

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Development of THINC based hybrid VOF and level set interface capturing scheme
著者(和文)	XiongYunong
Author(English)	Yunong Xiong
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12684号, 授与年月日:2024年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:肖鋒,青木 尊之,末包 哲也,大西 領,門永 雅史
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12684号, Conferred date:2024/3/26, 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	XIONG Yunong	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	肖鋒	教授	門永雅史	特任教授
	審査員	青木尊之	教授		
		末包哲也	教授		
大西領		教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は、「Development of THINC based hybrid VOF and level set interface capturing scheme」と題し、非構造格子を用いる多相流シミュレーションに対する THINC (Tangent of Hyperbola INterface Capturing) 法をベースとした新しい自由界面捕獲スキームの開発に関する研究であり、様々な多相流のベンチマーク問題をとおして開発手法がシミュレーションの高精度化及び高効率化に寄与することを確認したものである。英文で書かれており、5章から構成されている。

第1章「Introduction」では、気相と液相の間の自由界面を識別する数値シミュレーション手法の現状を概観し、特に広く使われている既存手法の VOF (Volume Of Fluid) 法と Level Set 法を取り上げ、それぞれの煩雑さや過剰な幾何的誤差と数値的な保存性が満たされないことによる精度低下について述べ、それらを解決する数値解法の提案を研究目的として掲げている。

第2章「Algorithmic overview of interface capturing methods」では、自由界面捕獲手法として幾何的 VOF 法と Level Set 法のそれぞれの長所を活かした Coupled Level Set-VOF (CLSVOF) を説明している。VOF 法により体積保存を担保し、また Level Set 情報を用いて界面の法線方向の計算精度を向上させている。しかし、手法の煩雑さや VOF 界面を1次関数より低精度で近似しているなどの問題点を指摘している。そこで代数的な自由界面捕獲法である THINC 法を用い、自由界面を高次補間関数で表現する THINC-Scaling 法を提案している。この手法は THINC 関数を通して Level Set 法と結合されるが、Level Set 関数の更新に Semi-Lagrange 法を使っているため多相流シミュレーションには利用できなく、さらに非構造格子への適用は困難を伴うことを述べている。

第3章「Hybrid VOF and level set interface capturing schemes under THINC formulation」では、THINC 法の問題点の改善を行っている。まず THINC-Scaling 法の中で自由界面の記述を2次多項式から4次多項式に変更し、初めて非構造格子において4次精度の THINC-scaling/QSR (Quartic Surface polynomial for interface Representation) 法を構築している。続いて、計算効率を向上させるために、1ステップの時間更新に1段の時間積分を用いる THINC/CSLS (Consistent Single-step time integration with Level Set) 法を提案している。セル境界における流束計算では、THINC-Scaling 法に使われる3段 Runge Kutta 法の代わりに1段時間積分を使い、空間的にはセル中心の軌跡における複数のサンプル点の値を用いている。これにより THINC/CSLS 法の計算時間は THINC-Scaling 法の1/3に短縮されることを示している。様々な移流ベンチマーク問題において検証計算を行い、自由界面に対して THINC-scaling/QSR 法は空間5次の収束性を有することを確認している。また THINC/CSLS 法は THINC-Scaling 法に劣らない精度を有し、非構造格子を用いる多相流シミュレーションに適していることを明らかにしている。

第4章「Multi-phase fluid simulation implementation of the proposed scheme」では、第3章で構築した非構造格子の THINC/CSLS 法を、非圧縮性の多相流シミュレーションに適用している。自由界面を含んだ一流体モデルを用い、圧力のプロジェクション法で計算している。また、界面に2次多項式を用いた THINC/CSLS 法で表現した自由界面に CSF (Continuum Surface Force) モデルを適用して表面張力を計算している。界面の曲率計算の精度が向上したため、界面近傍での非物理的な振動が大幅に減少している。さらに、単一気泡の上昇、2つの気泡が上昇しながら干渉する例題、Rayleigh-Taylor 不安定性の成長、ダム崩壊問題などを検証し、良好な結果を得ている。重力、粘性力、表面張力が影響するこれらのテスト問題で良い結果が得られたことは、THINC/CSLS 法に基づく本モデルが他の様々な実問題にも適用できることを示している。

第5章「Conclusion remarks」では、本研究で得られた成果をまとめるとともに、今後の課題について述べている。

以上を要するに、本論文は非構造格子を用いる多相流シミュレーションの高精度化及び高効率化に向けて、新しい自由界面捕獲スキームを開発し、それに基づく数値計算モデルの開発と検証をまとめたもので、工学上貢献するところが大きい。よって本論文は博士(工学)論文として十分な価値を有すると認められる。