

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	運動量保存型弱圧縮性二相流の大規模 GPU 計算ソルバー
Title(English)	A Momentum-conserving Weakly Compressible Navier-Stokes Solver for Large-scale Two-phase Flow Simulation on GPUs
著者(和文)	YangKai
Author(English)	Kai Yang
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12521号, 授与年月日:2023年9月22日, 学位の種別:課程博士, 審査員:青木 尊之,末包 哲也,奥野 喜裕,大西 領,門永 雅史
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12521号, Conferred date:2023/9/22, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名		YANG Kai	
論文審査 審査員		氏 名	職 名		氏 名	職 名
	主査	青木 尊之	教 授	審査員	門永 雅史	特任教授
	審査員	末包 哲也	教 授			
		奥野 喜裕	教 授			
		大西 領	准教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「A Momentum-conserving Weakly Compressible Navier-Stokes Solver for Large-scale Two-phase Flow Simulation on GPUs (運動量保存型弱圧縮性二相流の大規模 GPU 計算ソルバー)」と題し、6 章より構成されている。 第 1 章「Introduction」では、さまざまな工学分野において非圧縮性気液二相流解析で高解像度シミュレーションが重要になっていることを概観し、新しいプロセッサや計算機システムで大規模計算が可能な計算手法の開発が必要なことを述べている。既存の非圧縮性流体計算ソルバーでは、非圧縮性条件を満たすために圧力のポアソン方程式を解く際の線形行列ソルバーによる反復計算が計算時間の大半を占めていること、および気体と液体の密度比が大きい場合には、大規模計算になると収束性が大きく低下する深刻な問題があることを指摘している。またこれらの問題を解決するために、非圧縮性を近似的に満足する弱圧縮性解法が提案されていることを述べている。以上を踏まえて、気相と液相の区別をせず密度のみ識別する 1 流体モデルを用いて気液二相流を高精度・高効率で安定に解く弱圧縮性計算手法を開発することを研究目的に定めている。 第 2 章「Weakly Compressible Navier-Stokes Solver」では、Navier-Stokes 方程式と圧力の時間発展方程式を解くことで陽解法の弱圧縮性流体計算手法を導出し、非圧縮性流体においては除かれる音波の伝播を効率的に減衰させるために、圧力のプロジェクションの 1 ステップの中で音波項を反復計算することで遠方まで伝播させる方法を提案している。提案手法の特徴は、第一に、反復計算自体は計算量が少なく、隣接セルしか参照しないため全体の計算時間に殆ど影響しないこと、第二に、気体と液体を識別するフェーズフィールド法の変数はセル中心で定義して保存形で解き、速度と圧力はスタッガード格子配置の有限差分法を用いて解くことにある。高レイノルズ数の気液二相流のベンチマーク問題で検証を行い、提案手法の有効性を示している。 第 3 章「Momentum Conservation for Two-phase Flow」では、密度だけでなく運動量も有限体積法に基づいて保存させながら時間積分する弱圧縮性気液二相流計算手法を提案している。気体と液体の密度が大きく異なる場合、速度を求める際に運動量を密度で除すため、運動量と密度の界面プロファイルが整合していないと計算が破綻すること、また、コロケート格子を使うので速度と圧力の相互参照の結合関係が弱く不安定になることを指摘している。提案手法では、スタッガード格子上で一時的な速度を求めることにより音波伝播に由来する数値振動を抑制し、高レイノルズ数の流れの計算に対しても高精度で安定に計算できることを確認している。また、運動量が保存されることにより、気液界面での強いせん断流れにおける非物理的 Kelvin-Helmholtz 不安定性の成長が抑えられ、液体ジェットの噴霧化の計算結果が大きく改善されることを示している。 第 4 章「Multi-GPU Scalability」では、計算性能の高い GPU を複数搭載する計算機システム上で、気体と液体の識別にフェーズフィールド法と PLIC-VOF (Piecewise Linear Interface-capturing - Volume-of-fluid) 法の 2 つの手法による弱圧縮性気液二相流の大規模計算を比較している。これらの手法に基づいた 2 つのソルバーは十分良いスケーラビリティを持ち、通信の少ない領域分割や領域間通信と計算のオーバーラップ手法が有効であることを述べている。実行性能は、PLIC-VOF 法を用いたソルバーの方が 1.3 倍速く、表面張力計算に Height Function を用いる場合には、格子解像度を上げていくと同じ計算結果に近づいていく解の収束性を持つことを確認している。これらの手法によりミルク・クラウンの形成や 3 次元ダム崩壊問題など 1 億格子を超える大規模計算が行えることを実証している。 第 5 章「Spatially Sparse Grid Structure on GPU」では、流れの変化が局在するような状況において、計算が必要な領域にのみハッシュ法を用いて格子を割り当てる方法と、格子を階層的に細分化して必要な領域にのみ細かい格子を割り当てる適合格子細分化法を用いたメモリの有効利用について検討している。GPU 計算の効率を飛躍的に向上させるためには、メモリアクセスの不連続性、データ構造の複雑さ、保存性を維持した空間補間の計算負荷などのオーバーヘッドを低減させる実装が必要であると述べている。 第 6 章「Conclusions」では、各章において得られた成果を要約し、結論としてまとめている。 以上を要するに、本論文は非圧縮性気液二相流解析に対し、運動量を保存する陽解法の弱圧縮性流体計算手法を開発し、安定性と計算精度を維持しつつ GPU を用いた大規模計算を可能とするもので、工学上および工業上貢献するところが大きい。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として十分価値のあるものと認められる。
--

注意:「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。