

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Lattice Boltzmann Method for Two-phase Flows with High Density Ratio and Reynolds Number
著者(和文)	SITOMPULYOS P
Author(English)	Yos Sitompul
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11912号, 授与年月日:2021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11912号, Conferred date:2021/3/26, 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	Yos Panagaman Sitompul		
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	平井 秀一郎	教授			
		末包 哲也	教授			
		肖 鋒	教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「Lattice Boltzmann Method for Two-phase Flows with High-Density Ratio and Reynolds Number (格子ボルツマン法に基づいた高密度比・高レイノルズ数の二相流解析手法)」と題し、6 章より構成されている。

第 1 章「Introduction」では、背景としてさまざまな工学分野で気液二相流のシミュレーション解析が重要であることを概観し、界面の変動が激しい流れでは高解像度で計算する必要があり、大規模計算を行う必要があることを述べている。非圧縮性二相流に対する従来の半陰解法による計算手法ではボアソン方程式の求解がボトルネックとなり、十分な精度で計算ができていないことを指摘している。陽解法であり大規模計算に適した格子ボルツマン法は斜め方向の速度分布関数を持つために単相流体解析では十分高い精度で効率的に計算できるが、気液二相流に対しては計算が不安定になることを指摘している。気液の密度比が大きく、気液界面が激しく変動するような高レイノルズ数の二相流に対し、キュムラント型格子ボルツマン法を基にした新しい計算手法の開発が本研究の目的であると述べている。

第 2 章「Basic theory」では、格子ボルツマン法は位相空間で速度分布関数を疑似粒子として扱う陽的時間積分の計算手法であり、導入するキュムラント型格子ボルツマン法は高い安定性と計算精度を持つことを説明している。気液二相流に対しては、圧力の時間発展方程式と界面を捕獲するためのフェーズフィールド法に基づいた保存型 Allen-Cahn 方程式をさらにカップリングさせて解く必要があり、これらを含めた計算全体の枠組みを述べている。

第 3 章「Cumulant LBM for Violent Two-phase Flows」では、水と空気の系でのダムブレイク問題のように高密度比の気液界面が激しく入り混じる流れの計算に対し、セルベクレ数に基づいたフィルタの導入を提案している。これにより、これまでの格子ボルツマン法では計算が不安定で解くことのできなかつた流れに対し、初めて安定に計算することを可能にしている。また、フィルタを導入することで数値粘性が生じるが、高解像度計算を行うことでその影響を低減ができることを明らかにしている。

第 4 章「Cumulant LBM for Turbulent Bubbly Flows」では、開発した計算手法を用いて多数の気泡を含んだパイプ内の気液二相乱流計算を行っている。従来は気液の密度比が小さく、低レイノルズ数で気泡が殆ど変形しない条件で計算されていたが、提案手法により実際の水と空気の密度比、高レイノルズ数、実際の表面張力の値を用いた計算が可能であることを示している。気泡同士の非物理的な合体を防ぐために、気泡毎に異なるフェーズを割り当てるマルチ・フェーズフィールド法を導入し、同時に Active Parameter Tracking 法を使うことでメモリの大幅な削減を達成している。円形断面の流路での計算に本研究の手法を適用することにより、実験と定量的な比較を行うことのできる計算が初めて可能になり、平均流速分布、ボイド率分布など、計算が実験と良く一致する結果が得られているだけでなく、実験では測定できない統計量や瞬時の流速分布、乱流諸量のプロファイルが得られることも明らかにしている。

第 5 章「Cumulant LBM for Foam Simulations」では、第 4 章の計算手法を泡沫シミュレーションに適用している。圧力の時間発展方程式の計算を時間ステップ内で 10 回程度反復させることにより、非圧縮性により近い流れ場になることを示している。水中に多数の気泡を含み上方に大気との界面のある状態から開始し、多数の気泡が上昇して水面上に泡沫を形成する計算を示している。その結果、液膜が気泡間の隔壁となり、泡沫の典型的な準安定配置が形成されることを明らかにしている。

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。

これを要するに、本論文は気液界面が激しく変動する非圧縮性気液二相流のシミュレーション解析に対し、格子ボルツマン法を基に安定に計算できる手法を開発し、実際の気体・液体の密度を用いた高レイノルズ数の流れの計算を可能にするもので、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。