

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	弱圧縮性流体計算による非圧縮性気液二相流の数値シミュレーション
Title(English)	Incompressible Gas-Liquid Two-Phase Flow Simulation based on Weakly Compressible Scheme
著者(和文)	松下真太郎
Author(English)	Shintaro Matsushita
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11415号, 授与年月日:2020年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:青木 尊之,平井 秀一郎,末包 哲也,肖 鋒,長崎 孝夫
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11415号, Conferred date:2020/3/26, 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	松下 真太郎	
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	長崎 孝夫	准教授
	審査員	末包 哲也	教授			
		肖 鋒	教授			
平井 秀一郎		教授				

## 論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「弱圧縮性流体計算による非圧縮性気液二相流の数値シミュレーション」と題し、7 章より構成されている。

第 1 章「緒言」では、研究背景として気液二相流シミュレーションの重要性を述べ、半陰解法で時間積分を行う非圧縮性気液二相流解析はポアソン方程式の求解がボトルネックとなり、従来の研究が気液界面を十分な精度で計算できていないことを指摘している。陽解法と共に気液界面に動的に高解像度格子を集める AMR (Adaptive Mesh Refinement) 法の適用により、気液が激しく入り混じる流れや薄い液膜の流動解析など、これまで困難とされてきた非圧縮性気液二相流の解析を可能にする計算手法の開発と、高効率で計算を行うための GPU 実装を実証することが本研究の目的であると述べている。

第 2 章「特性線に基づく弱圧縮性計算による気液二相流解析」では、Fractional Step 法と方向分離法を適用し特性線解法に基づいて圧縮性 Navier-Stokes 方程式を解き、Phase Field 法による界面捕獲計算と組み合わせる弱圧縮性計算の気液二相流解析手法を提案し、気泡上昇やダム崩壊流れなどの非圧縮性気液二相流の典型的なベンチマーク問題に適用し、既往研究の結果との良い一致を示している。濡れた床へのダム崩壊流れは砕波により気液二相が激しく入り混じる高レイノルズ数流れの問題であるが、複数 GPU を用いて約 1 億格子点規模の計算が安定に実行できることを示している。

第 3 章「等温過程の Navier-Stokes 方程式を解く弱圧縮性解法の導入」では、等温過程で導出される流体方程式に対する弱圧縮性解法を新たに提案している。移流項の計算に差分法を用いることで、密度変化を考慮した離散化が可能になり、従来の非圧縮性気液二相流解析で大きな問題となっていた気液界面での非物理的な運動量交換を大幅に抑制している。さらに、特性線解法による計算と比較し、液相の速度場の発散および圧縮率が 1/10 程度に低減されることを明らかにしている。

第 4 章「界面に適合する AMR 法」では、弱圧縮性流体計算による気液二相流解析手法への AMR 法の導入と GPU 計算の実装の有用性を示している。木構造に基づくブロック型の格子細分化により、気液界面近傍に高解像度格子を集めることで、高精度計算を維持しつつ格子点数の大幅な削減を可能にしている。格子のノード上で流体の速度場を計算する特性線法に基づく手法は AMR 法に適用しており、保存性を保証する界面追跡のための Phase Field 方程式に対し、マルチモーメント法の適用による隣接点参照のみの高次精度計算と質量の保存性を両立する手法を提案している。等温過程の弱圧縮性解法では AMR 法を適用した場合に、格子の粗大化時に計算精度が悪化するが、界面近傍で細分化レベルに差が付かないようにすることで回避し、ダム崩壊計算や気泡上昇問題で均一格子の計算結果と良く一致することを示している。液体ジェットを流入する問題では、従来の均一格子による非圧縮性解析の例と比較し、1/30 以下の少ないメモリ使用で高速に計算できることを示している。さらに、シャボン玉の 2 次元シミュレーションでは、初期直径の約 8 倍程度まで膨張する過程を再現しており、これまで極めて困難であった薄い自由液膜中の液体の流動が解析可能であることを示している。

第 5 章「FENE-CR モデルの導入による粘弾性流体解析」では、粘弾性流体の FENE-CR モデルに基づく構成方程式を弱圧縮性流体計算へ導入し、液相を粘弾性流体とする AMR 法を導入した気液二相流解析が可能であることを示している。液体中を上昇し液面に達した気泡が液体自由膜を形成する流動解析を行い、粘弾性応力が薄膜化による液膜崩壊を阻止する要因とはならないことを明らかにしている。

第 6 章「界面活性剤の吸着・脱離を考慮した輸送方程式と濃度差マランゴニ効果の導入」では、非イオン性界面活性剤の輸送方程式とマランゴニ効果を、AMR 法を適用した弱圧縮性解法に導入している。前章と同様な液膜の流動解析を行い、気液界面上の界面活性剤濃度が飽和濃度に近くなるとマランゴニ効果が強く働くことにより、液膜が崩壊せず長時間安定に維持できることを明らかにしている。

第 7 章「結言」では、各章において得られた成果を要約し、結論を述べている。

これを要するに、本論文は非圧縮性気液二相流解析に対して弱圧縮性流体計算に基づく陽解法の解析手法を構築し、気液界面に高解像度格子を集める AMR 法の導入と GPU 実装による高効率計算を示し、粘弾性流体、界面活性剤輸送を含む幅広い気液二相流に対する詳細な解析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。