-scale Stencil and Particle Simulations on GPU supercomputer TSUBAME, CEMSE(Computer, Electrical and Mathematical Sciences & Engineering) Seminar, KAUST, September 3, 2014 [Invited Lecture]
- [3-3] S. Tsuzuki, T. Aoki: Large-scale granular simulations using Dynamic load balance on a GPU supercomputer, SC14 Regular, Electronic, and Educational Poster, International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis 2014 (SC14), (採択率 39.0%).
- [3-4] Takayuki Aoki: Large-scale Stencil and Particle Applications and Their Performances on a GPU supercomputer, JST/CREST International Symposium on Post Petascale System Software, Kobe, December 4, 2014
- [3-5] Takayuki Aoki: Large-scale stencil and particle applications and their performances on a GPU supercomputer, Workshop on Recent Advances in Parallel and High Performance Computing Techniques and Applications, Singapore, January 15, 2015

(4) 国内会議発表

- [4-1] 都築怜理, 青木尊之: GPU スパコンを用いたバンカーショットの大規模 DEM 計算, 粉体工学会 2014 年度春期研究発表会, 京都, 5 月, 2014
- [4-2] 都築怜理, 青木尊之: GPU による大規模粒子法シミュレーションの実問題への適用, 日本計算工学会, 第 19 回計算工学講演会, 広島, 6 月, 2014
- [4-3] 都築怜理, 青木尊之: GPU スパコンによる大規模粒子法 (DEM, SPH) シミュレーション, 第 6 回アクセラレーション技術発表討論会, 沖縄, 6 月, 2014
- [4-4] 都築怜理: 動的負荷分散による SPH/DEM 大規模粒子法シミュレーション, JTC Japan 2014, 六本木, 7 月 [招待講演]
- [4-5] 都築怜理: GPU スパコンにおける動的負荷分散による粒子法 (SPH/DEM) の大規模シミュレーション, 粒子法コードユーザーグループ会合, 2014 年 7 月 31 日
- [4-6] 都築怜理, 青木尊之: 動的負荷分散による粒子法 (SPH/DEM) の大規模シミュレーション - GPU スパコンでの実装と性能-, ワークショップ 自由表面や気液界面を含む流れの数値解析 -粒子法と格子法, 数理と実践-, 博多, 2014 年 9 月 10 日
- [4-7] 青木尊之: Large-scale HPC Applications on a GPU supercomputer TSUBAME, エレクトロニクス実装学会 システムインテグレーション実装技

術委員会・研究会，東京・西荻窪（回路会館），
2014 年 9 月 10 日[招待講演]

- [4-8] 都築 怜理, 青木 尊之: GPU スパコンにおける動的負荷分散を用いた粒子法による大規模流体シミュレーション, 日本機械学会 第 27 回計算力学講演会, 盛岡, 2014 年 11 月 22 日
- [4-9] 都築 怜理, 青木 尊之: GPU スパコンにおける動的負荷分散を用いた粒子法による大規模, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 東京 (船堀タワーホール), 2014 年 12 月 10 日
- [4-10] 渡辺 勢也, 青木 尊之, 都築 怜理, 下川 辺隆史, GPU による近接相互作用に基づく粒子計算の近傍探索手法, 第 205 回 ARC・第 147 回 HPC 合同研究発表会 (HOKKE-22), 小樽, 2014 年 12 月 10 日

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

- [5-1] 青木 尊之: GPU コンピューティングによる大規模シミュレーション, プラズマ核融合学会誌・解説記事 2014 (J. Plasma Fusion Res. Vol.90, No.12 (2014) pp.755-763), P.755-763
- [5-2] 青木 尊之: 「駆ける」読売新聞・夕刊 9 面, 2014 年 12 月 25 日

(6) 受賞学術賞

- [6-1] 都築 怜理: 若手講演フェロー賞, 日本機械学会・計算力学部門, 2014 年 5 月
- [6-2] 都築 怜理, 青木 尊之: グラフィクスアワード最優秀賞, 日本計算工学会・第 19 回計算工学講演会, 2014 年 6 月 12 日
- [6-3] 都築 怜理, 青木 尊之: ベスト CFD グラフィックス・アワード動画部門 第 1 位, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 東京 (船堀タワーホール) 2014 年 12 月 10 日