

令和元年6月11日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2014～2018

課題番号：26220002

研究課題名(和文)ものづくりHPCアプリケーションのエクサスケールへの進化

研究課題名(英文) Advancement of HPC Applications for Manufacturing Technology to Exascale

研究代表者

青木 尊之 (Aoki, Takayuki)

東京工業大学・学術国際情報センター・教授

研究者番号：00184036

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 182,340,000円

研究成果の概要(和文)： 演算性能に対してメモリ帯域やノード間通信の性能が低いエクサスケールのスパコンにおいて、最もTime-to-Solutionが短くなるような数値計算手法の変更、計算高速化アルゴリズムの導入を行い、ものづくり系アプリケーションをエクサスケールで十分な実行性能が得られるように大きく進化させた。流体系アプリケーション、材料系アプリケーション、粒子系アプリケーションに陽解法および適合細分化格子法と動的負荷分散を導入し、Time-to-Solutionと計算規模を飛躍的に向上させ、エクサスケールのものづくりシミュレーションを実行することに対して十分な見通しを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ものづくり系アプリケーションの実行性能が飛躍的に向上することにより、より高精度・大規模計算が可能になり、流体力学や材料科学などにおいて新しい発見や現象の理解が大きく向上する。また、ものづくり系アプリケーションを設計ツールなどとして利用する産業分野において、生産性が飛躍的に発展する。シミュレーションを短時間で行えることになり、機械学習などと組み合わせ、より高度な解析・設計技術が期待できる。

研究成果の概要(英文)： In exascale supercomputers which have relatively poor memory bandwidth and low inter-node connection speed to computational performance, applications of manufacturing technology have revolutionary changes to minimize "Time-to-Solution" by introducing new numerical methods and innovative numerical algorithms. Explicit schemes, Adaptive Mesh Refinement (AMR) method and dynamic load balance extremely improve the "Time-to-Solution" and computational scales of these exascale applications for fluids, materials and particles. We have a strong confidence on execution of exascale applications for manufacturing technology.

研究分野：高性能計算アプリケーション，計算力学，数値流体力学

キーワード：ものづくり系アプリケーション Time-to-Solution 陽解法 弱圧縮性流体計算 AMR GPU

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在のスパコンは演算性能(GFLOPS)に対して低メモリバンド幅(GByte)のノード性能を持ち、ノード間のインターコネクション性能も 10GB/sec 程度と低く演算性能と通信性能のバランスが非常に悪い。演算性能に対してデータ通信性能が低い傾向は今後さらに悪化することは確実である。一方、アプリケーションの寿命はずっと長く、もはや既存のものづくり系アプリケーションでは現在の先端的スパコンでも十分に性能を発揮できない。その理由として、(1)計算がメモリアクセスに律速(低演算密度)、(2)レガシーな数値計算(離散化)手法の継続利用、(3)メモリ分散型のスパコンシステムに十分適合していない実装、(4)メモリアクセスのパターンがランダム、(5)遠方のメモリ参照を多数発行する計算アルゴリズムの採用などが挙げられる。特に GPU はエクサスケール・スパコンの演算プロセッサ候補であり、GPU スパコンでのものづくり HPC アプリケーションのエクサスケールの効率的な実行が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、2020 年頃に登場すると予想されていたエクサスケールのスパコンを念頭に置き、ものづくり HPC アプリケーションを大きく進化させ、真に『ものづくり』に貢献するアプリケーションの構築を行う。計算結果が得られるまでの実時間「Time to Solution」を最重要視し、そのための指針、具体的な数値計算手法、計算アルゴリズム、実装法を見出し、実際に『ものづくり』に革新的な発展をもたらすエクサスケールの流体解析アプリケーションを実現することを目的とする。

既存のアプリケーションはいくらチューニングしても、いくら実装を改良しても、エクサスケールで十分な規模の計算に対して求める「Time to Solution」得ることは不可能である。アプリケーション自体を根底から見直し、数値計算手法(ここでは、現象を記述する偏微分方程式などの離散化と定義する)に関して、(1)陰解法・半陰解法 完全陽解法(大規模疎行列計算の排除)、(2)スペクトル法など波数空間の解法 空間離散化手法、(3)低次精度空間離散化 高次精度空間離散化、(4)非構造格子 局所的に均一な構造格子に基づいた計算手法への転換を行い、エクサスケールのアプリケーションに適した数値計算手法の開発も進め、数値計算手法を変更することの有効性を実証する。さらにその中で使う計算アルゴリズムに対して、(a)データ移動を最小限にするアルゴリズム、(b)演算密度を向上させるアルゴリズム、(c)ノード間通信を隣接通信に限定し、最小化するアルゴリズム等を導入する。

本研究は、超大規模なアプリケーションを「Time to Solution」の観点から変革するという点で独創的であり、『ものづくり』の実応用の観点から大きな意義がある。一方、計算科学という観点では、上記のアルゴリズムを開発し、新しい数値計算手法に導入する。「Time to Solution」を追求することは計算結果/電力の性能を高めることでもあり、直接的な省電力化につながる。また、ものづくりアプリケーションにおける本研究のアプリケーションの成果は、他のものづくりアプリケーションへも確実に波及すると予想される。

研究最終年度(平成 30 年度)に登場すると予想していたエクサスケール・スパコンにおいて「Time to Solution」と実行性能を検証し、開発したアプリケーションを使ってものづくり分野での成果を示す予定であったが、世界的にスパコンの性能向上は大きく鈍化し、TSUBAME2.5 から TSUBAME 3.0 において 2.1 倍の 12.15PFLOPS にしか性能向上せず、ポスト「京」コンピュータの完成も平成 32 年に延期され、本研究期間内にエクサスケール・スパコンが登場しないことが明らかになった。そのような状況下においても、本研究はエクサスケール・スパコンにおいても十分な実行性能が得られる見通しを研究期間終盤の時期に利用できるスパコンで示すことができれば、十分に研究目的を達成したと言える。

3. 研究の方法

アプリケーションで用いる数値計算手法の演算密度(不動小数点演算回数÷メモリアクセスのデータ量)と、それから算出されるノード演算密度(ノード内実行性能/ノード間通信のデータ量)をモデルのキー・パラメータとし、複数ノードを用いて実際のアプリケーションを実行したときの実行性能を予測する。計算アルゴリズムに応じてメモリアクセスの種類やノード間のデータ移動量が決まり、これらから「Time to Solution」を算出する。

パフォーマンス・モデルに基づき、数値計算手法の探査と新しい手法を開発する。データ移動の少ないアルゴリズムを適用し、通信隠ぺい手法の導入、個別計算カーネルでの検証、ベンチマークテストでの計算精度・実行性能の検証、様々なレベルでのチューニングを TSUBAME2.5/3.0 で行う。アプリケーションとして 格子系の非圧縮性単相流体(乱流 LES)シミュレーション、気液二相流シミュレーション、流体-構造連成問題、フェーズフィールド法による凝固などの相変化や相分離を伴う流れ、粒子法による粒子・流体シミュレーションのアプリケーションを開発する。

これまでの非圧縮性流体計算については、このままではエクサスケールで十分な計算性能を期待できない計算手法であるために、陰解法や半陰解法から脱却し、大規模連立一次方程式の疎行列を解かない弱圧縮性流体計算手法による完全陽解法の探査を行う。完全陽解法の流体方程式は双曲型方程式となるため、空間に対して方向分離解法が使える。1次元方向の計算の繰り返しになるため、そこに特性線解法の適用を検討する。特性速度に対する移流計算に帰着できるため、計算の安定性が飛躍的に向上し、「Time to Solution」にとって非常に大きな利点

のあるセミ・ラグランジュ解法が適用できるようになる。高次の補間関数を使えば演算密度が上昇し実行性能も向上するため、パフォーマンス・モデルを用いて詳細な検討を行う。また、陽解法である格子ボルツマン法の適用も進め、D3Q27 モデルに MRT (Multi-Resolution Time) 積分を適用することにより、計算安定性と演算密度を向上させる。さらに Cumulant 衝突項を導入し、陰的 LES として計算の安定化を図る。粒子法についても非圧縮性計算には陽的 SPH 法を、粉体シミュレーションには個別要素法を適用し、大規模計算を可能にするために必須の計算負荷とメモリ使用を均一に分散させる動的領域分割を導入する。

ものづくり系の直交格子アプリケーションでは、必要な領域に必要な格子解像度を割り当てる適合細分化格子 AMR (Adaptive Mesh Refinement) を導入することは解析効率の観点から必須であり、「Time to Solution」を大幅に短縮することができる。8 分木アルゴリズムにより再帰的に格子を細分化し、末端のリーフには $8 \times 8 \times 8 \sim 32 \times 32 \times 32$ 格子などのブロックを適用しメモリアクセスを向上させる。リーフをたどる空間充填曲線を用いた動的負荷分散を導入し、これまでに達成されていない大規模な計算を行う。AMR は、 CPU 、 GPU 、 CPU+GPU に適用する。

4. 研究成果

アプリケーションのパフォーマンス・モデルの構築

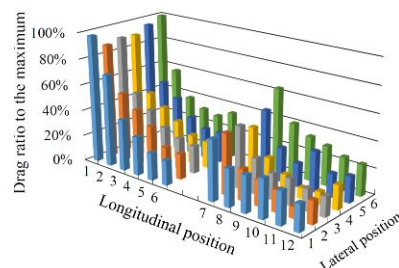
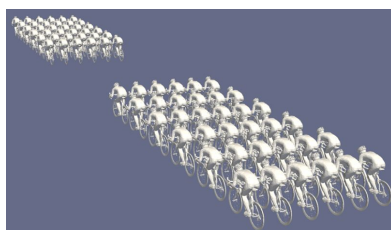
エクサスケール・スパコンを想定し、プロセッサ単体、ノード内構成、ノード間通信性能の詳細な項目のスペックを設定した。ルーフライン・モデルよりさらにキャッシュなどの様々なローカルメモリの影響を考慮した単一ノードに対するパフォーマンス・モデルへと発展させた。加えてノード間通信性能をモデルに組み込み、アプリケーションで用いる数値計算手法のプロセッサ演算密度 (浮動小数点演算回数 ÷ メモリアクセスのデータ量) と、それから算出されるノード演算密度 (ノード内実行性能 ÷ ノード間通信のデータ量) をモデルのキー・パラメータとし、2011 年にゴードンベル賞を受賞したフェーズフィールド計算のアプリケーションに適用し「Time to Solution」を予測した。

研究計画の 5 項目のアプリケーションに対して、以下の研究成果が得られた。

格子系の非圧縮性単相流体 (乱流 LES) シミュレーション

完全陽解法である格子ボルツマン法をものづくり計算に適用するため、物体近傍や複雑形状の境界近傍に細かい格子を配置する AMR 法を D3Q27 型格子ボルツマン法に適用した。AMR のリーフでの実行性能を向上させるための C++ テンプレートによる GPU カーネル関数の自動生成を試し、通常の実装に対して 10 倍以上の高速化を達成した。8 分木データ構造に基づいた AMR を導入し、リーフのサイズを $8 \times 8 \times 8$ 、 $16 \times 16 \times 16$ および $32 \times 32 \times 32$ の実行性能を検証した。時間積分に実装が困難な MRT (Multiple Relaxation Time) 法を導入し、精度と安定性を向上させた。さらにヒルベルト空間充填曲線を用い領域分割を行い、複数 GPU での大規模計算を実行可能とした。

アプリケーションとして、複数台の自転車を含む競技を想定した流れのシミュレーションを行った。計算の「Time-to-Solution」を大幅に短縮する AMR 法を適用した。高レイノルズ数の流れであるため全領域に MRT モデルとコヒーレント構造スマゴリンスキー・モデルによる LES 渦粘性を導入し、物体近傍には Cumulant モデルを設定した。2 種類の空間充填曲線を用いた領域分割を行い、大規模空力解析を効率的にシミュレーションすることができた。また、検証として行った球周りの流れでは、レイノルズ数が 50 万程度で抗力が急激に低下するドラッグ・クライシスを再現することができた。さらに、自転車競技を想定した流れの大規模な LES 空力解析を行った。8 人の集団走行における縦列配置とひし形配置の隊列位置における各自転車の空力抵抗を評価し、協議戦略に役立つ知見が得られた。また、72 人の集団に対して 22.3 億格子を用い Tsubame3.0 の 192 個の GPU で計算し、中央部は先頭の 5% の空力抵抗しか受けないことが明らかになった。

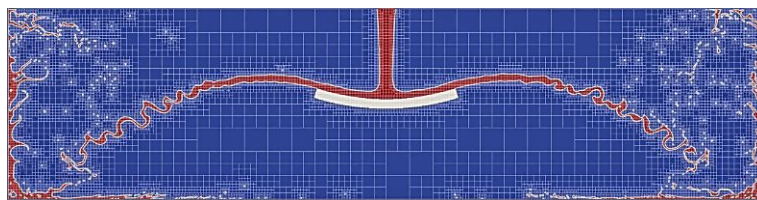


アプリケーションとして、複数台の自転車を含む競技を想定した流れのシミュレーションを行った。計算の「Time-to-Solution」を大幅に短縮する AMR 法を適用した。高レイノルズ数の流れであるため全領域に MRT モデルとコヒーレント構造スマゴリンスキー・モデルによる LES 渦粘性を導入し、物体近傍には Cumulant モデルを設定した。2 種類の空間充填曲線を用いた領域分割を行い、大規模空力解析を効率的にシミュレーションすることができた。また、検証として行った球周りの流れでは、レイノルズ数が 50 万程度で抗力が急激に低下するドラッグ・クライシスを再現することができた。さらに、自転車競技を想定した流れの大規模な LES 空力解析を行った。8 人の集団走行における縦列配置とひし形配置の隊列位置における各自転車の空力抵抗を評価し、協議戦略に役立つ知見が得られた。また、72 人の集団に対して 22.3 億格子を用い Tsubame3.0 の 192 個の GPU で計算し、中央部は先頭の 5% の空力抵抗しか受けないことが明らかになった。

気液二相流シミュレーション

ものづくり系の非圧縮性流体アプリケーションの中で、最も大規模計算を苦手とするのが気液二相流シミュレーションであり、これまで成功している気液界面を有限幅として扱う方法は、非圧縮性条件を満足させるために圧力の Poisson 方程式を解く必要がある。気液二相流のような密度比が大きく違う場合、連立一次方程式の疎行列に値が 1000 倍も異なる非ゼロ要素に現れ、マルチグリッド法などの効果的な前処理法を用いても反復計算の収束性が非常に悪い。そこで新しい数値計算解法として、弱圧縮性流体計算を特性線法、方向分離法、音速の制御などを組み合わせることにより、完全陽解法で半陰解法や陰解法と遜色ない数値計算結果を得られることを示すことができた。この成果は本基盤研究 (S) の最も困難であると予想された部分での非常に大きな研究成果である。Time-to-Solution を大幅に短縮するための数値計算手法の変更であり、特性線法は演算密度の向上、方向分離法はデータ通信量の削減と演算密度の向上の両方

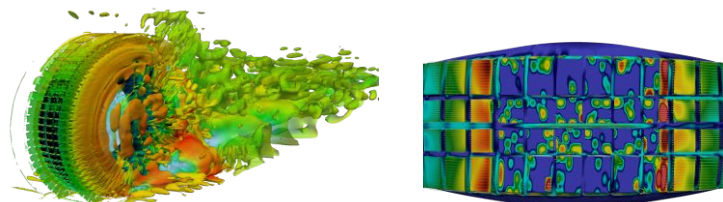
に寄与する。また、ノード・センターで計算を行うため、AMR 法の実装における難易度を大幅に低減させている。ものづくりアプリケーションの大きな課題である気液二相流解析を大きく進展させることができる。さらに、Octree ベース細分化による AMR を用いて最細格子を気液界面に適合させ、弱圧縮性流体計算による気液二相流計算を行うことができるようになり、落下する水がスプーンに当たり形成される安定な液膜やシャボン玉の液膜など、均一格子を使う場合と比較して 1/100 の格子点数で計算することができた。さらに、等温過程を導入することにより、これまでの特性線に基づいた手法よりも計算効率を向上させることができた。スタッガード格子点配置になるが、Octree ベース細分化による AMR を GPU 実装する観点で問題がないことが明らかになった。



流体 - 構造連成問題

トポロジーが変わる空間を流れる流体解析の実現するために、解析精度と効率の両面から物体適合格子を用いた計算手法を構築した。ある時刻における空間の形状、という捉え方ではなく、空間が変形するという軸間に対して適合した格子を作ることで、物体の接触や弁の開閉の動作を離散化する手法を構築した。これまでの非構造格子による解析手法から、構造格子を用いた高次精度解析手法を取り入れた。さらに高次関数による曲面の再現性能の向上により、複雑形状を少ない格子点で実現することができるようになった。3次元の実問題の解析例としては、路面と接触する凹凸を有するタイヤの周囲流れ解析、人工弁や心臓弁周囲の流れ、羽根を接触させる昆虫の羽ばたき、流体潤滑から接触が生じる軸受の解析という非常に複雑な形状や問題に適用することができた。

非圧縮性流れの場合、質量保存は体積保存に相当し、トポロジーが変わる問題ではそれが大きな制約となる。接触部が閉じた空間を作る場合、その空間の体積が同一でなければ非圧縮性コンディションを満たさない。例えば、軸受のように極端に隙間が狭い場合、流れはレイノルズ方程式による記述が可能であり、厚み方向をモデル化することにより未知数は表面のみに分布する。一方、ナビエ・ストークス方程式では厚み方向を解像する



タイヤ周囲の流れ (左) とタイヤ下面の壁面せん断応力 (右)

の必要があり 3次元となり、厚み方向の分割数を変えてテストを行ったが、同一といえるほどの解は得られなかった。一貫した定式化を用いることと、2次関数を用いることで、厚み方向の分割数 1 でレイノルズ方程式相当の解が得られることを示した。これにより、マルチスケール問題を単一のプラットフォームで解析することを実現した。さらに、トポロジー変化に対応するための工夫を行い、トポロジーの変化する課題においても解の精度が落ちないことも確認できた。本手法は、軸受・タイヤの接触・心臓弁の開閉などにも適用しその有効性が確認できた。タイヤにも適用したものが上図で、路面の凸凹により隙間が空いた箇所には流れが出入りし、完全に接触する場合と完全に離れている場合の中間を著すことを実現した。

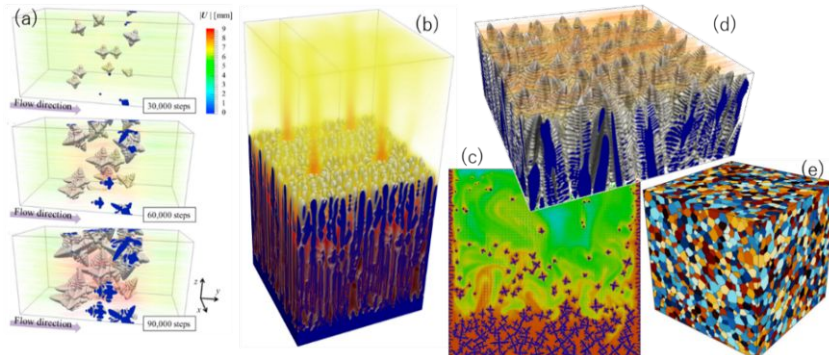
フェーズフィールド法による凝固と粒成長の組織予測シミュレーション

二元合金凝固の定量的フェーズフィールドモデルを一方向凝固問題に適用し、その並列 GPU コードを開発した。長時間の凝固現象を観察できるように、デンドライト先端の成長速度で移動する座標系でコード開発を行った。これにより統計的評価が十分可能なデンドライトの本数で、時空間いづれにおいても超大規模なシミュレーションに成功した。本成果により初めて 3次元で複数デンドライトの相互作用評価ができるようになり、単結晶・二結晶・多結晶の柱状晶における競合成長現象のメカニズム解明に貢献した。

フェーズフィールド法と格子ボルツマン法を連成させた並列 GPU コーディングを行い、複数デンドライトが液相流動内で成長する超大規模計算を世界で初めて可能とした。図(a)は強制対流下で複数デンドライトが成長する計算であり、1536 × 1536 × 3072 格子、90000 ステップの世界最大の計算を 512 個の GPU を用いて 17 時間で完了させた。これによって液相流動を伴う凝固組織予測の系統的な 3次元評価が可能となった。また、本手法を応用することで、図(b)に示すような複数デンドライトが一方向に成長する問題における自然対流の影響を、世界で初めてフェーズフィールド法を用いて再現した。加えて、図(c)に示すような複数デンドライトが運動しながら成長し、衝突と合体を繰り返して一つの固体となっていくプロセスを大規模に計算することにも成功した。さらに、デンドライトをフェーズフィールド法によって成長させた後、格子ボルツマン法で液相を流動させ、デンドライト樹間の液相の流れに対する透過率の算出を可能とした。図(d)は、2048 × 2048 × 1024 の大規模格子を用い、これまでに無い極めて現実に近い凝固組織に対する透過率を算出した結果である。これによって、これまで不可能だったデン

ドライツ間透過率の高精度予測が可能となった。

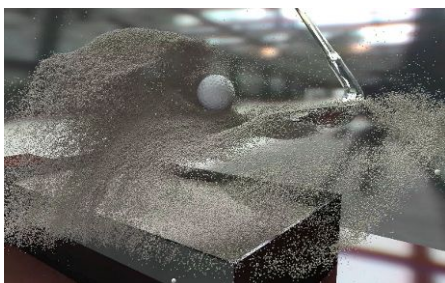
凝固完了後に生じる粒成長に関して、世界最大の理想粒成長のフェーズフィールドシミュレーションを可能とした。図(e)は $2560 \times 2560 \times 2560$ 格子、約 300 万初期粒を用いた粒成長の様子である。300 万個の粒を表現するために、300 万個のフェーズフィールド変数を利用しており、active parameter tracking の導入と複数 GPU 並列化によって効率的な大規模粒成長シミュレーションを可能とした。これによって、これまで知られていなかった、理想粒成長における真の統計的挙動を示すことができた。また、この結果を適用することで、3 次元組織とその 2 次元断面組織の相関関係を高精度に予測した。



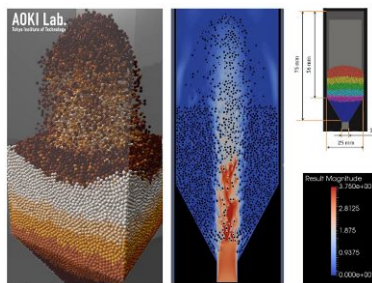
液相流動を伴う凝固と粒成長の組織形成シミュレーション

粒子法による粉体・流体シミュレーションのアプリケーション

個別要素法による大規模粉体シミュレーションとして、1,670 万個の粒子を用いたバンカーショット・シミュレーションを 64 個の GPU を用いて実行した。最初はスライス・グリッド法による動的領域分割を行ったが、並列スケールが十分ではないため、空間充填曲線に基づいた動的領域分割を粉体シミュレーションに初めて導入し、スケールを大幅に改善した。



バンカーショット・シミュレーション



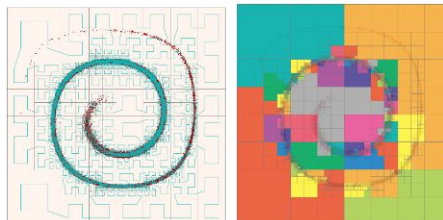
固気噴流層シミュレーション

流体と粒子が相互作用する流れとして、流動層の大規模シミュレーションを行った。流体解析には格子ボルツマン法を導入した。これまでの計算は粒子を点として扱い、格子サイズより十分小さいとしてモデル化しているが、実際の粒子サイズを用い、粒子より細かい格子を用いることで粒子と流体間の直接相互作用を計算する大規模シミュレーションが可能になった。8 万粒子と流体計算には $512 \times 512 \times 1,680$ 格子を用いた固気混相流の流動層シミュレーションを 128GPU で実行した。下からの噴流により粒子が巻き上げられ攪拌されるようすが分かる。

個別要素法による土砂流動解析と落石解析に対して、模型実験と実大規模実験の再現解析を実施することにより、粒子サイズや粒子形状、および各解析パラメータが結果に与える影響を整理し、その結果に基づいて評価フローを提案した。落石については、模型実験の再現解析を実施し、異なる形状精度の落石モデルの解析結果と実験結果を定量的に比較することにより、落石の形状表現精度の基準を提案することができた。

動的負荷分散による粒子法の大規模シミュレーション

粉体や流体を粒子法によりシミュレーションする場合、時間・空間的に粒子分布が変化するために動的に領域を分割して負荷分散・メモリ分散しない限り大規模シミュレーションを行うことができない。この分野では初めて 2 次元スライス・グリッド法を導入し、1 億個を超える粒子数に対して GPU スパコン TSUBAME でものづくり系のアプリケーションを実行することができた。しかし、GPU 数を増やして計算を大規模にするにつれて弱スケールすらも理想的な直線から逸脱してしまう。そこで新たな動的領域分割法として空間充填曲線を用いた方法を提案した。空間を 4 分木 (8 分木) アルゴリズムに基づき分割し、粒子が多く存在する領域はさらに分割し、最終的に領域の中の粒子数が規定値以下になるまで分割を繰り返す。その領域をヒルベルト曲線やペアノ曲線などの空間充填曲線で粒子数をカウントしながらたどり、所定の数になったところで空間充填曲線を切断し、その線分の占める領域を 1 つの GPU が計算する領域とする方法

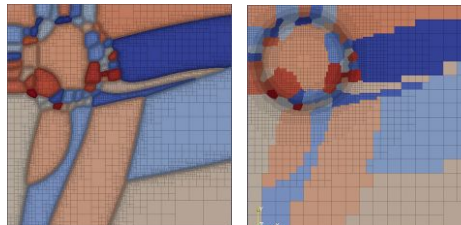


空間充填曲線による領域分割

を導入した。これにより、弱スケーリングが大きく向上し、512GPUでは「Time-to-Solution」も半分に短縮することができた。しかし、まだ理想的な強スケーリングに到達しておらず、その原因は分割領域の境界形状の複雑さであることが明らかになった。直交格子ベース流体計算にAMR法を適用した場合も同じことが起り、分割領域の境界形状の複雑さが通信のオーバーヘッドを大きくし、大規模計算の実行性能を低下させる要因であることが明らかになった。

マルチ・フェーズフィールド法のトポロジー最適化による領域分割

エクサスケールの大規模計算では、計算負荷（固気混相流では粒子計算と格子計算）をバランスさせつつ、領域間通信をできるだけ少なくするような新しい領域分割法が必要である。マルチ・フェーズフィールド(MPF)法によるトポロジー最適化を領域分割に適用し、領域間通信のコストも計算負荷とほぼ対等に換算する評価関数を作成し、それを最小化するようにMPF法を時間発展させ、計算領域のトポロジーを最適化する。MPF方程式を全ての格子点上で解くのではなく、AMRのリーフを代表して1点として計算するため、その計算負荷は小さい。また、気液界面に沿って格子を寄せるなどの場合には、直前の分割領域のトポロジーからの変化はそれほど小さくなく、トポロジー最適化の収束性は良い。



MPFの変数（左）と領域分割（右）

MPF法による粒成長を並列計算の領域分割に適用し、時間発展させることで各領域の体積（計算負荷）を均一にしつつ、各領域が凸形状になるようにトポロジー最適化が行えることを確認した。これまでのスライス・グリッド法や空間重点曲線による領域分割と比較し、領域間通信量を低減できることを確認した。分割領域が凸形状になるため、モートン曲線やヒルベルト曲線などの空間充填曲線を用いる方法より領域間通信を最大で30%低減することが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 81 件)

- [1] Yos Sitompul, Takayuki Aoki: A Filtered Cumulant Lattice Boltzmann Method for Violent Two-phase Flows, J. Comput. Phys., in press, online 15 April 2019 (査読有)
- [2] Shintaro Matsushita, Takayuki Aoki: A weakly compressible scheme with a diffuse-interface method for low Mach number two-phase flows, J. Comput. Phys., 376(6), pp.838-862, 2019 (査読有)

〔学会発表〕(計 365 件)

〔図書〕(計 4 件)

〔その他〕

〔受賞学術賞等〕(計 24 件)

〔新聞報道〕(計 6 件)

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：高木 知弘
ローマ字氏名：(TAKAKI, Tomohiro)
所属研究機関名：京都工芸繊維大学
部局名：機械工学系
職名：教授
研究者番号(8桁)：50294260

研究分担者氏名：滝沢 研二
ローマ字氏名：(TAKIZAWA, Kenji)
所属研究機関名：早稲田大学
部局名：理工学術院
職名：教授
研究者番号(8桁)：60415809

研究分担者氏名：森口 周二
ローマ字氏名：(MORIGUCHI, Shuji)
所属研究機関名：東北大学
部局名：災害科学国際研究所
職名：准教授
研究者番号(8桁)：20447527

研究分担者氏名：下川辺 隆史
ローマ字氏名：(SHIMOKAWABE, Takashi)
所属研究機関名：東京大学
部局名：情報基盤センター
職名：准教授
研究者番号(8桁)：40636049

(2)研究協力者

研究協力者氏名：小野寺 直幸
ローマ字氏名：(ONODERA, Naoyuki)

研究協力者氏名：遠藤 敏夫
ローマ字氏名：(ENDO, Toshio)

研究協力者氏名：額田 彰
ローマ字氏名：(NUKADA, Akira)